

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JULIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS

CÂMPUS DE ARARAQUARA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOMATERIAIS E
BIOPROCESSOS**

MESTRADO PROFISSIONAL

FELIPE PIANCATELLI

**ANÁLISE DO POTENCIAL TÉCNICO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO OU
BIOTECNOLÓGICO DE RESÍDUOS DE INDÚSTRIAS CITRÍCOLAS DE PEQUENO
PORTE**

ARARAQUARA - SP

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
CÂMPUS DE ARARAQUARA

FELIPE PIANCATELLI

**ANÁLISE DO POTENCIAL TÉCNICO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO OU
BIOTECNOLÓGICO DE RESÍDUOS DE INDÚSTRIAS CITRÍCOLAS DE PEQUENO
PORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos (Mestrado Profissional), Área de Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Samuel Conceição de Oliveira

ARARAQUARA - SP

2024

P581a Piancatelli, Felipe.
Análise do potencial técnico do aproveitamento energético ou
biotecnológico de resíduos de indústrias citrícolas de pequeno porte /
Felipe Piancatelli. – Araraquara, 2024.
87 f. : il.

Orientador: Samuel Conceição de Oliveira.

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Estadual
Paulista. "Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de Ciências
Farmacêuticas. Programa de Pós-graduação em Engenharia de
Biomateriais e Bioprocessos. Área de Biomateriais, Bioprocessos,
Bioprodutos.

1. Resíduos. 2. Indústria cítrica. 3. Viabilidade técnico-econômica.
4. Aproveitamento. 5. Sustentabilidade. I. Oliveira, Samuel Conceição
de, orient. II. Título.

Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - Faculdade de Ciências Farmacêuticas
UNESP - Campus de Araraquara

CAPES: 33004030170P0
Esta ficha não pode ser modificada

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise do potencial técnico do aproveitamento energético ou biotecnológico de resíduos de indústrias citrícolas de pequeno porte

AUTOR: FELIPE PIANCATELLI

ORIENTADOR: SAMUEL CONCEIÇÃO DE OLIVEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos, área: Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. SAMUEL CONCEIÇÃO DE OLIVEIRA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Farmacêuticas do Campus de Araraquara da Unesp

Prof. Dr. ARNALDO SARTI (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia, Física e Matemática / Instituto de Química do Campus de Araraquara da Unesp

Prof. Dr. GUILHERME PEIXOTO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Farmacêuticas do Campus de Araraquara da Unesp

Araraquara, 27 de setembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Àqueles que moldaram meu caminho e encheram minha jornada com amor e apoio incondicionais.

Aos meus queridos pais João e Lucimara, à minha vó Maria, fontes inesgotáveis de sabedoria e carinho, cujo apoio constante e fé em meu potencial foram faróis iluminando meu percurso acadêmico.

Ao meu amado avô João, cuja sabedoria e histórias inspiradoras sempre foram fontes de estímulo. Sua presença é um legado que carrego com orgulho.

Ao meu tio-avô, figura sábia e incentivadora, cujas palavras de encorajamento foram bússolas norteadoras em momentos desafiadores.

Aos amigos, pilares essenciais, que compartilharam risos, desafios e triunfos ao longo desta jornada. A amizade de vocês é o alicerce sobre o qual construí minha trajetória acadêmica.

Aos demais familiares, cujo apoio e compreensão foram fundamentais. Cada gesto de incentivo e carinho contribuiu para a realização deste feito.

Ao meu orientador Prof. Samuel pelos conhecimentos transmitidos, pelo incentivo e pela oportunidade de realizar este trabalho.

Este trabalho é dedicado a todos vocês, que, de diferentes maneiras, iluminaram meu caminho, tornando possível a concretização deste sonho acadêmico.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.”

(NEWTON, Isaac).”

RESUMO

Esta dissertação analisa a viabilidade técnica e econômica da implementação de uma biorrefinaria destinada ao processamento de resíduos cítricos, com foco na produção de bioetanol, biogás e d-limoneno. Inicialmente, o estudo mapeia os principais resíduos sólidos e líquidos gerados no processo de produção de suco concentrado de laranja (FCOJ) e derivados, destacando o volume significativo de resíduos gerados, como cascas, polpa e extratos líquidos, que correspondem a aproximadamente 50% da massa total da fruta. Com base em uma análise detalhada dos processos industriais, incluindo extração, prensagem e concentração, foram avaliados diferentes cenários de aproveitamento energético e biotecnológico dos resíduos. O estudo aplicou metodologias de modelagem financeira e indicadores de viabilidade econômica, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *payback*, comparando a viabilidade de uma planta integrada para a produção dos três bioprodutos supracitados e alternativas para produções independentes. Os resultados indicaram que a biorrefinaria, em sua configuração original, enfrenta desafios econômicos substanciais, devido ao alto investimento inicial e aos custos operacionais necessários. No entanto, a produção isolada de d-limoneno mostrou-se viável em termos econômicos, oferecendo um retorno promissor, especialmente em mercados especializados. A produção de bioetanol e biogás, embora sustentável do ponto de vista ambiental, apresenta maior dependência de incentivos fiscais e políticas de apoio à economia circular para se tornar financeiramente atrativa. Além de contribuir para a redução dos impactos ambientais da indústria citrícola, este trabalho propõe soluções que potencializam o uso de resíduos, gerando novos fluxos de receita e minimizando desperdícios. A análise de sensibilidade dos cenários financeiros identificou que as variáveis críticas que afetam a viabilidade do projeto são os custos de insumos e as flutuações no mercado de *commodities*.

Palavras-chave: Resíduos; Indústria cítrica; Viabilidade técnico-econômica; Aproveitamento; Sustentabilidade

ABSTRACT

This dissertation analyzes the technical and economic feasibility of implementing a biorefinery for the processing of citrus waste, focusing on the production of bioethanol, biogas and d-limonene. Initially, the study maps the main solid and liquid waste generated in the production process of concentrated orange juice (FCOJ) and derivatives, highlighting the significant volume of waste generated, such as peels, pulp and liquid extracts, which correspond to approximately 50% of the total mass of the fruit. Based on a detailed analysis of the industrial processes, including extraction, pressing and concentration, different scenarios for the energy and biotechnological use of the waste were evaluated. The study applied financial modeling methodologies and economic feasibility indicators, such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and payback, comparing the feasibility of an integrated plant for the production of the three aforementioned bioproducts and alternatives for independent production. The results indicated that the biorefinery, in its original configuration, faces substantial economic challenges due to the high initial investment and operational costs required. However, the isolated production of d-limonene proved to be economically viable, offering a promising return, especially in specialized markets. The production of bioethanol and biogas, although environmentally sustainable, is more dependent on tax incentives and policies supporting the circular economy to become financially attractive. In addition to contributing to the reduction of the environmental impacts of the citrus industry, this work proposes solutions that enhance the use of waste, generating new revenue streams and minimizing waste. The sensitivity analysis of the financial scenarios identified that the critical variables affecting the viability of the project are input costs and fluctuations in the commodity market.

Keywords: Waste, Citrus industry; Technical-economic viability; Utilization; Sustainability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exportações de FCOJ em toneladas e arrecadação em dólares	20
Figura 2 - Extratora do tipo espremedor.....	24
Figura 3 - <i>Finisher</i> tipo parafuso.....	24
Figura 4 - Fluxograma simplificado do processo de produção de FCOJ	26
Figura 5 - Etapas do processamento de suco e subprodutos	27
Figura 6 - Fluxograma atual do processo de tratamento dos resíduos gerados.....	47
Figura 7 - Fluxograma proposto de minigeração centralizada	48
Figura 8 - Fluxo de caixa estimado entre 2024 e 2034	69
Figura 9 - Fluxo de caixa estimado entre 2026 e 2036	71
Figura 10 - Fluxo de caixa estimado entre 2028 e 2038	72
Figura 11 - Projeção do lucro estimado versus tempo de operação para a Empresa 1	76
Figura 12 - Projeção do lucro estimado versus tempo de operação para a Empresa 2	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do setor produtivo de laranja no Brasil, São Paulo e na região de Araraquara em 2022	17
Tabela 2 - Processamento industrial de laranjas em caixas de 40,8 kg.....	19
Tabela 3 - Produção estimada de subprodutos versus capacidade projetada	63
Tabela 4 - Investimento esperado composto pelas métricas teóricas	63
Tabela 5 - Custos anuais de mão de obra	64
Tabela 6 - Encargos trabalhistas por funcionário	64
Tabela 7 - Custos com manutenção atrelado ao ISBL	65
Tabela 8 - Valores calculados dos custos com despesas operacionais	66
Tabela 9 - Custo com consumíveis e utilidades para processamento total.....	66
Tabela 10 - Custos totais de operação.....	67
Tabela 11 - Estimativas de receitas obtidas com os subprodutos.....	68
Tabela 12 - Tabela de indicadores de viabilidade e sustentabilidade	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FCOJ	<i>Frozen Concentrated Orange Juice</i> (Suco de Laranja Concentrado Congelado)
Brix	Índice de Refração de uma solução que determina a quantidade de açúcares presentes
WASTE	Resíduo
W.H.E	<i>Waste Heat Evaporator</i> (Evaporador de Calor Residual)
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i> (Ambiental, Social e Governança)
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Tep	Toneladas Equivalentes de Petróleo
ISBL	<i>Inside Battery Limits Plant Cost</i>
OSBL	<i>Outside Battery Limits Plant Cost</i>
CEPCI	<i>Chemical Engineering Plant Cost Index</i> (Índice de Custos de plantas de Engenharia Química)
ppm	Partículas por milhão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. Contextualização e localização do setor	17
3.1.1. Importância econômica	18
3.1.2. Cadeia produtiva e tecnologias	18
3.2. Processo de obtenção do suco cítrico	20
3.2.1. Recebimento e pré-seleção dos frutos	21
3.2.2. Armazenamento dos frutos	22
3.2.3. Higienização e classificação dos frutos	22
3.2.4. Extração do suco	23
3.2.5. Adaptações e ajuste no teor de polpa no decorrer do processo	24
3.2.6. Pasteurização e processo de concentração do suco	25
3.2.7. Resfriamento e armazenamento do FCOJ	25
3.3. Resíduos e subprodutos do processo de extração	26
3.3.1. Sólidos solúveis em água	28
3.3.2. Polpa congelada	29
3.3.3. Aromas e óleos essenciais da laranja	30
3.3.3.1. Óleo essencial da casca da laranja	31
3.3.3.2. Recuperação de óleos essenciais e aromas aquosolúveis do suco	33
3.3.3.3. Óleo essencial destilado	36
3.3.4. Farelo de polpa cítrica	37
3.3.5. Extrato líquido residual da prensagem do bagaço: melaço e d-limoneno	38
3.4. Produção de bioprodutos a partir dos resíduos	40
3.4.1. Minigeração integrada bioetanol, biogás e d-limoneno	40
3.4.2. Processo de obtenção do bioetanol	42
3.4.3. Processo de obtenção de biogás	43
3.4.4. Processo de obtenção de d-limoneno	45

4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
4.1. Caracterização da indústria estudada e fluxograma do processo atual de tratamento dos resíduos sólidos gerados.....	46
4.2. Métodos propostos para tratamento dos resíduos	47
4.2.1. Resultados teóricos esperados com a biorrefinaria.....	49
4.3. Metodologia para determinação da viabilidade financeira.....	51
4.3.1. Investimentos estimados para instalação.....	52
4.3.2. Custos fixos estimados para produção.....	54
4.3.3. Custos variáveis estimados para produção e impostos.....	55
4.4. Demonstrações financeiras, estimativas de receitas e indicadores de viabilidade	57
4.4.1. Demonstrações contábeis	58
4.4.2. Estimativas de receitas.....	60
4.4.3. Indicadores de viabilidade	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1. Cenários avaliados.....	62
5.2. Investimento esperado	63
5.3. Custos de produção	64
5.3.1. Custos fixos.....	64
5.3.2. Custos variáveis	66
5.4. Estimativas de receitas.....	67
5.5. Demonstrativos de fluxo de caixa.....	68
5.5.1. Fluxo de caixa estimado para 2024.....	68
5.5.2. Fluxo de caixa estimado para expansão de 2026	70
5.5.3. Fluxo de caixa estimado para expansão de 2028	72
5.6. Fluxo de caixa para produção independente de d-limoneno.....	73
5.6.1. Análise da Empresa 1 para os 3 cenários de produção	75
5.6.2. Análise da Empresa 2 para os 3 cenários de produção	76
5.7. Análise de viabilidade e sustentabilidade da biorrefinaria	78
6. CONCLUSÕES	80
7. PERSPECTIVAS.....	82

1. INTRODUÇÃO

A indústria citrícola desempenha um papel crucial na economia global, abrangendo a produção de uma ampla variedade de produtos, desde sucos concentrados até óleos essenciais. Historicamente, a citricultura tem sido um setor agrícola vital, especialmente em regiões tropicais e subtropicais, onde as condições climáticas favorecem o cultivo de frutas cítricas. No Brasil, essa indústria cresceu exponencialmente, tornando-o um dos maiores produtores e exportadores de suco de laranja do mundo.

Responsável por cerca de 1,5 milhão de empregos diretos e indiretos, este setor exerce uma forte influência no PIB brasileiro. Dados da Fundecitrus indicam que a safra de citros no Cinturão Citrícola de São Paulo e Triângulo Mineiro, entre maio de 2022 e abril de 2023, alcançou mais de 314 milhões de caixas de laranja, cada uma pesando em média 40,8 kg, totalizando aproximadamente 12,8 milhões de toneladas. Embora esse resultado tenha ficado ligeiramente abaixo da estimativa esperada, devido a desequilíbrios pluviométricos, a Fundecitrus reestimou a safra de 2023/2024 em cerca de 307 milhões de caixas, ou aproximadamente 12,5 milhões de toneladas.

As culturas cítricas, destinadas tanto à exportação quanto ao consumo nacional, oferecem uma variedade de produtos, que podem ser consumidos *in natura* ou com algum processamento industrial. Durante a safra de 2022/2023, aproximadamente 265 milhões de caixas de citros foram processadas pelas indústrias, resultando em uma produção de sucos que, segundo a CitrusBR, ultrapassou 945 mil toneladas. A maior concentração de indústrias de processamento citrícola e citricultores está no sudeste do Brasil, com destaque para o Triângulo Mineiro e a região de Araraquara, em São Paulo, principais centros desse importante setor da economia nacional.

Apesar de os avanços tecnológicos terem aumentado a eficiência produtiva, a indústria citrícola enfrenta desafios ambientais significativos. O processo de extração do suco *in natura* gera uma quantidade substancial de bioprodutos secundários, compostos principalmente por cascas, bagaços e outros subprodutos, representando

cerca de 55% do peso total da fruta (Yamanaka, 2005). Esses subprodutos, ricos em celulose, hemicelulose e lignina, tornam imperativa uma gestão adequada dos mesmos, não apenas para atender às normas ambientais, mas também para explorar oportunidades sustentáveis que promovam a viabilidade técnico-econômica da indústria.

O descarte inadequado dos resíduos da indústria citrícola pode causar problemas ambientais, incluindo a poluição do solo e da água. Além disso, esses resíduos se descartados sem reaproveitamento representam uma fonte potencial de desperdício de recursos, pois contêm compostos que podem ser utilizados na produção de energia ou de produtos de valor agregado. Constituídos principalmente de celulose, hemicelulose e lignina, esses resíduos têm um notável potencial para a geração de energia, seja por meio da produção de biogás ou bioetanol. Os impactos ambientais da indústria de suco cítrico também incluem o uso inadequado da água em várias operações, como lavagem das laranjas, extração do suco, concentração do suco e produção de farelo de polpa cítrica.

Ao longo deste estudo, foram aplicadas metodologias abrangentes para a análise técnica e econômica da biorrefinaria proposta. O processo investigou as etapas de extração de resíduos cítricos, seguidas por tecnologias de reaproveitamento, como fermentação para bioetanol, digestão anaeróbica para biogás, e extração de d-limoneno. A viabilidade financeira foi avaliada por meio de modelos de fluxo de caixa e indicadores de desempenho, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o período de *payback*.

2. OBJETIVOS

Analisar todo o processo de produção de produtos principais no âmbito de uma indústria citrícola de pequeno porte na mesorregião de Araraquara, localizada em Fernando Prestes – SP, identificando cada tipo de resíduo sólido ou líquido gerado na cadeia de produção e determinando a melhor forma de tratamento a ser adotada, com base em critérios como custo de implementação, impacto ambiental e potencial de lucro.

2.1. Objetivos Específicos

- Focar o estudo nas etapas de extração e processamento de derivados da laranja devido à significativa importância destas no volume processado pela indústria, compreendendo a observação detalhada do ciclo completo de obtenção de FCOJ, a identificação e a análise de todos os gargalos da produção, bem como de todas as fontes de resíduos (sólidos e líquidos);
- Utilizar informações da literatura sobre as diferentes formas de tratamento aplicadas para o reaproveitamento de resíduos na indústria de transformação de frutas in natura, visando determinar as metodologias mais indicadas para o caso em estudo, em conformidade com o estado atual da arte em tecnologias de aproveitamento de resíduos;
- Consolidar os resultados da pesquisa em conjunto com o proprietário da empresa e a equipe de Engenharia de Projetos, buscando inserir a indústria cada vez mais nos moldes ESG (*Environmental, Social and Governance*), pela proposição e avaliação de soluções baseadas em fatores econômicos, ambientais e de redução de gargalos produtivos, para aumentar o lucro na produção por meio da utilização de partes da cadeia produtiva que antes não eram aproveitadas como potenciais fontes de produtos com alto valor agregado;

- Realizar uma avaliação de viabilidade técnica e econômica para a instalação de uma unidade industrial produtora de bioetanol, biogás e limoneno, por meio da elaboração de demonstrativos de resultado em exercício (DRE) e demonstrativos de fluxo de caixa (DFC) a partir de estimativas de custos e investimentos necessários para a instalação da planta em questão, sendo que indicadores de viabilidade como o VPL, a TIR e o *payback* serão calculados a partir destes demonstrativos;
- Identificar quais variáveis exercem maiores impactos sobre a avaliação de viabilidade econômica, o que será feito por meio da análise de sensibilidade, variando-se algumas variáveis pré-escolhidas e analisando-se o quanto tais variações impactam os indicadores supracitados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Contextualização e localização do setor

O setor produtivo de laranja desempenha um papel fundamental na economia agrícola global, sendo o Brasil um dos maiores produtores e exportadores mundiais de suco de laranja. A produção de laranjas está concentrada principalmente na região sudeste do país, com destaque para o estado de São Paulo, que, juntamente com o Triângulo Mineiro, forma o maior cinturão citrícola do mundo (Fundecitrus, 2023).

A Tabela 1 apresenta uma visão abrangente do setor produtivo de laranja no Brasil, destacando as contribuições do estado de São Paulo e, mais especificamente, da região de Araraquara. O Brasil possui uma área plantada e colhida de aproximadamente 571 e 568 mil hectares, respectivamente, com São Paulo representando cerca de 63% dessa área, evidenciando um papel dominante na produção de laranjas. A região de Araraquara, embora menor em termos absolutos, é uma área produtiva significativa dentro do estado, com cerca de 39 mil hectares plantados e colhidos.

Tabela 1 - Dados do setor produtivo de laranja no Brasil, São Paulo e na região de Araraquara em 2022

	Brasil	São Paulo	Região Araraquara
Área plantada ou destinada à colheita (Hectares)	570.884	357.965	38.676
Área Colhida (Hectares)	568.132	357.433	38.675
Quantidade produzida (Tonelada)	16.929.631	13.025.994	1.146.072
Valor da Produção (Mil Reais)	14.367.012	10.723.088	942.366
Rendimento médio (Kg /Hectare)	29.799	36.443	29.366

Fonte: Adaptado de IBGE (2023)

Em termos de produção, o Brasil alcança 16.929.631 toneladas de laranjas, sendo que São Paulo responde por 77% desse total, correspondendo a cerca de 13 milhões de toneladas. A produção na região de Araraquara é de aproximadamente 1,15 milhões de toneladas, evidenciando a importância dentro do estado. O valor econômico gerado pela produção de laranjas no Brasil é em torno de 14, 37 bilhões de reais, com São Paulo contribuindo com 10, 72 bilhões e a região de Araraquara com 942 milhões de reais, refletindo sua relevância econômica no setor.

O rendimento médio de produção de laranjas no Brasil é de aproximadamente 30 toneladas por hectare, enquanto São Paulo apresenta um rendimento superior aproximado de 36,5 toneladas por hectare, indicando práticas agrícolas mais eficientes. A região de Araraquara, apresenta um rendimento médio similar à média nacional (30t/ha), com produtividade significativa, embora ligeiramente inferior à média estadual.

3.1.1. Importância econômica

A citricultura brasileira é responsável por gerar aproximadamente 1,5 milhões de empregos diretos e indiretos, contribuindo significativamente para o produto interno bruto (PIB) do país (CitrusBR, 2023). A safra de laranja no Cinturão Citrícola de São Paulo e Triângulo Mineiro, entre maio de 2022 e abril de 2023, alcançou mais de 314 milhões de caixas de laranja, totalizando cerca de 12,8 milhões de toneladas (Fundecitrus, 2023). Este setor é vital não apenas para a economia local, mas também para a balança comercial do Brasil, uma vez que uma grande parte da produção é destinada à exportação.

3.1.2. Cadeia produtiva e tecnologias

A cadeia produtiva da laranja inclui várias etapas, desde o cultivo e colheita até o processamento industrial. A maior parte da produção é direcionada para a fabricação de suco concentrado congelado FCOJ, que é amplamente exportado. As tecnologias utilizadas na produção de FCOJ e outros derivados cítricos têm evoluído ao longo dos anos, com melhorias significativas em eficiência e sustentabilidade (Neves *et al.*, 2017).

Conforme pode-se observar na Tabela 2 e na Figura 1 a seguir, o processamento de caixas de laranja sempre sofre variações em decorrência de problemas com clima, regime pluviométrico, fatores econômicos entre outros que afetam a produção industrial. O que é mais notável nos dados é um máximo local de processamento industrial por volta de 2017/18, recuperando a forte queda nos anos anteriores, porém sucedida de uma variação negativa já no ano seguinte (2018/19).

Tabela 2 - Processamento industrial de laranjas em caixas de 40,8 kg

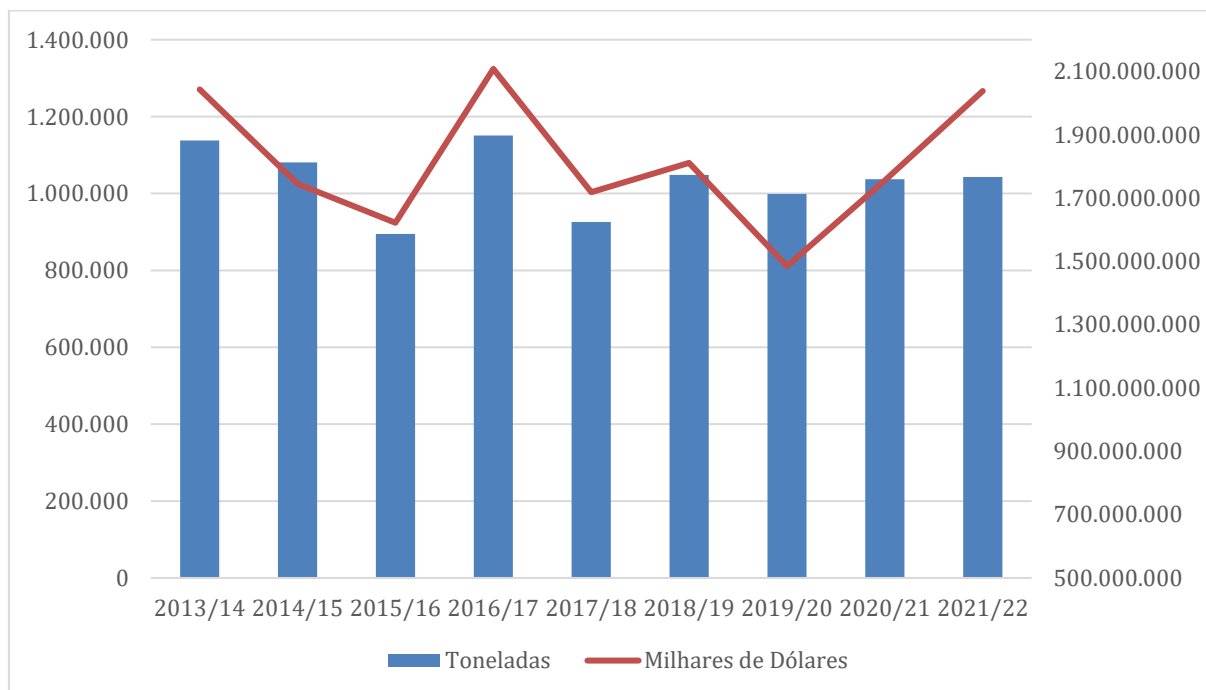
Ano	Caixas de 40,8 kg
2013/14	240.000.000
2014/15	248.900.000
2015/16	261.586.000
2016/17	185.569.000
2017/18	370.000.000
2018/19	236.800.000
2019/20	325.077.912
2020/21	225.528.950
2021/22	224.422.184
2022/23	265.292.217

Fonte: Citrus BR (2023)

O gráfico mostrado na Figura 1, que foi obtido a partir de informações atualizadas do site Citrus BR, apresenta as exportações brasileiras de suco de laranja concentrado (FCOJ) equivalente a 66 Brix, tanto em toneladas quanto em valores em dólares americanos (US\$), no período de 2013/14 a 2022/23. A análise desses dados revela algumas tendências e variações significativas ao longo dos anos.

De 2013/14 a 2022/23, as exportações de FCOJ apresentaram flutuações consideráveis. O pico de exportação ocorreu em 2017/18, com aproximadamente 1,2 milhões de toneladas, sendo arrecadado um valor em torno de 2,2 bilhões de dólares. Este período representa o auge tanto em volume quanto em valor financeiro. Após 2017/18, houve uma queda acentuada em 2018/19, com as exportações reduzindo-se para cerca de 926 mil toneladas e arrecadação de 1,72 bilhões de dólares, seguida de uma recuperação em 2019/20. A menor quantidade exportada foi registrada em 2016/17, com aproximadamente 900 toneladas, refletindo-se em um dos valores financeiros mais baixos do período, cerca de 1,6 bilhões de dólares. Em termos financeiros, o ano de 2022/23 destacou-se, com valores próximos ao pico, atingindo cerca de 2 bilhões de dólares, apesar de o volume exportado ter sido inferior ao registrado em 2017/18, o que sugere uma valorização do produto ou uma possível alteração nas condições de mercado e preços.

Figura 1 - Exportações de FCOJ em toneladas e arrecadação em dólares



Fonte: Adaptado de Citrus BR (2023)

3.2. Processo de obtenção do suco cítrico

A indústria de suco e subprodutos cítricos desempenha um papel significativo na economia global, atendendo à crescente demanda por produtos cítricos em todo o mundo. Segundo Darros-Barbosa e Curtolo (2022), a produção industrial de suco e subprodutos cítricos fornece uma visão geral dos processos envolvidos na produção de suco concentrado e congelado, abrangendo desde a chegada das frutas oriundas dos pomares até as etapas de extração, concentração e análise de atributos sensoriais e microbiológicos.

A produção mundial de suco concentrado de laranja teve suas origens nas regiões tropicais da Ásia, expandindo-se globalmente ao longo do tempo. Atualmente, o Estado de São Paulo, Brasil, destaca-se como o maior produtor mundial, superando os Estados Unidos em produção e tecnologia (Food and Agriculture Organization, 2020). Segundo a CitrusBR (2022), o Brasil é responsável por cerca de 62% da produção mundial de suco de laranja, sendo sua estabilidade mantida, realizando-se apenas ajustes voltados para a maximização de rendimento, qualidade e eficiência energética (JOHNSON *et. al.*, 2019).

Certificações, medidas de higiene e segurança alimentar, assim como a adoção de tecnologias modernas, são aspectos relevantes na indústria cítrica (World Citrus Organization, 2020). Esses fatores contribuem para a manutenção da qualidade e segurança dos produtos, garantindo competitividade no mercado internacional. As etapas principais de produção do suco são listadas e descritas a seguir, visando abordar a geração de resíduos durante a produção (Yamanaka, 2005):

- Recebimento e Pré-Seleção dos Frutos
- Armazenamento dos Frutos
- Higienização e Classificação dos Frutos
- Extração de Suco
- Adaptações e Ajuste no Teor de Polpa
- Pasteurização e Processo de Concentração do Suco
- Resfriamento e Armazenamento do FCOJ

A seguir, são detalhadas cada uma das etapas de obtenção do produto final, a fim de nivelar o conhecimento a respeito da geração de resíduos da produção.

3.2.1. Recebimento e pré-seleção dos frutos

Nesta etapa os frutos, são transportados em carretas até a chegada no pátio das empresas, quando então são cadastrados dados de cada produtor e do lote de laranjas colhidas. Em seguida, análises são conduzidas para determinar parâmetros como °Brix (teor de sólidos solúveis), índice de acidez total e relação acidez/°Brix.

As carretas são posicionadas em rampas hidráulicas, inclinando-se gradualmente os caminhões para despejar o conteúdo em esteiras de roletes. Em seguida, os frutos são transportados por elevadores para outro conjunto de esteiras até os depósitos. Durante esse percurso, são descartados os frutos que não atendem aos critérios estabelecidos, como falta de maturidade, presença de ferimentos nas cascas, excesso de ataque por ácaros ou sujeira, dimensões inadequadas e chegada à fábrica muito após a colheita.

Antes de saírem da fábrica, as carretas passam por uma aplicação de sais quaternários de amônio para o controle do cancro cítrico.

3.2.2. Armazenamento dos frutos

Os frutos são conduzidos pelos transportadores aos silos de armazenagem conhecidos como *bins*. Com base nas características estabelecidas pela análise do recebimento, os frutos são direcionados a *bins* distintos, sendo armazenados separadamente de acordo com as especificações determinadas durante a avaliação inicial.

3.2.3. Higienização e classificação dos frutos

Ao receber uma ordem de produção, os pórtilhos dos *bins* são abertos, permitindo que os frutos caiam nas esteiras que os conduzirão para a área de extração. Para atender às especificações do cliente, realiza-se uma combinação de laranjas de diferentes características, visando alcançar as propriedades desejadas.

Os frutos, provenientes dos *bins*, são direcionados para mesas de lavagem equipadas com esguichos na parte superior e escovas de material plástico na parte inferior. Água condensada, proveniente do evaporador de suco, é utilizada no processo de lavagem. Simultaneamente, as escovas na parte inferior efetuam a limpeza mecânica dos frutos, os quais são transportados pelas escovas e higienizados, com ou sem auxílio de detergentes.

As empresas adotam uma ou duas etapas contínuas de lavagem com o objetivo de remover todas as impurezas presentes na casca dos frutos. Durante o processo de lavagem, as mesas permanecem abertas, possibilitando a percepção dos odores carregados pela névoa gerada pelos sprays dos bicos de lavagem.

Após a lavagem, os frutos passam por uma seleção realizada por operadores em mesas específicas. Frutas danificadas por pragas, cortes e amassados são removidas e encaminhadas para a fábrica de ração. Concluída a seleção, as laranjas seguem para os classificadores, que as separam por tamanho antes de serem direcionadas para as linhas de extração.

3.2.4. Extração do suco

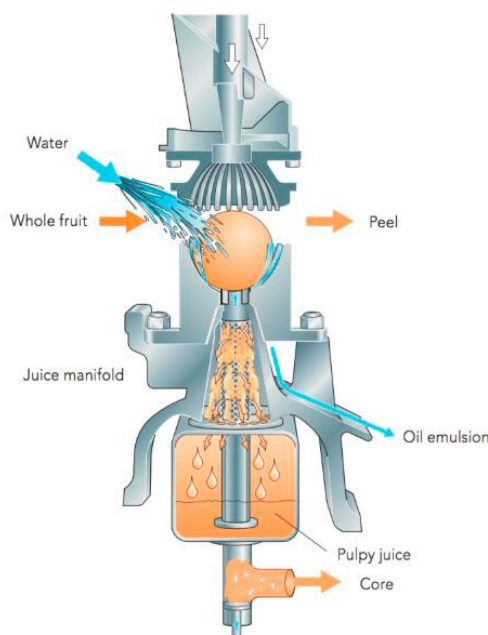
Após a etapa de lavagem, as laranjas são encaminhadas para o extrator mais adequado a fim de obter um rendimento otimizado em suco. Essa fase é crucial, pois determina tanto o rendimento quanto a qualidade do suco, exigindo, assim, a configuração precisa das condições operacionais do extrator. Conforme artigos da Tetrapack (2023), a fase de extração compreende a ação de espremer ou escarear laranjas inteiras ou cortadas por meio de pressão mecânica, ao mesmo tempo que separa e evita a entrada de bagaço, óleo e outros componentes da fruta no suco, o que poderia alterar o sabor deste.

Existem dois principais tipos de extratores predominantes nas instalações de processamento de laranja, incluindo o tipo mandril e o tipo espremedor, mostrado na Figura 2, o qual é o utilizado na indústria estudada. Para esses tipos, destacam-se duas marcas principais: Brown para o tipo mandril e o JBT para o tipo espremedor (Tetrapack, 2023). Segundo Yamanaka (2005), o processo de extração por meio de espremedor pode ser subdividido em quatro fases. Inicialmente, a laranja é automaticamente posicionada no copo inferior, seguido pelo movimento descendente do copo superior, que comprime a fruta contra o cortador inferior localizado na extremidade do tubo coador. Esse procedimento cria um orifício na fruta, permitindo que o suco flua sem entrar em contato com a casca. A extração é finalizada com a compressão do material retido no tubo coador, e a casca é expelida por um espaço anular no copo superior, enquanto as membranas e sementes são eliminadas pelo orifício central do elemento que comprime o material interno do tubo coador, concluindo assim a fase de extração. A operação do extrator do tipo espremedor está ilustrada na Figura 2.

No extrator tipo mandril, a laranja é dividida em dois hemisférios, sendo cada um deles suportado por um copo. A extração ocorre pela pressão de um cone sobre a metade cortada do fruto.

Ambos os métodos de extração apresentam rendimentos semelhantes, distinguindo-se apenas quanto à qualidade da polpa conforme reportado nos acervos da TETRAPACK, 2023.

Figura 2 - Extratora do tipo espremedor



Fonte: Acervo TETRAPACK, 2023

3.2.5. Adaptações e ajuste no teor de polpa no decorrer do processo

O suco armazenado passa pela fase de ajuste de polpa, conduzida por meio de *finishers* ou turbo-filtros. Os *finishers* consistem em cilindros de aço inoxidável nos quais estruturas com telas de tecido sintético desempenham uma função filtrante. O processo de ajuste ocorre em etapas, adaptando-se às especificações do cliente, mas, geralmente, ao término do ajuste, o teor de polpa estará em torno de 4%.

O suco, com sua polpa ajustada, é então submetido a centrífugas para a correção da cor. Um exemplo comercial de *finisher* é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - *Finisher* tipo parafuso



Fonte: GENEMCO, 2023

3.2.6. Pasteurização e processo de concentração do suco

O suco, previamente ajustado em relação ao teor de polpa, é conduzido por tubulações aos evaporadores de múltiplo efeito sob vácuo, o qual é gerado por colunas barométricas, que mantêm um ciclo fechado de circulação da água utilizada no processo. Antes do primeiro estágio dos evaporadores, ocorre a pasteurização do suco, dando início ao processo de concentração. A pasteurização tem como objetivo inativar os microrganismos responsáveis pela degradação do suco de laranja, assim como a enzima pectinesterase, cuja ação resulta na formação de ácidos pectíneos que arrastam o material colorido, conferindo turbidez ao suco.

Os evaporadores de múltiplo efeito destinados à concentração do suco são denominados TASTE. O suco, inicialmente com sólidos solúveis totais entre 10 e 11 °Brix, ao final do processo de evaporação, apresenta um teor de 65 °Brix, seguindo o padrão de qualidade para o FCOJ. Durante a evaporação, o suco perde sua fração volátil, que contém as essências, as quais, em alguns casos, são reintegradas ao suco, ou mesmo vendidas separadamente.

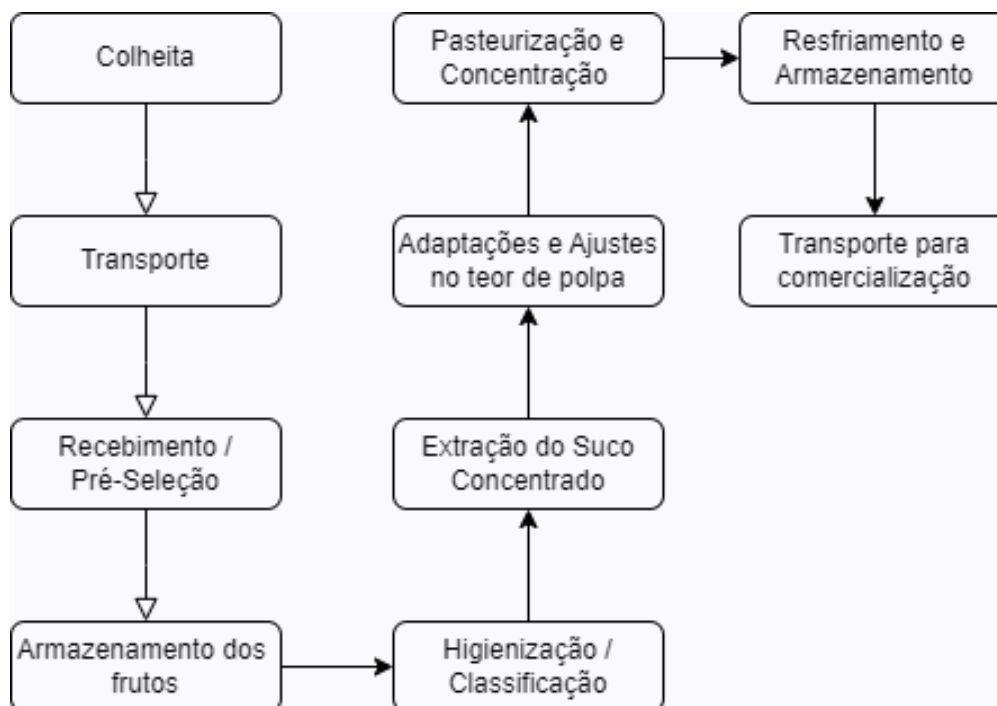
No processo de concentração, são obtidos sucos concentrados com teores variáveis de sólidos solúveis. É comum realizar a mistura (*blends*) de sucos com características distintas para uniformizar a produção. Esse processo ocorre em tanques de mistura de suco, sem grandes complexidades. Nessa etapa, as essências perdidas durante a concentração são reintegradas ao suco de laranja, ajustando-o conforme as exigências dos clientes.

3.2.7. Resfriamento e armazenamento do FCOJ

O suco concentrado proveniente do último estágio do evaporador é alimentado aos resfriadores por meio de bicos injetores, em uma atmosfera de baixa pressão absoluta na qual o líquido evapora instantaneamente, reduzindo a temperatura para 18°C. Em seguida, trocadores de calor, utilizando glicol ou uma solução alcoólica como fluido refrigerante, diminuem a temperatura do suco para -7°C. O suco resfriado é então direcionado aos tanques de armazenamento, constituindo no sistema de armazenagem em grande escala, conhecido no setor como *tank-farms*. Nestes tanques, o suco é mantido armazenado até ser transportado por caminhões-tanque para o porto.

Na Figura 4, é apresentado um fluxograma simplificado do processo de produção de suco cítrico para o caso da laranja, sem levar em consideração os resíduos gerados.

Figura 4 - Fluxograma simplificado do processo de produção de FCOJ



Fonte: Elaboração própria a partir de dados de CITRUS BR (2023)

3.3. Resíduos e subprodutos do processo de extração

A indústria de suco e subprodutos cítricos gera uma variedade de resíduos durante o processo de extração, que incluem tanto sólidos como líquidos. A polpa obtida na etapa de extração é misturada com água para produzir um resíduo pouco concentrado, utilizado na mistura para ajustar as concentrações solicitadas pelos clientes. A emulsão água-óleo derivada dessa etapa passa por processos de extração, filtração e clarificação para obtenção de óleos essenciais.

Os resíduos sólidos provenientes do processamento, como cascas, polpa, sementes e frutas descartadas, são frequentemente tratados com cal para remover a água e ajustar o pH. Esta mistura é então prensada, produzindo o "licor de prensagem". Após a separação dos sólidos, a massa resultante é concentrada em evaporadores de múltiplos efeitos, originando o melaço cítrico (CETESB, 2005).

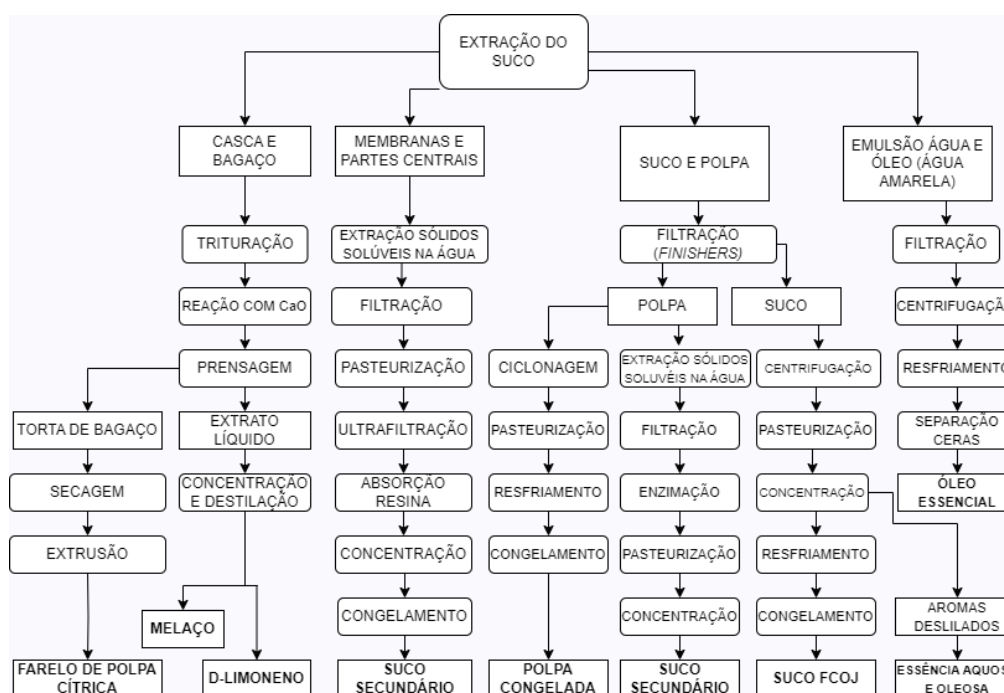
A massa remanescente é encaminhada para secadores rotativos, reduzindo a umidade a cerca de 7-8%. Este material seco é peletizado e resfriado antes de ser armazenado em silos metálicos (CETESB, 2005).

Os resíduos sólidos podem ser transformados em farelo peletizado, utilizado na alimentação animal ou como condicionador de solos (D.A. ZEMA *et al.*, 2018). Os efluentes líquidos, ricos em matéria orgânica e d-limoneno, requerem tratamento adequado devido ao seu alto potencial poluidor. As indústrias cítricas frequentemente removem o d-limoneno durante a concentração do suco, dado seu valor agregado e efeito bacteriostático que prejudica o tratamento biológico dos efluentes (CETESB, 2005).

A transformação desses resíduos em produtos de valor agregado pode reduzir os impactos ambientais, diminuir os custos de tratamento e gerar lucros adicionais, promovendo a sustentabilidade econômica e ambiental da indústria cítrica (Pfaltzgraff, 2014).

A Figura 5 mostra um esquema geral do processo de obtenção de produtos e subprodutos em uma unidade convencional de extração de suco, o qual pode se apresentar de diferentes formas nas várias indústrias.

Figura 5 - Etapas do processamento de suco e subprodutos



Fonte: Elaboração própria adaptada de Yamanaka (2005)

3.3.1. Sólidos solúveis em água

A recuperação dos sólidos solúveis da laranja representa uma preocupação central no processamento industrial. O processo emprega despulpadores, filtros prensa e turbo-filtros para separar os sólidos solúveis presentes na polpa do suco principal extraído pelas extratoras. Esses sólidos são recuperados por meio da lavagem da polpa com água (*pulp washing*). O subproduto resultante, denominado suco de polpa lavada (*pulpwash*), e os sólidos presentes no material ejetado do tubo coador das extratoras são reaproveitados.

No *core washing*, a recuperação dos sólidos solúveis da parte interna central da laranja ocorre durante a extração, seguindo um processo semelhante ao *pulpwash*. A proporção estimada de recuperação de sólidos solúveis por quilograma de polpa para o *corewash* é de aproximadamente 0,1 kg de sólidos solúveis por 5 kg de polpa, por caixa.

O *corewash* contém os sólidos remanescentes da parte interna central da laranja. Os sucos secundários, contendo sólidos solúveis recuperados, podem ser concentrados em evaporadores, variando as concentrações entre 50 e 65 °Brix, e posteriormente congelados ou adicionados agentes preservantes. Esses produtos secundários podem ser utilizados como ingredientes em sucos reconstituídos, refrescos ou refrigerantes, ou reincorporados ao suco primário, dependendo das regulamentações específicas de cada mercado consumidor.

É importante ressaltar que o *pulpwash* e o *corewash* são produtos secundários ou residuais da produção, devendo a decisão de produzi-los considerar uma análise equilibrada dos aspectos econômicos e de qualidade em relação ao suco primário. Aspectos legais, critérios de água utilizada e prevenção de contaminação microbiológica são fatores essenciais nesse processo.

A qualidade dos produtos secundários pode ser aprimorada por meio de processos adicionais, como tratamento enzimático, centrifugação, ultrafiltração e adsorção em resinas de troca iônica, para remover componentes indesejáveis.

A composição do sabor e aroma dos produtos cítricos estão associados a diversos fatores, incluindo a variedade da fruta, safra, grau de maturação e técnicas de processamento. O controle da acidez, teor de sólidos solúveis e óleos essenciais é fundamental para garantir a qualidade do suco. A presença de compostos indesejáveis, como limonóides e polifenóis, deve ser monitorada para evitar impactos negativos no sabor e na estabilidade do produto final. O processamento inadequado pode levar à formação de compostos indesejáveis, exigindo a aplicação de técnicas específicas para sua remoção e melhoria da qualidade do produto.

3.3.2. Polpa congelada

A polpa de laranja, pasteurizada e congelada, é composta por células da polpa da fruta obtidas a partir do suco integral. O processo envolve filtragem, centrifugação em hidrociclones, pasteurização, resfriamento e congelamento. Essa polpa pode ser utilizada na fabricação de diversos produtos alimentícios, bebidas, néctares ou sucos cítricos especiais ou reintegrada ao suco extraído para obter sucos com alto teor de polpa, assemelhando-se ao suco fresco natural. A combinação de polpa cítrica congelada com outros concentrados proporciona textura e corpo a bebidas e sucos reconstituídos.

A obtenção da polpa cítrica congelada requer ajustes na operação de extração, como o uso de tubos coadores com características especiais, perfurações maiores e regulagem específica para evitar o arraste de materiais indesejados. O objetivo é obter grandes células de polpa de laranja, ajustando procedimentos de extração e operações subsequentes de separação e filtração. Considera-se de boa qualidade a polpa retida em malha 20 *mesh* (0,85 mm de abertura).

Após a extração do suco, o sistema de filtração ajusta o teor de polpa e remove as células ou vesículas rompidas nas despulpadoras. O *screw finisher*, por exemplo, utiliza uma prensa contínua horizontal do tipo rosca sem fim para controlar o teor de polpa. Parâmetros como diâmetro da rosca, ângulo das pás e velocidade de rotação são ajustados para maximizar o rendimento e a qualidade. O *paddle finisher*, por sua vez, possui pás rotativas internas, afetando rendimento e qualidade. Os turbo-filtros, compostos por malha de tecido inerte reforçado, evitam a necessidade de centrífugas separadoras em alguns casos.

A mistura suco/polpa pode passar por um hidrociclone, que é um equipamento de larga aplicação no processo mineral para separar sólidos de líquidos por ação da força centrífuga, como etapa intermediária, funcionando como classificador e separador de pequenos defeitos. O hidrociclone opera segundo o princípio do bombeamento do líquido a alta pressão, permitindo o fluxo espiralado tangencial às paredes do cone. A polpa resultante é pasteurizada a temperaturas de 90 a 95 °C por 0,5 a 1 min, seguida de resfriamento, conforme descrito por Hendrix Junior (1996).

3.3.3. Aromas e óleos essenciais da laranja

Os componentes aromáticos da laranja podem ser divididos em duas categorias principais: os constituintes solúveis em óleo presentes no óleo da casca e no suco, e os constituintes solúveis em água presentes no suco. O óleo da casca é encontrado em pequenas glândulas (vesículas) no flavedo, a camada mais externa da casca. Mais de duzentos compostos aromáticos foram identificados na laranja e em seus derivados. Os compostos solúveis em óleo são hidrocarbonetos dos tipos terpenos e sesquiterpenos, como d-limoneno, valenceno, mirceno e α -pineno, além de seus derivados formados por reações oxidativas e hidrolíticas.

As células de suco nos segmentos da laranja também contêm gotículas de óleo com compostos aromáticos solúveis em óleo, semelhantes aos do óleo da casca. No entanto, diferenças significativas foram encontradas entre eles, com o óleo das células de suco apresentando mais ésteres e menos aldeídos, conferindo-lhe um aroma mais frutado. Os compostos solúveis em água no suco são uma mistura complexa, destacando-se acetaldeído, etanol, metanol, propanol e acetato etílico (Shaw, 1977; Ahmed *et al.*, 1978; Fellers, 1980; Johnson & Vora, 1983; O *et al.*, 1994).

A contribuição desses compostos para o sabor e aroma depende da concentração em relação ao limite de detecção sensorial e é influenciada pela origem, variedade, safra da fruta, localização do composto na fruta, modo de extração do suco, tratamento e processamento após a extração. Os testes sensoriais frequentemente indicam preferência por sucos com até cerca de 0,02 a 0,03% de óleo essencial.

A extração industrial do suco transfere óleo da casca para o suco. Em seguida, durante a concentração nos evaporadores, esse óleo pode ser removido. Diversas tecnologias de processamento, como alta pressão, CO₂ supercrítico, pulso elétrico, crioconcentração, osmose reversa e ultrafiltração, têm sido desenvolvidas para minimizar os efeitos negativos do calor sobre os compostos voláteis aromáticos da laranja (Nienaber & Shellhamer, 2001).

Os componentes aromáticos podem ser extraídos da casca e recuperados durante o processamento do suco, sendo reincorporados ou comercializados como subprodutos. Os principais produtos são óleo essencial da casca, óleo essencial recuperado durante a evaporação para suco concentrado e aromas aquossolúveis também recuperados no processo de evaporação. Esses produtos têm aplicações em diversas indústrias, como refrescos, refrigerantes, sorvetes, cosméticos e produtos de higiene. A forma de comercialização depende do uso, podendo envolver tratamentos como destilação fracionada, concentração, purificação, encapsulação ou mistura com outros ingredientes (Shaw, 1977; Ahmed *et al.*, 1978; Fellers, 1980; Johnsons & Vora, 1983; Ooghe *et al.*, 1994).

3.3.3.1. Óleo essencial da casca da laranja

Conforme descrito anteriormente, a maior parte do óleo essencial está presente em pequenas vesículas no flavedo (parte externa da casca), protegido por uma camada de cera. As etapas principais para obter esse óleo envolvem sua extração por ação mecânica, separação do óleo da casca por aspersão de água, centrifugação da emulsão óleo-água formada, clarificação do óleo cru, cristalização da cera por abaixamento de temperatura e separação dos cristais de cera do óleo por decantação e centrifugação.

Para extrair o óleo, as vesículas do flavedo devem ser rompidas por processo abrasivo ou raspagem, liberando o óleo que é separado da casca na forma de uma emulsão em água. O método de extração depende do tipo de extrator de suco utilizado. No caso das extratoras, que separam o óleo da fruta durante a extração do suco, a fruta é comprimida, rompendo as glândulas de óleo da parte externa do fruto (casca), que é triturada. Com aspersão de água sobre a casca, forma-se uma emulsão com o óleo, a qual é arrastada para fora dos copos por gravidade e separada por uma grade filtrante, evitando a transferência indesejável de elementos da casca para o suco.

A emulsão, contendo de 1 a 3% de óleo, é conduzida a uma separadora centrífuga para recuperação e concentração da fase rica em óleo até aproximadamente 60 a 80%. Viscosidade, teor de pectina e recirculação da água nas extratoras são parâmetros cruciais para a eficiência da operação. A solução concentrada é alimentada em uma centrífuga de alta rotação (polidora), eliminando impurezas restantes. Espera-se extrair cerca de 60 a 75% do óleo da casca e recuperar mais de 95% do total extraído nessas condições.

Operações como colheita, tempo decorrido pós-colheita, carga e descarga causam perda do turgor celular do óleo, reduzindo o óleo recuperado em comparação com o teor original na fruta. Fatores como método de extração, ajustes, intensidade, variedade, grau de maturação da fruta e clima também afetam o rendimento em óleo essencial. Laranjas colhidas no pico de maturação proporcionam maior rendimento.

Óleos essenciais, comercializados como líquidos, exigem remoção da cera, considerada defeito e causadora de problemas em tratamentos posteriores. A alternativa para remover a cera é o abaixamento da temperatura em tanques cônicos de altura elevada, nos quais a cera se acumula ao cristalizar, com drenagem do óleo por decantação. A temperatura é mantida entre -25 e -5 °C, dependendo do tempo de residência. A tecnologia recente, com o uso de trocador de superfície raspada, permite rápido resfriamento e formação de pequenos núcleos de cristalização. O óleo pode ser centrifugado e/ou filtrado para melhor acabamento, removendo partículas em suspensão, compostas de cera não removida e pigmentos e flavonoides precipitados.

O óleo essencial da casca de laranja normalmente contém antioxidantes naturais, mas ocasionalmente, para aumentar a estabilidade à oxidação, pode ser adicionado butil-hidroxitolueno (BHT) ou butil-hidroxianisol (BHA). O óleo assim obtido consiste principalmente de 95% de limoneno, cerca de 4% distribuídos entre mirceno, pineno, decanal, octanal, linalol, sabineno e geraniol, e frações menores, da ordem de partes por milhão, de outros terpenos e derivados (aldeídos, ésteres e alcoóis) (Cohn & Cohn, 1996; Reed & Hendrix Junior, 1996; Bradock, 1999).

3.3.3.2. Recuperação de óleos essenciais e aromas aquosolúveis do suco

Após a extração e ajuste do teor de polpa do suco de laranja, este contém compostos aromáticos, assim como aqueles solúveis em óleo presentes em gotículas. Além disso, incorpora parte do óleo da casca, arrastado durante a extração. Durante a etapa de concentração do suco em evaporadores de múltiplo efeito, uma fração dos compostos aromáticos é carregada junto com a água evaporada. Esses compostos podem ser recuperados em uma unidade recuperadora acoplada ao sistema evaporador, composta por condensadores, colunas de destilação a vácuo, fracionamento, esgotamento, retificação e concentradores, além de equipamentos auxiliares como refeedores, resfriadores, refluxadores, separadores de fases e ejetores.

Um sistema de recuperação de aromas opera capturando a fase rica em compostos aromáticos (solúveis em óleo e em água) emanada do evaporador. Em seguida, aumenta sua concentração alcoólica, condensa os vapores ricos em compostos aromáticos e resfria a fase aquosa e oleosa para aumentar a retenção dos compostos mais voláteis, promovendo a separação das fases. O resultado é a obtenção de duas frações distintas: uma fração hidroalcoólica, rica em substâncias aromáticas solúveis em água, e outra oleosa, rica em compostos aromáticos solúveis em óleo.

Como mencionado anteriormente, o suco de laranja contém cerca de duzentos compostos aromáticos diversos, com diferentes estruturas químicas e propriedades físico-químicas. Esses compostos variam desde o acetaldeído, com baixo ponto de ebulição (aproximadamente 16 °C), passando por inúmeros compostos de ponto de ebulição intermediários, como o álcool etílico (77 °C), até o valenceno, um hidrocarboneto que, em seu estado puro, tem ponto de ebulição igual a 285 °C. Além disso, deve-se considerar as diferentes atividades químicas e o equilíbrio líquido-vapor dos compostos, juntamente com as diferenças de equilíbrio e afinidade (ou solubilidade) existentes entre as fases aquosa e oleosa. Todos esses fatores evidenciam o desafio que representa o projeto e a operação de um sistema de recuperação de compostos aromáticos do suco, associado à operação de concentração em evaporadores de múltiplo efeito.

Em evaporadores de múltiplos efeitos, o termo "efeito" define o fluxo de calor. Dessa forma, o primeiro efeito é sempre aquele com temperatura mais elevada, recebendo a energia necessária como força motriz para todo o sistema, na forma de vapor vivo da caldeira. Os demais efeitos recebem vapores liberados do produto em evaporação como meio de aquecimento. A temperatura mais baixa do sistema está no último efeito, conectado ao sistema de vácuo (coluna barométrica e ejetores). Os estágios definem o fluxo de produto no evaporador, recebendo o primeiro estágio o suco de alimentação, com concentração mais baixa. O evaporador pode ser projetado para que qualquer efeito seja alimentado de forma a ter fluxo paralelo, fluxo em contracorrente ou combinação de ambos.

O evaporador do tipo TASTE, comum na indústria cítrica, é descrito como evaporador de tubos verticais em fluxo descendente, de múltiplo efeito e passagem única. Opera em regime contínuo a altas temperaturas, altas velocidades de escoamento e curto tempo de residência, minimizando a exposição do produto a elevadas temperaturas. Nesse tipo de evaporador, a separação dos componentes aromáticos da água evaporada ocorre no interior do feixe de tubos principal durante a fase de evaporação e aceleração. A grande área superficial gerada pelo líquido finamente pulverizado, formado pelo cone de distribuição no topo do feixe de tubos, permite a remoção eficiente dos compostos voláteis. Devido às diferenças entre as pressões de vapor e à destilação a vácuo por arraste de vapor, praticamente todos os compostos aromáticos são removidos nos primeiros estágios da evaporação.

Os vapores do primeiro estágio são condensados externamente aos tubos no segundo estágio (e segundo efeito). Os vapores contendo os compostos aromáticos sobem ao topo da carcaça do segundo estágio e passam por uma série de placas defletoras projetadas para remover o máximo de água condensável. A porção de incondensáveis é removida por uma saída conectada ao condensador barométrico, que, quando ativo, desvia o fluxo para o sistema de recuperação de essências. Essa sequência pode ser repetida no terceiro estágio do evaporador. Os vapores contendo os aromas voláteis entram no sistema de recuperação de aromas, onde cerca de 90 a 95% do produto é condensado usando-se água gelada como meio de resfriamento (Chen & Johnson, 1995).

A maior parte dos aromas é recuperada no primeiro, segundo e terceiro efeitos, onde há maior concentração e o efeito da temperatura é minimizado, ou seja, ocorrendo a remoção de 25 a 30% de água do suco. Ao aquecer um sistema líquido multicomponente contendo compostos com diferentes pontos de ebulição, a composição do vapor formado difere da composição do líquido. Essas diferenças na composição das duas fases em equilíbrio formam a base para a separação e concentração de seus componentes. Uma vez que muitos dos compostos aromáticos do suco são mais voláteis do que a água, a destilação fracionada é empregada para a separação e concentração desses compostos, juntamente com a remoção da água.

Os vapores contidos nos gases não condensáveis são coletados do segundo e terceiro efeitos do evaporador e enviados ao sistema de recuperação de aromas. Os compostos voláteis entram em uma coluna de esgotamento do destilador abaixo do condensador, auxiliando na remoção da água pela base da coluna. Os vapores enriquecidos com os compostos voláteis e outros gases não condensáveis passam pelo resfriador (*chiller*) e pelo lavador de gases (*scrubber*). Os compostos voláteis condensados são drenados pela base do sistema para coleta posterior e os gases residuais passam pelo condensador refrigerado, com a coleta do condensado feita em um tanque decantador na base do evaporador. O produto condensado coletado no tanque de decantação contém duas fases, uma aquosa e outra oleosa, que são separadas tipicamente por decantação do óleo e bombeamento da fase aquosa para outro tanque sob refrigeração. A fase oleosa pode ser também separada da fase aquosa em separadoras centrífugas (HERNANDEZ *et al.*, 1995; Redd & Hendrix Junior, 1996).

O processo de recuperação de aromas resulta na obtenção de um concentrado, geralmente denominado de essência, contendo de 200 a 500 vezes mais compostos voláteis em comparação com a concentração destes no suco original. Em termos gerais, um balanço de massa do sistema de recuperação de essências resulta em cem partes de essência aquosa para sete partes de essência oleosa. A essência aquosa contém acima de 65% de água, 12 a 25% de etanol (originado do metabolismo bioquímico da fruta), 0,5 a 2% de metanol (resultante da ação da enzima pectinesterase sobre a pectina, formando ácido péctico e metanol) e inúmeros compostos aromáticos presentes em concentrações menores, da ordem de partes por milhão, como o acetaldeído, composto presente em maior proporção entre os

compostos aromáticos. A essência oleosa contém principalmente d-limoneno (cerca de 94%), valenceno (> 1%), mirceno (1%), pineno (1%), octanal (0,5%), decanal (0,6%) e outros componentes. A essência aquosa, na forma como é recuperada, tem menor valor comercial do que a essência oleosa, no entanto, devido ao seu alto conteúdo de acetaldeído, composto que confere sabor de fruta fresca, ainda pode ser submetida a algum processo de transformação, aumentando seu valor. As técnicas atualmente disponíveis incluem o uso de osmose reversa com membranas capazes de reter o acetaldeído e outros compostos voláteis que possuem moléculas pequenas, ou a bioconversão enzimática do etanol em acetaldeído, empregando, por exemplo, a enzima álcool oxidase ou álcool desidrogenase (Rassis & Saguy, 1995).

3.3.3.3. Óleo essencial destilado

Os óleos essenciais podem ser destilados para produzir frações específicas destinadas a aplicações especiais. Conforme informações anteriores, o principal constituinte dos óleos essenciais é o d-limoneno, o qual apresenta potencial aromático limitado. Quando presente em excesso em sucos, bebidas e refrescos, pode proporcionar uma sensação de queimação na boca e na garganta ao ser consumido. A redução da concentração de d-limoneno resulta em um óleo concentrado com melhor estabilidade e solubilidade em água.

Ao remover ou reduzir os terpenos, o óleo é considerado concentrado devido à redução do volume, significando que um óleo concentrado 1:5 teve seu volume reduzido em 80%. Óleos concentrados têm sua fragrância (ou bouquet) intensificada, apresentando um teor mais elevado de compostos aromáticos suaves, como aldeídos e ésteres, sem o aroma pungente dos terpenos.

A referência aos óleos destilados pode gerar confusão, pois é importante entender exatamente qual óleo está sendo descrito. A fase oleosa, separada por centrifugação, pode passar por destilação por arraste com vapor (stripping) à temperaturas entre 110 e 130 °C. A adição de vapor inerte reduz a pressão de vapor do componente volátil. Os vapores obtidos são condensados e a emulsão resultante é separada por decantação, produzindo um tipo de óleo destilado, no qual a maior parte é composta por d-limoneno, sendo denominado de óleo cítrico destilado por vapor (*citrus stripper oil*).

Alguns óleos destilados, referidos simplesmente como "óleos essenciais", são obtidos por destilação da mistura óleo-suco, enquanto outros são chamados de "aroma oleoso" ou "óleo destilado" (Redd & Hendrix Junior, 1996). Outra tecnologia que pode ser aplicada é a extração supercrítica, que utiliza dióxido de carbono em condições supercríticas, agindo como solvente seletivo para determinados compostos, sendo inerte e não tóxico. A extração por CO₂ supercrítico é eficiente para terpenos de baixo peso molecular e altas pressões de vapor. Os óleos essenciais concentrados por CO₂ supercrítico são facilmente separados do solvente por redução da pressão, apresentando menor consumo energético e melhor qualidade aromática (TEMELLI *et al.*, 1989; Rizvi, 1994; DUGO *et al.*, 1995).

Outra abordagem é a tecnologia de encapsulamento de aromas, utilizando matrizes sólidas como amido, gomas ou xaropes de açúcares, que passam por processo de extrusão termoplástica seguido de secagem. Essa matriz sólida protege o aroma do ar e do ambiente, permitindo a liberação controlada dos compostos aromáticos no produto final (Crocker & Protchett, 1978; Anandaraman & Reineciuss, 1986; Risch, 1988).

3.3.4. Farelo de polpa cítrica

O resíduo sólido principal da extração de suco de laranja é composto por casca, sementes, membranas (bagaço) e polpa residual não utilizada no suco, representando aproximadamente 40 a 50% da laranja, com cerca de 80 a 85% de umidade. Este resíduo, após trituração, tratamento químico, prensagem, secagem e compactação (peletização), pode ser comercializado como complemento para ração animal. O aproveitamento desse resíduo é crucial economicamente, visando a utilização integral da laranja, além de ser relevante ambientalmente, evitando o descarte no meio ambiente e prevenindo problemas de poluição.

Durante a prensagem do resíduo sólido, um extrato líquido é produzido, contendo uma quantidade significativa de sólidos dissolvidos. Após concentração, esse extrato pode ser reincorporado ao material sólido antes da secagem, submetido a um processo fermentativo para produção de álcool, ou comercializado como melaço de alto teor de sólidos solúveis. Na concentração desse extrato por evaporação, óleos contendo terpenos são separados, os quais podem ser recuperados para a produção de d-limoneno, amplamente utilizado como solvente industrial e em diversas aplicações, como na fabricação de óleos aromáticos, resinas e adesivos.

A preparação do resíduo sólido para secagem envolve a redução de tamanho em moinho de martelo, alcalinização com óxido de cálcio (CaO) para neutralizar a acidez e promover a desesterificação da pectina. O controle rigoroso da adição de álcali é essencial para facilitar a remoção da água nas etapas subsequentes e evitar excesso que prejudicaria o processo. A adição de melaço concentrado ao resíduo sólido durante a alcalinização melhora a homogeneidade do produto e reduz os custos operacionais.

O resíduo sólido transformado, contendo 80 a 85% de umidade, é prensado para a separação do líquido residual, resultando em uma torta prensada com aproximadamente 60 a 70% de umidade, a qual é alimentada ao secador. O líquido residual, rico em sólidos solúveis, é readicionado ao resíduo sólido após a concentração. A secagem é realizada em um secador de cilindro rotativo horizontal, com temperatura controlada para preservar a qualidade do produto, que, por sua vez, pode ser compactado em pequenos cilindros (pellets) extrusados para uso em rações animais.

O processo de compactação visa aumentar o peso específico, facilitar o manuseio, transporte e armazenamento, reduzir a quantidade de pó, prevenir riscos de incêndio e explosão, além de melhorar a digestibilidade do produto. A unidade compactadora, ou peletizadora, utiliza rolos compressores para formar pellets sem a necessidade de agentes aglomerantes adicionais, apenas com o calor gerado pelo atrito e posterior resfriamento natural, atingindo-se teores de umidade adequados à conservação do produto (Odio, 1993; Johnston, 1995).

3.3.5. Extrato líquido residual da prensagem do bagaço: melaço e d-limoneno

O extrato líquido residual proveniente da prensagem do resíduo sólido da laranja, composto por casca, membranas, bagaço, polpa descartada e sementes, contém sólidos dissolvidos (aproximadamente 8 a 15%), predominantemente constituídos por carboidratos e óleos (cerca de 0,1 a 0,5%), os quais podem ser aproveitados mediante tratamento, separação, destilação e concentração. Este processo resulta em dois principais subprodutos (além da possibilidade de produção de biogás, como será discutido posteriormente): i) melaço, rico em carboidratos, que pode ser reintegrado ao resíduo sólido para a obtenção de farelo de polpa cítrica

peletizada ou utilizado como substrato fermentescível para a produção de álcool ; ii) d-limoneno, um composto terpenoide originado da casca da laranja, comercializável em sua forma bruta ou após refinamento, purificação e outros tratamentos adicionais, com aplicações diversas, incluindo uso como solvente industrial, resina adesiva e aromatizante.

O aproveitamento desses subprodutos, além dos benefícios econômicos associados à sua comercialização, é crucial devido ao elevado conteúdo poluente representado pela alta concentração de açúcares e óleos presentes na casca. Cuidados adicionais devem ser tomados devido à concentração de açúcares e à presença de microrganismos contaminantes, exigindo um manuseio adequado, processamento rápido e sanitização das instalações, tanques e tubulações.

O extrato líquido residual, também conhecido como *press-liquor*, é composto principalmente por açúcares simples (glicose, frutose e sacarose) e óleos essenciais, com pequenas frações de pectina, proteínas e ácidos orgânicos. A concentração desse líquido ocorre em evaporadores similares aos utilizados para o suco de laranja, empregando um sistema de múltiplos efeitos e estágios, com alimentação em fluxo concorrente. Os gases de exaustão do secador de torta de bagaço prensado são utilizados como meio de aquecimento nos evaporadores para aumentar a eficiência energética do sistema, mas requerem processo de separação para redução de emissões de particulados antes da descarga para a atmosfera.

O líquido alimentado ao evaporador passa por peneiras para a separação de partículas finas de bagaço, evitando o aumento da viscosidade e a formação de depósitos nas paredes dos tubos do equipamento, sendo também crucial controlar a adição de óxido de cálcio (cal) no tratamento do bagaço para minimizar a incrustação. No início da operação, o líquido pode conter aproximadamente de 8 a 10% de sólidos solúveis, elevando este teor para 40 a 50% no melaço concentrado e reincorporando-se ao resíduo sólido antes da prensagem. Com a estabilização do sistema, a concentração do extrato líquido residual aumenta para cerca de 15 a 20% de sólidos solúveis, reduzindo a umidade da torta que alimenta o secador. O rendimento e eficiência do evaporador dependem principalmente do controle da alimentação líquida, em termos de vazão e teor de sólidos, bem como do controle dos gases de exaustão do secador.

O condensado formado a partir da condensação dos vapores presentes nos gases de exaustão, utilizados como meio de aquecimento no evaporador, é um resíduo líquido com alta acidez e deve ser neutralizado e submetido a tratamento adicional para reduzir a carga poluente. Seu uso em solos agriculturáveis tem sido relatado com sucesso (Rebeck & Cook, 1977; Cohn & Cohn, 1996; Braddock, 1999).

Outro subproduto gerado durante a concentração do extrato líquido residual é o d-limoneno, um componente do óleo essencial presente nas vesículas da casca da laranja, o qual é destilado durante o processo de evaporação e pode ser recuperado a partir da condensação dos vapores no topo do evaporador. A emulsão formada pela água evaporada e o óleo pode ser separada em tanques com defletores, facilitando a separação por decantação das fases oleosa e aquosa. O d-limoneno, principal componente da fase oleosa, é recuperado, enquanto o líquido aquoso restante é direcionado ao tratamento de efluentes líquidos. É importante ressaltar que uma parte significativa do d-limoneno também é recuperada durante a extração dos óleos essenciais da casca, realizada concomitantemente com a extração do suco, e durante a operação de concentração do suco, conforme descrito anteriormente.

3.4. Produção de bioprodutos a partir dos resíduos

Considerando a situação atual da indústria sob análise, diversas soluções inovadoras e lucrativas foram propostas para a recuperação de subprodutos do processamento de cítricos, visando a geração de produtos com valor agregado, conforme descrito por Rezzadori, Benedetti e Amante (2012). Essas soluções focam na obtenção de um sistema integrado para a produção de bioetanol, biogás e d-limoneno. Em seções subsequentes será discutida a implementação desse sistema integrado, bem como abordagens individuais para a produção de d-limoneno.

3.4.1. Minigeração integrada bioetanol, biogás e d-limoneno

O etanol, especialmente difundido no Brasil, apresenta um grande potencial de crescimento no mercado, impulsionado por questões ambientais (JUNIOR *et al.*, 2019). Quando produzido a partir de fontes de celulose como a biomassa, é conhecido como bioetanol, amplamente utilizado em motores a combustão na forma hidratada ou misturado à gasolina na forma anidra. Um diferencial significativo do bioetanol é

sua origem renovável e de baixo custo, além de suas propriedades físico-químicas favoráveis, como o alto calor latente de vaporização (904 kJ/kg, comparado a 350 kJ/kg da gasolina) e a capacidade de reduzir emissões de NO_x durante a combustão (XU *et al.*, 2020).

O biogás é uma fonte valiosa de energia renovável, composta principalmente por metano e dióxido de carbono, gerados pela decomposição anaeróbica de matéria orgânica (Manesh; Rezadeh; Kabiri, 2020). Este substitui os combustíveis fósseis, proporcionando uma queima mais limpa e reduzindo a emissão de gases de efeito estufa (Yang; Zhanh; Li, 2012). Além de ser produzido continuamente, o biogás pode ser armazenado a baixo custo, tanto na forma de matéria-prima quanto como gás comprimido (MILANEZ *et al.*, 2018).

A produção de biogás ocorre predominantemente pela digestão anaeróbica de material orgânico em reatores controlados, resultando em biogás com 50% a 70% de metano. Alternativamente, a gaseificação termoquímica, que ocorre a altas temperaturas com adição de calor e oxigênio, é uma técnica promissora, embora ainda esteja em estágios iniciais de pesquisa (MILANEZ *et al.*, 2018).

A participação do biogás na matriz energética brasileira tem crescido significativamente. Em 2010, sua produção representava 0,01% (15 mil tep de um total de 269 milhões tep), aumentando para 0,05% em 2016 (137 mil tep de um total de 288 milhões tep), com um desenvolvimento contínuo previsto para os próximos anos, visando se tornar uma das principais fontes de energia renovável (MILANEZ *et al.*, 2018).

O limoneno, um componente-chave presente nas frutas cítricas, possui diversas aplicações, incluindo o uso em óleos essenciais, cosméticos, detergentes e alimentos como agente aromático (FENG *et al.*, 2020). Suas propriedades pesticidas e antibacterianas exigem sua remoção durante processos de bioconversão, visando evitar a inibição do crescimento de microrganismos digestores (Ozturk; Winterburn; Gonzalez-Miquel, 2019).

Pourbafrani *et al.* (2010) propuseram um processo integrado de produção de bioetanol, biogás e limoneno, conforme descrito a seguir. Inicialmente, ocorre a hidrólise ácida da biomassa com a remoção do limoneno. A parte sólida resultante é

encaminhada para digestores anaeróbicos para a produção de biogás, enquanto a parte líquida segue para fermentação e destilação para produzir bioetanol. Este processo pode produzir cerca de 39,64 L de bioetanol, 45 m³ de biogás e 8,9 L de limoneno por tonelada de resíduo processado. A simplicidade e o baixo custo do processo quando utilizada biomassa proveniente do processamento da laranja, apresentam vantagens em comparação com outros processos baseados em materiais lignocelulósicos.

3.4.2. Processo de obtenção do bioetanol

Diante do aumento previsto na demanda por etanol como combustível no Brasil, é essencial buscar alternativas sustentáveis para a produção de bioetanol. A biorrefinaria surge como uma solução promissora, aproveitando resíduos agroindustriais, como os gerados na produção de suco de laranja, para a produção de bioetanol, biogás e d-limoneno.

De acordo com Andrade Junior *et al.* (2019), a demanda por etanol no Brasil pode alcançar entre 37,4 e 70,7 bilhões de litros até 2030, representando um aumento significativo em relação à produção de 2018. Isso indica a necessidade de expansão da área de cultivo de cana-de-açúcar entre 1,2 e 5 milhões de hectares. Alternativas tecnológicas, como o aproveitamento de resíduos agroindustriais, tornam-se essenciais neste cenário. Oliveira (2016) destaca que biorrefinarias são unidades que processam biomassa para produzir biocombustíveis, bioprodutos e energia, aproveitando integralmente a biomassa e agregando valor à cadeia agroindustrial.

A produção de bioetanol a partir de biomassa lignocelulósica, como o bagaço de laranja, envolve três etapas principais: pré-tratamento, hidrólise e fermentação. A composição química dos materiais lignocelulósicos é um fator crítico que impacta diretamente na produção de biocombustíveis (Carvalho, 2018). O pré-tratamento visa separar a lignina, solubilizar a hemicelulose e reduzir a cristalinidade da celulose, facilitando a hidrólise subsequente. Processos convencionais incluem tratamento hidrotérmico, ácido, base, explosão a vapor e tratamentos mecânicos, como moinhos de martelo (Cypriano, 2015).

Após o pré-tratamento, é necessária a conversão dos polissacarídeos em açúcares simples, processo conhecido como sacarificação. Métodos comuns incluem hidrólise ácida e enzimática. A hidrólise ácida envolve a exposição da biomassa a

ácidos concentrados ou diluídos, liberando monossacarídeos (Awan, 2013). Por outro lado, a hidrólise enzimática, que está ganhando popularidade, utiliza enzimas para converter celulose e hemicelulose em açúcares fermentescíveis, oferecendo vantagens como condições de processo mais brandas e menores problemas de corrosão. No entanto, esse processo pode ser demorado e dispendioso devido ao alto custo das enzimas (Purwadi; Brandberg; Taherzadeh, 2007), com estudos indicando que o custo das enzimas pode representar até 48% do custo operacional total do processo (CHEN *et al.*, 2019).

Os açúcares resultantes da hidrólise são então fermentados por micro-organismos, como leveduras e bactérias, para produzir bioetanol. Organismos comuns incluem *Saccharomyces cerevisiae* e *Escherichia coli* (Hillyer, 2012). Alternativamente, a fermentação pode ser realizada simultaneamente com a sacarificação em um processo conhecido como SSF (sacarificação e fermentação simultâneas), aumentando a eficiência geral do processo.

A abordagem proposta maximiza o aproveitamento dos resíduos cítricos, contribuindo para a sustentabilidade da produção de biocombustíveis, com alinhamento às crescentes demandas por etanol da frota da própria empresa, reduzindo o gasto com combustíveis, bem como a responsabilidade ambiental envolvida.

3.4.3. Processo de obtenção de biogás

A produção de biogás a partir de resíduos cítricos é uma alternativa promissora no contexto das biorrefinarias, contribuindo significativamente para a gestão sustentável de resíduos agroindustriais. A digestão anaeróbia, uma tecnologia amplamente utilizada para a conversão de matéria orgânica em biogás, o qual é composto principalmente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), sendo este o objetivo principal deste processo. Este método oferece uma solução eficaz para a gestão de resíduos e a produção de energia renovável, contribuindo para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2014).

Os resíduos cítricos, como cascas, polpas e bagaços de laranja, são ricos em compostos orgânicos que podem ser convertidos eficientemente em biogás. Estes

resíduos contêm uma quantidade significativa de carboidratos, incluindo celulose, hemicelulose e pectina, que são substratos ideais para a digestão anaeróbia (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2000). A composição química dos resíduos cítricos pode variar, mas, geralmente inclui cerca de 85-90% de água, 5-10% de açúcares solúveis e 1-5% de fibra (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2014).

O processo de digestão anaeróbia envolve quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na hidrólise, macromoléculas complexas como carboidratos, proteínas e lipídios são quebradas em compostos mais simples (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos) por meio da ação de enzimas hidrolíticas. Os produtos da hidrólise são então convertidos na etapa da acidogênese em ácidos orgânicos voláteis, álcool, dióxido de carbono, hidrogênio e amônia pela ação das bactérias acidogênicas. Na acetogênese, os ácidos orgânicos voláteis são transformados em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono pelas bactérias acetogênicas. Finalmente, na metanogênese, os produtos da acetogênese são convertidos em metano e dióxido de carbono por arqueas metanogênicas.

A produção de biogás a partir de resíduos cítricos pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a composição do resíduo, a carga orgânica, o tempo de retenção hidráulica, a temperatura e o pH do reator anaeróbio (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2000). No entanto, a digestão anaeróbia de resíduos cítricos apresenta alguns desafios, como a presença de compostos inibidores, incluindo limoneno, um monoterpene que pode ser tóxico aos microrganismos envolvidos. Métodos como a remoção prévia do limoneno ou a diluição do substrato podem ser empregados para atenuar esses efeitos inibitórios (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2014). Além disso, a co-digestão de resíduos cítricos com outros resíduos orgânicos, como esterco animal ou resíduos de cozinha, pode melhorar a eficiência do processo de digestão anaeróbia, permitindo um melhor equilíbrio de nutrientes e aumentando a produção de biogás (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2014).

3.4.4. Processo de obtenção de d-limoneno

A produção de limoneno a partir de resíduos cítricos representa uma oportunidade valiosa para agregar valor aos subprodutos da indústria de sucos. O limoneno, um monoterpene encontrado nas cascas de frutas cítricas, possui amplas aplicações industriais, incluindo o uso como solvente, fragrância em produtos de limpeza e cosméticos, além de precursor para a síntese de compostos químicos (BOCCO *et al.*, 1998).

Os resíduos da produção de suco de laranja, compostos principalmente por cascas, polpas e sementes, contêm uma quantidade significativa de limoneno, particularmente nas cascas. A extração do limoneno desses resíduos pode ser realizada por diferentes métodos, sendo a destilação a vapor e a extração com solventes os mais comuns (Braddock, 1999).

Na destilação a vapor, as cascas de cítricos são submetidas a vapor de água, causando a liberação de óleos essenciais, incluindo o limoneno. O vapor carregado com óleos essenciais é então condensado e separado, resultando na coleta do limoneno. Esse processo é eficiente e amplamente utilizado na indústria devido à capacidade de processar grandes volumes de resíduos (Braddock, 1999).

Outra técnica comum é a extração com solventes, na qual os resíduos cítricos são tratados com solventes orgânicos como hexano ou éter de petróleo para solubilizar o limoneno. Após a extração, o solvente é removido por destilação, deixando o limoneno puro. Esse método é eficiente na extração de limoneno de alta pureza, mas pode apresentar desafios ambientais devido ao uso de solventes orgânicos (BOCCO *et al.*, 1998).

Além disso, há também a possibilidade de extração por prensagem a frio, na qual as cascas são prensadas mecanicamente para liberar o óleo essencial. Este método é mais sustentável e preserva melhor os componentes voláteis do limoneno, mas pode ser menos eficiente em termos de rendimento comparado aos métodos de destilação e extração com solventes (Braddock, 1999).

A implementação de uma unidade de extração de limoneno pode ser integrada a uma biorrefinaria, permitindo a valorização completa dos resíduos cítricos. A integração desses processos não só contribui para a sustentabilidade ambiental, mas, também agrega valor econômico, transformando resíduos em produtos de alto valor agregado (Braddock, 1999).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Caracterização da indústria estudada e fluxograma do processo atual de tratamento dos resíduos sólidos gerados

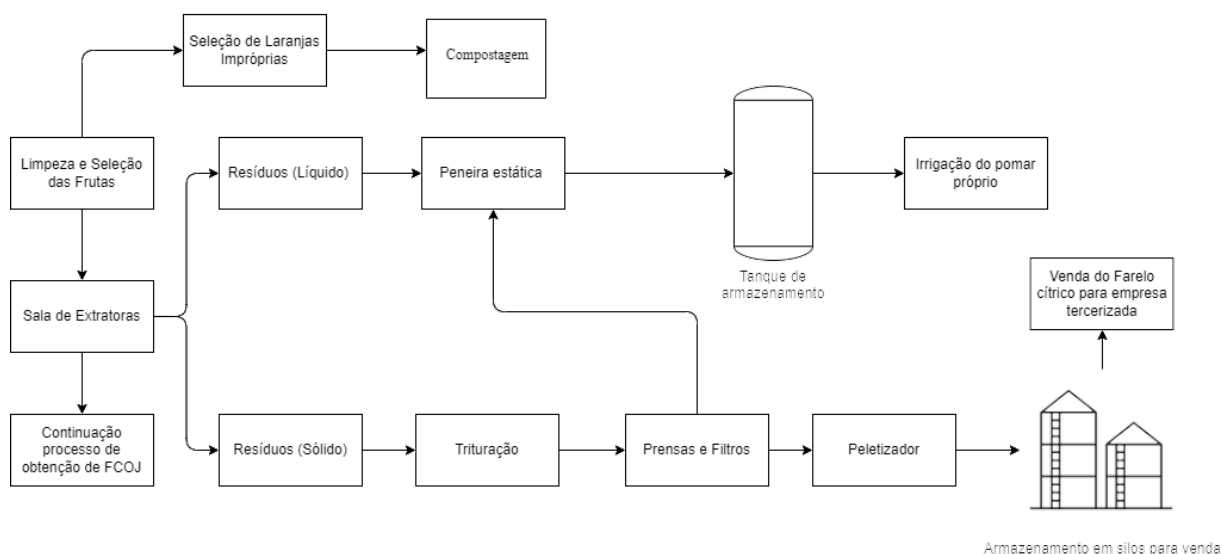
A indústria abordada para análise do potencial técnico e dos aspectos econômicos envolvidos, a fim de implementação do sistema de reaproveitamento dos resíduos do processo produtivo, foi escolhida de maneira estratégica.

Proximidade da mesorregião de Araraquara-SP, onde há uma concentração dos processos produtivos que envolvem a cultura da laranja e de seus derivados, além da pequena capacidade produtiva, que caracteriza o objetivo do trabalho ao se tratar de indústrias de pequeno porte. A capacidade produtiva será extremamente decisória utilizando a metodologia aplicada para saber se a implementação de uma mini usina centralizada será tecnicamente e economicamente viável, ou um reaproveitamento isolado para obtenção de subprodutos seja recomendado.

Atualmente a empresa conta com um potencial produtivo de 8 toneladas diárias, porém, há em estudo corrente uma ampliação da planta fabril para 12 toneladas em 2026 ou 16 toneladas em 2028, sendo que apenas uma ampliação será escolhida pelo gestor. Segundo a CETESB (2005), os resíduos da produção de suco FCOJ pode chegar a até 50% da capacidade de processamento diário da planta, números que foram confirmados pela equipe de projetos e engenharia da indústria analisada.

Dos resíduos que atualmente são gerados na planta objeto de estudo, avalia-se que o tratamento dos mesmos é feito ainda de maneira bem simples em relação àqueles em indústrias de médio e grande porte. Atualmente a indústria estudada trata o resíduo sólido decorrente do descarte das frutas impróprias para processamento, encaminhando-os diretamente para a compostagem, cujo produto resultante é utilizado para uso próprio na planta como adubo em uma horta para produção de vegetais que são consumidos pelos colaboradores. Após o processo de extração, os resíduos sólidos são levados para trituração, passa por um processo de prensagem e filtragem, produzindo resíduos líquidos, que são enviados conjuntamente a um tanque que antecede a peneiração estática. Após essa etapa, os compósitos resultantes são peletizados e armazenados em um galpão para que uma terceira empresa faça a retirada semanalmente, como pode ser visualizado no fluxograma Figura 6 a seguir.

Figura 6 - Fluxograma atual do processo de tratamento dos resíduos gerados



Fonte: Elaboração própria por meio de coletas de campo

Com relação aos resíduos líquidos gerados no processo de extração, estes são encaminhados diretamente para o tanque de peneiração estática, onde é somado ao residual da prensagem e filtragem do resíduo sólido. Após a peneiração estática que é responsável por reter sólidos com pequena dimensão (0,25 a 3mm) que não foram retidos no processo de filtragem. Após essa etapa, o líquido residual é enviado para um silo de armazenamento, do qual é utilizado pela própria indústria para irrigação do pomar gerador da matéria-prima de utilização.

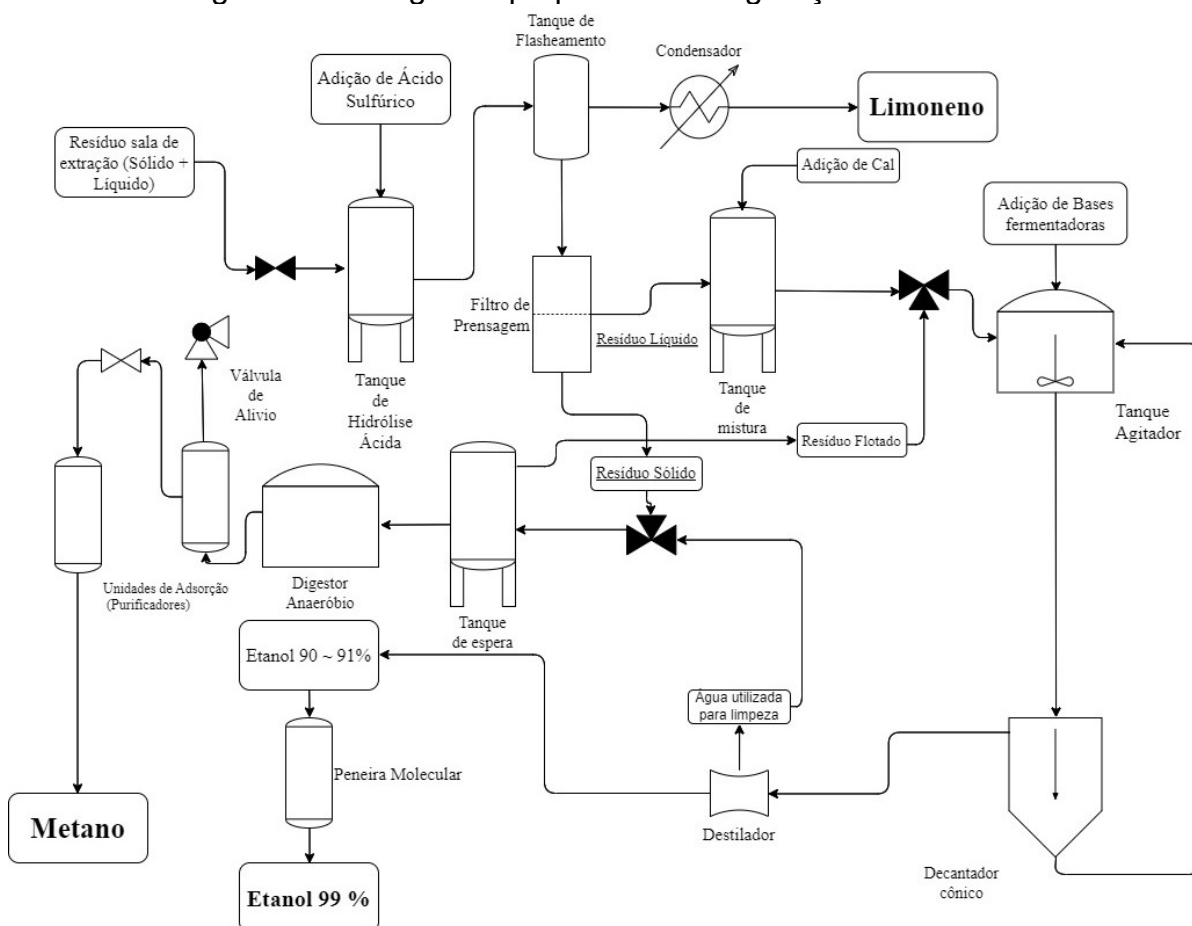
4.2. Métodos propostos para tratamento dos resíduos

A crescente demanda por soluções sustentáveis na gestão de resíduos agroindustriais impulsiona a busca por processos inovadores e eficientes. Neste contexto, propomos a implementação de um sistema integrado de minigeração para a produção de bioetanol, biogás e d-limoneno a partir dos resíduos gerados na indústria cítrica. A proposta visa não apenas a redução do impacto ambiental associado ao descarte inadequado desses resíduos, mas também a geração de produtos de valor agregado, contribuindo para a economia circular e a sustentabilidade do setor.

A Figura 7 apresenta um fluxograma esquemático da proposta de intervenção centralizada, onde são detalhados os principais processos e operações unitárias envolvidas na conversão dos resíduos cítricos em bioetanol, biogás e D-limoneno. O processo é projetado para maximizar a eficiência da conversão, integrando etapas de hidrólise ácida, fermentação, destilação e digestão anaeróbia, conforme descrito na figura.

Além da abordagem centralizada, a proposta inclui a possibilidade de produção isolada de d-limoneno, um valioso terpeno com ampla aplicação na indústria química, farmacêutica e de fragrâncias. A produção isolada de d-limoneno pode ser viabilizada por meio de técnicas de extração específicas, que permitem a obtenção de um produto de alta pureza diretamente dos resíduos cítricos.

Figura 7 - Fluxograma proposto de minigeração centralizada



Fonte: Elaboração própria a partir de POURBAFRANI (2010)

A seguir cada etapa e cada processo dessa minigeração será discutido brevemente, mostrando o potencial e os aspectos do processo de produção, bem como os desafios e as rentabilidades.

4.2.1. Resultados teóricos esperados com a biorrefinaria

Baseando-se em uma vasta literatura sobre o tema, inicia-se com algumas análises feitas por Alisaraei *et al.* (2017), os quais reportam vários estudos que tratam da etapa de hidrólise para a produção de etanol a partir de resíduos cítricos. Na hidrólise enzimática, a conversão em açúcares fermentescíveis foi de aproximadamente 90% para diversos resíduos de frutas utilizados como matérias-primas após 48 horas, resultando em concentrações de etanol entre 14,4 e 29,5 g/L, correspondentes a rendimentos entre 90,2 e 93,1%. Com a hidrólise ácida, utilizando ácido diluído a 150 °C e um tempo de reação de 6 minutos (condição otimizada), obteve-se um rendimento em açúcares fermentescíveis de 0,41 g/g de resíduo seco total, que foram convertidos em etanol com um rendimento de 0,43 g/g, totalizando uma produção de 39,64 litros de etanol por tonelada de resíduo cítrico com 20% de umidade em peso seco (POURBAFRANI *et al.*, 2010).

A vinhaça e o material sólido resultante da hidrólise podem ser digeridos anaerobicamente para a obtenção de biogás. Segundo Pourbafrani *et al.* (2010), uma tonelada de resíduo cítrico com 20% em peso seco resulta em aproximadamente 45 m³ de biogás. O limoneno, composto encontrado nas cascas dos cítricos, atua como inibidor da fermentação, reduzindo a conversão dos açúcares fermentescíveis em etanol. Para uma fermentação eficiente, o limoneno nos resíduos das cascas dos cítricos deve estar a concentrações abaixo de 3.000 partes por milhão (ppm), preferencialmente em níveis inferiores a 1.500 ppm (Hillyer, 2012), sendo, por isso, extraído antes da fermentação.

Devido aos rendimentos apresentados e à complexidade envolvida em plantas que operam com hidrólise enzimática, além do custo das enzimas, optou-se neste trabalho por um processo baseado nas etapas de pré-tratamento ácido, hidrólise ácida e fermentação, com remoção de limoneno antes da fermentação.

O pré-tratamento ácido é mais efetivo em relação à remoção da parcela de celulose da biomassa lignocelulósica e consiste na adição de 1% (v/v) de ácido sulfúrico à biomassa em um reator por 90 minutos a uma temperatura de 120 °C, conforme estudos para a biomassa de cana-de-açúcar relatados por Nicola (2017). Os resíduos cítricos pré-tratados são então submetidos à hidrólise com 0,5% (v/v) de ácido sulfúrico (98%) a 150 °C por 6 minutos. O hidrolisado é descarregado em um tanque de expansão (flash) à pressão atmosférica para resfriamento e separação de sólidos e componentes não voláteis dos componentes voláteis que saem como produto da corrente de vapor (POURBAFRANI *et al.*, 2010).

A partir dessa etapa, todo o processo foi baseado no estudo realizado por Lohrasbi *et al.* (2010), no qual se propõe um processo para obtenção de bioetanol, limoneno e biogás a partir de resíduos cítricos, utilizando como base de cálculo uma biorrefinaria com operação anual de 8.000 horas (333, 33 dias) e capacidade anual de processamento de 100.000 toneladas de resíduo. Os vapores que saem do vaso de expansão arrastam quase 99% do limoneno presente no resíduo, reduzindo sua concentração no hidrolisado para 0,004% (v/v). O resíduo não volátil vai para um filtro-prensa, que separa os resíduos sólidos do hidrolisado. Os sólidos são lavados com água reciclada da destilação, resultando em uma recuperação de aproximadamente 96% dos açúcares fermentescíveis presentes no material sólido. O sobrenadante do hidrolisado é neutralizado com cal em um recipiente de mistura e, em seguida, alimentado ao biorreator onde ocorre a fermentação.

O biorreator, do tipo agitado mecanicamente, opera com um tempo de residência de 20 horas, temperatura de 30 °C e pH 5,0. Introduce-se óleo de milho a 0,5% (p/p) no biorreator como agente antiespumante para evitar a formação excessiva de espuma, a qual poderia comprometer o rendimento da etapa. Cerca de 95% dos açúcares fermentescíveis, incluindo glicose, frutose e galactose são convertidos em etanol. Além de etanol, há resíduos de arabinose, hexoses e pectina em concentrações de 2,5%, 0,5%, 0,3% e 3,1% (p/p), respectivamente. O efluente do fermentador é depositado em um decantador em formato de cone, com tempo de residência de 30 minutos, o qual possui duas saídas: uma corrente de fundo, de ciclo das leveduras para o biorreator e uma corrente de topo, clarificada que alimenta as duas colunas de destilação.

O etanol deixa o sistema de destilação a 91% (p/p) na forma de vapor sendo posteriormente purificado até 99,9% (p/p) em um sistema de desidratação por peneira molecular. Os resíduos sólidos dos hidrolisados, precipitados após lavagem com a água de saída do sistema de destilação, são alimentados aos digestores anaeróbicos, onde ocorre a produção de biogás com composição de 41% de metano e 50% de CO₂ (POURBAFRANI *et al.*, 2010). Para a purificação do gás resultante, este é alimentado a uma unidade de adsorção com tecnologia de pressão modulada, sistema "PSA" (*Pressure Swing Adsorption*), obtendo-se um gás de saída com grau de pureza de 98% em metano.

As etapas descritas são baseadas em processos otimizados para escalas industriais de grande porte. Para indústrias de pequeno porte do tipo que está sendo analisada, é fundamental considerar adaptações para reduzir custos e complexidade operacional. A hidrólise ácida, por exemplo, pode ser uma alternativa viável devido ao menor custo em comparação com a hidrólise enzimática. A extração e purificação de limoneno antes da fermentação também são etapas essenciais para a garantia da eficiência do processo fermentativo. A utilização de tecnologias como a pressão modulada (PSA) para a purificação do biogás pode ser ajustada para operações em menor escala, garantindo um produto final de alta qualidade.

4.3. Metodologia para determinação da viabilidade financeira

Para ser feita a análise de viabilidade econômica da implementação de biorrefinaria para obtenção dos três subprodutos foram considerados alguns conceitos da literatura que leva em consideração o investimento feito, custos de operação, impostos e os potenciais retornos financeiros estimados também usando dados de outros autores.

Além das estimativas de despesas, investimentos e receita, conceitos de elaboração de demonstrativos de análises contábeis serão abordados para que ao final seja possível analisar a viabilidade da implementação de biorrefinaria ou mesmo o tratamento dos resíduos apenas para produção de d-limoneno de maneira paralela à usina, que se espera ser mais apropriado para indústrias de pequeno porte dado o conhecimento dos gestores da planta e o que é observado em outras plantas de capacidade de processamento semelhante.

4.3.1. Investimentos estimados para instalação

Para estimar o quanto seria investido, alguns conceitos observados na literatura foram associados às expectativas e à viabilidade de investimento da própria indústria. Como o projeto de expansão da planta é iminente, o valor máximo que poderia ser envolvido na implementação da biorrefinaria foi abaixo do que imaginado antes das reuniões realizadas com os gestores e equipe de projeto.

Investimentos iniciais se mostram complicados quando se refere a plantas industriais devido à volatilidade dos requisitos necessários, uns podem ser facilmente manipulados, outros são tidos como inesperados durante as fases de construção.

Na literatura, Towler e Sinott (2013) apresentam alguns conceitos que podem colaborar nas estimativas, tais como:

- ISBL: nessa variável é abordado o custo de instalação de toda a unidade de processo, bem como instrumentos, alvenarias e tudo que pode impactar diretamente a instalação da biorrefinaria, sendo considerado o custo básico da implementação do processo;
- OSBL: são custos secundários, que se mostram necessários para realização de atividades correlatas ao processo, sendo eles: laboratórios, vestiários, escritórios administrativos, entre outros que são considerados em alguns casos, variando a necessidade de acordo com a estrutura da indústria a receber a nova planta;
- Custos de Engenharia: nessa parte da estimativa considera-se também custo com engenharia, arquitetura e podendo ser considerada a contratação de uma empresa terceira para que faça a gestão eficiente da implementação;
- Custos extras: neste item são considerados valores extras para possíveis lidar com possíveis extrapolações e problemas inesperados que não foram considerados em itens anteriores.

Logo, pela literatura, é possível estimar com certo grau de precisão o investimento de capital que essa indústria teria que fazer, segundo Towler e Sinott (2013), utilizando a Equação (1):

$$Cp = Cr * \left(\frac{Sp}{Sr}\right)^{\eta} * FL * IC \quad (1)$$

Na Equação (1), Cp é o investimento preliminar que será necessário considerando a capacidade de processamento Sp , Cr é o investimento de referência utilizado por uma planta com capacidade semelhante em outro local que possui capacidade de processamento Sr de referência, η é o fator de extrapolação que tem função de representar a economia de escala, FL é o fator de localização, que faz com que haja correção de custo e investimentos dadas diferentes localizações, evitando incompatibilidades nos cálculos. Outro fator considerado foi o CEPCI - 2023 calculado pela Universidade de Manchester.

Towler e Sinott (2013) apresenta a Equação (2), na qual são descritas empiricamente as componentes do investimento fixo (IF)

$$IF = (ISBL) + (OSBL) + (CUSTOS ENGENHARIA) + (CUSTOS EXTRAS) \quad (2)$$

Segundo estes autores, o OSBL pode ser calculado como 40% do valor do ISBL, porém, como as instalações da planta de estudo têm bom porte e boa estrutura, esse valor foi reduzido consensualmente para 20% do valor ISBL. De forma semelhante, os custos de Engenharia foram considerados como 20% do valor ISBL, assim como os custos extras, foram estimados em 10% do valor ISBL.

Além desses custos para investimento, a equipe financeira da planta estudada, sugeriu um capital de giro de 15% sobre o valor investido no último ano de instalação da biorrefinaria a fim de manter a rotatividade do processo caso houvesse viabilidade de implementação.

4.3.2. Custos fixos estimados para produção

A determinação do investimento de capital necessário para a construção de uma planta industrial é apenas uma das etapas do estudo de viabilidade econômica a ser realizada. Outro passo igualmente crucial consiste na determinação dos custos totais para operar a planta e comercializar os produtos. Essa fase do estudo é essencial para determinar a lucratividade de um projeto. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo estimar o custo total de produção, dividindo-o em custos variáveis e custos fixos de produção, os quais serão discutidos detalhadamente a seguir.

Os custos fixos de produção incluem despesas recorrentes, independentemente da quantidade produzida pela planta. Entre esses custos estão os de mão de obra, manutenção, despesas gerais de seguros e taxas.

O custo de mão de obra refere-se ao custo total de todos os colaboradores envolvidos no negócio, sendo um dos custos operacionais mais significativos. Isso inclui salários e benefícios pagos aos operadores e funcionários da planta. Em fábricas que operam em regime de turnos, cada turno consiste em oito horas de trabalho para garantir a operação contínua. Os gerentes e engenheiros, que geralmente trabalham em horário comercial, supervisionam as operações em várias instalações, e, contabilmente, uma fração de seu tempo é dedicada a cada unidade específica. Assim, para calcular o custo total da mão de obra por turnos, é prático representar a supervisão por uma porcentagem fixa dos salários dos operadores de turnos, sendo adotada uma taxa de 25% (Chauvel; Fournier; Raimbault, 2003). Para a planta estudada não foi necessário implementar uma nova supervisão, pois os novos colaboradores que seriam deslocados para a biorrefinaria ficariam sob mesma supervisão dos operadores de produção.

Os custos de manutenção estão relacionados às atividades necessárias para prolongar a integridade da planta industrial e seus equipamentos, independentemente da escala de produção. Isso inclui tanto a aquisição de peças e/ou equipamentos de reposição quanto a mão de obra especializada para realizar as atividades de manutenção. Estas atividades podem ser planejadas, como na manutenção preventiva durante paradas programadas ou emergenciais (como na manutenção corretiva devido a falhas de operação). Chauvel *et al.* (2003) afirmam que esses

custos são comparáveis aos valores investidos na construção da unidade, sendo vistos como uma renovação do investimento nas unidades de produção. Towler e Sinnott (2013) recomendam que as estimativas para custos de manutenção sejam calculadas como uma fração do ISBL, representando 5% do mesmo em indústrias que lidam com sólidos ou grandes equipamentos mecânicos. Porém a sugestão dos gestores para os três possíveis cenários, 2024, 2026 e 2028 é que seja diminuído 1,5% do custo anual com manutenção, pois é de perspectiva da empresa ações de cultura e governança para que haja um monitoramento mais eficaz dos equipamentos, reduzindo os custos inesperados com manutenção.

As despesas operacionais incluem custos associados aos componentes não-produtivos da indústria e outras atividades auxiliares, abrangendo principalmente gastos com pesquisa e desenvolvimento, comercialização e despesas administrativas. Os gastos com pesquisa e desenvolvimento englobam todas as atividades relacionadas ao desenvolvimento de novas tecnologias, processos e produtos, variando significativamente de acordo com o setor industrial. Para empresas de combustíveis e petroquímicos, essa parcela pode ser inferior a 1% da receita, enquanto em empresas farmacêuticas e biotecnológicas, pode chegar a 15% (TOWLER; SINNOTT, 2013).

Os custos de comercialização envolvem gastos com propaganda, estudos e pesquisas de mercado, pagamento ao setor de vendas, entre outros. Em indústrias de commodities, esses custos são desprezíveis (TOWLER; SINNOTT, 2013). Finalmente, as despesas administrativas abrangem gastos relacionados aos setores administrativos da empresa, incluindo recursos humanos, compras, qualidade, meio-ambiente e segurança. Em indústrias menores, esses setores podem ser terceirizados, mantendo a proporção de gastos. Com base em Chauvel, Fournier e Rimbault (2003), o valor utilizado para estimar as despesas administrativas foi de 50% dos custos totais de mão de obra.

4.3.3. Custos variáveis estimados para produção e impostos

Os custos variáveis de produção são despesas diretamente ligadas à produção, que variam proporcionalmente à escala de operação da planta e à quantidade produzida. Estes custos incluem todos os insumos consumidos durante a produção, como os custos de utilidades e os custos com consumíveis.

Em uma planta industrial, as utilidades referem-se a serviços auxiliares necessários para qualquer tipo de processo produtivo. Entre eles, podem-se listar o consumo de energia elétrica, fluidos para aquecimento ou resfriamento de correntes de processo, água de processo e ar comprimido. As utilidades podem ser produzidas no próprio local da planta, com custos definidos pelas despesas de geração e transmissão dessas correntes, ou adquiridas de terceiros, com valores estabelecidos por contrato. O custo de utilidades varia de acordo com a quantidade consumida, o local e a existência ou não de incentivos. Estimar esse custo é mais complexo do que estimar o custo de matéria-prima, pois requer a definição do balanço material e energético da unidade em questão. Contudo, segundo Towler e Sinnott (2013), os custos com utilidades raramente superam 15% do custo total de produção, sendo 7% um valor razoável para uma estimativa inicial conforme concordância dos gestores da planta. Os custos com consumíveis em plantas genéricas englobam principalmente gastos com produtos químicos, solventes e catalisadores. No caso do processo proposto, essas despesas se concentram no ácido sulfúrico utilizado na etapa de hidrólise ácida e nas leveduras utilizadas durante a etapa de fermentação. Towler e Sinnott (2013) sugerem uma estimativa inicial de 3% do custo total de produção para os custos com consumíveis. Assim, o custo total de produção pode ser escrito como a soma dos custos fixos com os custos com consumíveis e utilidades.

O imposto de renda sobre pessoa jurídica é aplicado a empresas brasileiras, com uma alíquota que pode chegar a 34% sobre o lucro real, dependendo da atividade e do porte do negócio. Essa alíquota compreende 15% do imposto de renda sobre o lucro apurado, 10% sobre a parcela do lucro que exceder R\$ 240.000 ao ano e 9% da contribuição social sobre o lucro líquido ajustado, conforme dados da Deloitte para 2020. Neste trabalho, considerou-se uma alíquota de 34% sobre os lucros apurados após a depreciação (EBIT) no DRE, dado o porte da planta proposta.

Os encargos de depreciação são deduções fiscais comuns usadas pelos governos como incentivo ao investimento. A depreciação é um encargo não monetário relatado como despesa, reduzindo a receita para efeitos fiscais sem representar uma saída de caixa. Caracteriza-se como a desvalorização de ativos ao longo dos anos, funcionando como uma reserva para reposição ou substituição de equipamentos.

Utilizou-se a metodologia de depreciação linear, considerando valor residual zero, visto que a operação da planta se dá além da vida útil depreciável, definida em 13 anos com base no horizonte de planejamento e cronograma de partida descritos anteriormente. A depreciação linear pode ser calculada pela Equação (3), na qual Cp é o investimento inicial fixo e n é o período de depreciação em anos:

$$D = \frac{Cp}{n} \quad (3)$$

4.4. Demonstrações financeiras, estimativas de receitas e indicadores de viabilidade

A análise financeira é um componente crucial para avaliar a viabilidade de qualquer projeto industrial. Neste item, serão apresentados os principais aspectos financeiros e os indicadores de viabilidade econômica para a implementação da biorrefinaria proposta e também a análise da comercialização do D-Limoneno obtido paralelamente junto a outras empresas. A análise abordará as demonstrações financeiras projetadas, incluindo resultados, balanços patrimoniais e fluxos de caixa, fornecendo uma visão clara da saúde financeira esperada do projeto. Além disso, serão discutidas as metodologias para estimar as receitas da biorrefinaria, considerando a capacidade de produção, os preços de mercado dos produtos finais e as variações de demanda, com base na literatura e decisões consensuais entre a equipe de projeto e a equipe financeira.

Para avaliação da viabilidade do projeto, serão calculados e interpretados diversos indicadores econômicos, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o *Payback* e o Índice de Lucratividade (IL), os quais constituem-se em critérios racionais para a tomada de decisões e atração de investidores. A análise de sensibilidade foi realizada para avaliar como variações em determinados parâmetros como custos de produção, preços de venda e taxas de desconto poderiam impactar a viabilidade financeira do projeto, auxiliando a identificar riscos financeiros e desenvolver estratégias de atenuação.

Este item foi essencial para garantir que todas as decisões tomadas ao longo do projeto fossem embasadas em dados financeiros robustos e análises detalhadas, assegurando a confiabilidade na análise de viabilidade e sustentabilidade do empreendimento.

4.4.1. Demonstrações contábeis

A instalação de uma biorrefinaria exige uma cuidadosa projeção das etapas de construção, inicialização da produção e o horizonte de operação. Um cronograma típico para a inicialização de uma planta, conforme descrito por Towler e Sinnott (2013), envolve três fases principais. No primeiro ano, realiza-se a Engenharia, o detalhamento do projeto e a fabricação de itens que possuem projetos mais longos, representando 30% do investimento fixo inicial. No segundo ano, ocorre a aquisição e a construção, correspondendo a 60% do investimento fixo inicial. Finalmente, no terceiro ano, completa-se a construção, com os 10% restantes do investimento. A produção inicia-se no terceiro ano, com uma capacidade correspondente a 30%. No quarto ano, a planta passa pela fase de adaptação da operação, operando a 70% da capacidade. A partir do quinto ano, a produção atinge sua capacidade plena.

Para projetos desse porte na Indústria Química, é comum adotar um horizonte de planejamento de 15 anos, que foi o período considerado neste projeto. Assim, ao se levar em conta os 2 anos necessários para a construção e o início da operação a partir do terceiro ano, temos um período de 13 anos para a depreciação da planta.

Com base nessas premissas e nos custos previamente descritos, foi possível construir os Demonstrativos de Resultado de Exercício (DRE) e estimar os fluxos de caixa. O DRE é um relatório financeiro fundamental que resume as receitas, custos e despesas durante um período específico, refletindo o desempenho financeiro da biorrefinaria. A projeção dos fluxos de caixa, por sua vez, é essencial para avaliar a viabilidade econômica do projeto, pois fornece uma visão detalhada das entradas e saídas de dinheiro ao longo do tempo.

A construção do DRE começa pela projeção das receitas de vendas, que depende da capacidade de produção da planta e dos preços de mercado dos produtos finais. Em seguida, os custos operacionais são estimados, incluindo custos fixos e variáveis, como mão de obra, manutenção, utilidades e consumíveis. A diferença entre as receitas e os custos resulta no lucro operacional antes dos impostos.

Além do DRE, é crucial projetar o fluxo de caixa descontado (FCD) para avaliar a viabilidade do projeto. O FCD considera as receitas e despesas ao longo do tempo, descontando-as a uma taxa que reflete o custo de oportunidade do capital. Esse método permite calcular indicadores financeiros como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), sendo fundamentais para a análise de viabilidade.

A depreciação dos ativos da planta, seguindo a metodologia linear, é outro aspecto importante. Considerando o valor residual zero, já que a operação geralmente se estende além da vida útil depreciável dos equipamentos, a depreciação é distribuída uniformemente ao longo dos 13 anos de operação.

Essas demonstrações financeiras e estimativas de fluxo de caixa constituem-se em critérios racionais para a análise de viabilidade econômica, permitindo avaliar se o investimento na biorrefinaria será rentável ou não ao longo do tempo. A abordagem metódica na projeção das receitas, custos e fluxos de caixa assegura uma análise robusta e confiável, fundamentando decisões estratégicas e atraindo possíveis investidores para o projeto.

Além do cronograma de construção e operação inicial, é importante considerar as previsões de expansão da planta, que podem ocorrer em 2026 ou 2028. Em 2026, a capacidade de produção da planta pode ser aumentada em 50%, e em 2028, pode ocorrer uma expansão adicional para dobrar a capacidade inicial, resultando em um aumento total de 100%.

Essas expansões representam investimentos adicionais e necessitam de novas projeções financeiras para avaliar o impacto na viabilidade econômica do projeto. A expansão em 2026, consistindo no aumento da capacidade em 50%, exigirá investimentos em infraestrutura, equipamentos e mão de obra adicionais. Este aumento de capacidade pode resultar em economias de escala, reduzindo o custo unitário de produção e aumentando a lucratividade.

A expansão planejada para 2028, que dobra a capacidade inicial, representa uma segunda fase de investimento significativo. A projeção dos fluxos de caixa precisará ser ajustada para incluir os custos adicionais de expansão e as receitas incrementais esperadas devido ao aumento da produção. Essa etapa de expansão pode consolidar a posição da biorrefinaria, permitindo um melhor aproveitamento das oportunidades de mercado e potencialmente aumentando a competitividade e a participação nele.

A análise das expansões deve incluir uma avaliação detalhada dos custos de capital, operacionais e de manutenção associados às novas capacidades. Além disso, será necessário considerar as mudanças nos mercados de insumos e produtos finais, bem como possíveis alterações nas condições econômicas e regulatórias.

A incorporação dessas expansões nas demonstrações financeiras e nas análises de fluxo de caixa fornecerá uma visão abrangente da viabilidade econômica a longo prazo do projeto, permitindo uma melhor tomada de decisão estratégica e planejamento financeiro robusto.

4.4.2. Estimativas de receitas

A estimativa de receitas para a biorrefinaria é um passo crucial para determinar a viabilidade econômica do projeto. Este item aborda a metodologia de projeção das receitas baseando-se nos rendimentos esperados dos produtos finais, em dados da literatura e considerando variáveis econômicas e de mercado.

Considerando que a biorrefinaria produzirá diversos produtos derivados de resíduos cítricos como biogás, bioetanol e outros subprodutos de valor agregado, é sabido que cada um desses produtos tem um mercado específico, com preços que podem variar conforme a demanda, a oferta e as condições econômicas globais.

4.4.3. Indicadores de viabilidade

Neste item, são apresentados os principais indicadores econômicos usados para avaliar a atratividade e a viabilidade econômica do projeto da biorrefinaria. Quando os investimentos e os fluxos de caixa são conhecidos, esses métodos fornecem uma análise preliminar útil, sendo amplamente empregados para a avaliação inicial de projetos e, em algumas empresas, para a triagem preliminar. Contudo, devido às muitas suposições simplificadoras adotadas, esses métodos não são adequados para uma análise detalhada (Towler & Sinott, 2013).

O *payback* é um dos indicadores mais simples, usado para estimar o tempo necessário para recuperar o investimento inicial. Neste trabalho, utilizou-se a metodologia de *payback* descontado, a qual considera o custo de oportunidade do capital da empresa, sendo este custo medido pela taxa mínima requerida de juros ou custo de capital, dada pela Equação (4) a seguir:

$$PB = \sum_{t=0}^n \frac{FCt}{(1+k)^t} = 0 \quad (4)$$

Na Equação (4), *PB* é tempo de *payback*, *FCt*, é o fluxo de caixa no período, *k* é a taxa mínima de juros e *t* é o período de retorno ou *payback*.

O Valor Presente Líquido (VPL) representa a soma dos fluxos de caixa ao longo do horizonte de planejamento descontados por uma dada taxa de desconto, que, neste caso, é a taxa mínima de atratividade (TMA). O VPL permite trazer os fluxos de cada ano para valor presente, considerando o valor do dinheiro no tempo e as variações anuais nas despesas e receitas, sendo calculado pela Equação (5):

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (5)$$

Na Equação (5), i é a taxa de desconto (TMA), j é o horizonte de planejamento ($j = 0, 1, 2, \dots, n$, sendo n o período de existência do projeto em anos) e FC_j é o fluxo de caixa no período j .

A taxa mínima de atratividade (TMA) é a maior taxa de juros que deixaria de ser obtida caso o investimento fosse realizado na melhor alternativa ao projeto proposto, refletindo o custo de oportunidade do capital próprio, referente à taxa mínima que um investidor estaria disposto a aceitar. Em alguns casos, a taxa básica de juros do país pode ser considerada como TMA, dependendo também de fatores como liquidez e risco do projeto.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é encontrada ao calcular o VPL a várias taxas de juros diferentes, até encontrar uma taxa que anula o VPL acumulado no final do projeto. Esta taxa representa a taxa de juros máxima que o projeto poderia pagar, mantendo o equilíbrio ao final de sua vida útil (Towler & Sinott, 2013)

Inicialmente, o investimento, custos, demonstrativos e indicadores são calculados em um cenário base, usando hipóteses e estimativas para os valores mais prováveis de diversos parâmetros. Após essa etapa, realizamos a análise de sensibilidade, variando um parâmetro escolhido enquanto mantemos os demais fixos. Isso avalia o impacto da variação do parâmetro nos fluxos de caixa e no resultado final da análise de viabilidade econômica, considerando possíveis erros nas premissas adotadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão discutidos dois tipos de resultados obtidos com a metodologia empregada para a determinação do potencial biotecnológico associado à viabilidade financeira. Inicialmente seria extremamente interessante do ponto de vista de aproveitamento dos resíduos gerados pela indústria estudada que a biorrefinaria fosse instalada, devido à redução dos impactos ambientais e redução da potencial perda de recursos com o descarte dos resíduos.

Além da instalação de biorrefinaria, a implementação de um recuperador de D-limoneno individual será também avaliada junto a duas empresas, que se mostraram interessadas na implantação dos equipamentos na planta estudada.

5.1. Cenários avaliados

Considerando uma possível expansão da planta, suas potenciais gerações de resíduos, as quais são proporcionais à capacidade produtiva e também baseando-se nos trabalhos de Lohrasbi *et al.* (2010), com ajustes e calibrações para uma planta de menor porte devido ao potencial produtivo ser menor.

Como descrito anteriormente, há uma previsão de aumento da capacidade produtiva da planta para 2024, 2026 e 2028, conforme dados apresentados na Tabela 3, bem como estimativas de aumento da capacidade de geração de resíduos. Também ainda é possível observar nesta tabela os potenciais de obtenção de cada tipo de subproduto da biorrefinaria em função da capacidade de processamento por tonelada (aproximadamente 20% de matéria seca). Estima-se também por Lohrasbi *et al.* (2010), que para cada tonelada de resíduo, sejam obtidos para essa biorrefinaria aproximadamente 39,5 L de etanol, 45 Nm³ de biogás e 8 kg de limoneno. Assim, multiplicando-se a expectativa de tonelada gerada anualmente pelo potencial estimado para cada subproduto, é possível obter a produtividade estimada da biorrefinaria.

Tabela 3 - Produção estimada de subprodutos versus capacidade projetada

Capacidade	Ano referência	Resíduos (ton/ano)	Etanol (litros/ano)	Limoneno (kg/ano)	Biogás (Nm ³ /ano)
Capacidade atual 8 ton/dia	2024	1056	41712	8448	47309
Ampliação da planta 12 ton/dia	2026	1584	62568	12672	70963
Ampliação da planta 16 ton/dia	2028	2112	83424	16896	94618

Fonte: Elaboração baseada, em Lohrasbi *et al.* (2010), a partir de dados coletados

Esses resultados podem ser distantes do que seriam obtidos na prática, porém para efeitos de avaliação do potencial e da viabilidade técnica, os trabalhos de Lohrasbi *et al.* (2010) tornaram-se referências para propostas de implementação.

5.2. Investimento esperado

Baseando-se nos estudos de Lohrasbi *et al.* (2010), é prudente e plausível fazer previsões de investimentos para a biorrefinaria preconizada, porém esses números encontrados na bibliografia, foram confrontados com as expectativas e os tetos de investimentos que a empresa poderia fazer para esse projeto, visando-se aproximar ainda mais do potencial real e não apenas de expectativas teóricas baseadas em plantas de capacidades divergentes. Assim é possível a obtenção de valores realistas de investimentos para que sejam feitas análises quanto aos potenciais de recuperação do investimento baseado nas métricas utilizadas.

Tabela 4 - Investimento esperado composto pelas métricas teóricas

Ano Referência	2024	2026	2028
Investimento Fixo	R\$ 4.593.252	R\$ 6.889.877	R\$ 9.186.503
ISBL	R\$ 2.944.392,00	R\$ 4.416.588,00	R\$ 5.888.784,00
OSBL	R\$ 588.878,40	R\$ 883.317,60	R\$ 1.177.756,80
Custos de Engenharia	R\$ 706.654,08	R\$ 1.059.981,12	R\$ 1.413.308,16
Encargos de contingência	R\$ 353.327,04	R\$ 529.990,56	R\$ 706.654,08

Fonte: Elaboração própria, baseada em Lohrasbi *et al.* (2010)

É possível observar o aumento no investimento da biorrefinaria, à medida que a projeção no aumento na capacidade produtiva aumenta também assim o momento certo para implementação da biorrefinaria também deverá obedecer a capacidade produtiva, visto que alguns custos não aumentam com o aumento da capacidade, fator que pode ser primordial para determinação do momento certo para implementação desde que seja viável em algum desses três cenários.

5.3. Custos de produção

Para custeio da produção é necessário observar algumas variáveis que determinam os valores para manter a biorrefinaria em pleno funcionamento. Serão estimados e apresentados tais valores para cada uma destas variáveis.

5.3.1. Custos fixos

Os custos fixos são despesas recorrentes que permanecem constantes, independentemente do volume de produção da planta. Neste item, serão detalhados os custos fixos com mão de obra, manutenção e despesas operacionais.

Custos de mão de obra incluem salários e encargos sociais dos funcionários. A seguir, são apresentadas tabelas com os componentes dos custos referentes à mão de obra para operadores da planta em plena operação. Na Tabela 5 estão apresentadas as quantidades de operadores necessários para a implementação da biorrefinaria, com os custos envolvidos na contratação dos mesmos e na Tabela 6, apresentam-se os encargos sociais, os quais são parcelas a serem somadas ao custo de mão de obra dos operadores.

Tabela 5 - Custos anuais de mão de obra

Ano	Operadores	Custo mensal/operador	Operador (R\$/ano)	Custo mão de obra (R\$/Ano)
2024	1	R\$ 3.838	R\$ 46.056	R\$ 46.056
2026	1	R\$ 3.838	R\$ 46.056	R\$ 50.777
2028	2	R\$ 3.838	R\$ 92.112	R\$ 111.963

Fonte: Elaboração própria baseada em dados fornecidos pela planta estudada

Tabela 6 – Encargos trabalhistas por funcionário

Encargo	Valor estimado
Férias	R\$ 422,18
13° Salário	R\$ 319,71
FGTS + Provisão Multa	R\$ 429,86
SAT/RAT	R\$ 115,14
INSS	R\$ 767,60
Total	R\$ 2.054,48

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da AG Capital (2024)

A AG Capital (2024) também reporta que os custos de mão de obra na planta incluem vários encargos sociais para garantir os direitos e benefícios dos funcionários, incluindo FGTS, 13º salário e remuneração de férias. A provisão de multa é uma reserva financeira adicional para cobrir possíveis multas trabalhistas. O SAT/RAT (Seguro de Acidente de Trabalho ou Risco Ambiental do Trabalho) é um tributo que financia benefícios decorrentes de acidentes de trabalho, garantindo que os funcionários estejam protegidos em caso de incidentes ocupacionais. Por fim, o INSS (Instituto Nacional do Seguro Social) é uma contribuição para a seguridade social, que inclui aposentadoria, seguro-desemprego e outros benefícios, assegurando que os trabalhadores tenham uma rede de proteção social robusta.

Esses encargos são calculados e adicionados ao custo anual de cada funcionário, resultando em valores significativos para a empresa. Por exemplo, para operadores na planta, os encargos sociais incluem férias de R\$ 422,18, 13º salário de R\$ 319,71, FGTS + provisão multa de R\$ 429,86, SAT/RAT de R\$ 115,14 e INSS de R\$ 767,60, totalizando R\$ 2.054,48 por ano.

Além dos custos de mão de obra, é de extrema importância considerar valores com manutenção preventiva e remediativa para que o equipamento continue operando em bom funcionamento. Considerando isso, elaborou-se a Tabela 7, na qual constam dados do custo com manutenção, calculados percentualmente a partir do ISBL. A sugestão do gestor da planta é considerar uma redução gradual nos custos de manutenção, começando com 5% do ISBL em 2024 e diminuindo para 2% em 2028.

Tabela 7 – Custos com manutenção atrelado ao ISBL

Ano	ISBL	Custo Manutenção (R\$/Ano)
2024	R\$ 2.944.392,00	R\$ 147.219,60
2026	R\$ 4.416.588,00	R\$ 154.580,58
2028	R\$ 5.888.784,00	R\$ 117.775,68

Fonte: Elaboração própria a partir de Lohrasbi *et al.* (2010)

Por fim ao tratar de custos fixos, é necessário abordar também os custos com despesas operacionais, que são calculadas com base nas despesas administrativas e despesas com pesquisa e desenvolvimento (P&D). As despesas administrativas correspondem a 50% dos custos totais de mão de obra, enquanto as despesas com P&D são 1% da receita. Na Tabela 8 estão apresentados estes custos calculados conforme metodologia de Lohrasbi *et al.* (2010).

Tabela 8 - Valores calculados dos custos com despesas operacionais

Ano	Custo mão de obra (R\$/Ano)	Pesquisa e Desenvolvimento (R\$/ano)	Despesas Operacionais
2024	R\$ 46.056	R\$ 3.563	R\$ 26.590,94
2026	R\$ 50.777	R\$ 5.344	R\$ 30.732,79
2028	R\$ 111.963	R\$ 7.126	R\$ 63.107,24

Fonte: Elaboração própria a partir de Lohrasbi *et al.* (2010)

Conhecer os custos é crucial para identificar as despesas geradas pela planta em diferentes cenários de produção, devendo estes custos serem incorporados aos demonstrativos de receitas para avaliar os indicadores utilizados na análise de viabilidade.

5.3.2. Custos variáveis

Neste item, são abordados os custos variáveis relacionados às despesas com utilidades e consumíveis da planta de biorrefinaria, sendo estes custos diretamente proporcionais ao volume de produção e variáveis de acordo com a capacidade produtiva da planta em diferentes anos. São estimados junto à equipe de projeto da planta com base na própria produção e experiência.

Os custos variáveis para utilidades e consumíveis foram calculados com base na capacidade de produção em toneladas por ano, para os anos de 2024, 2026 e 2028, estando os valores apresentados na Tabela 9:

Tabela 9 - Custo com consumíveis e utilidades para processamento total

Ano	Capacidade (ton/ano)	Custo Total de produção (R\$/ano)	Custo consumíveis + utilidades
2024	1056	R\$ 219.866,54	R\$ 21.986,65
2026	1584	R\$ 236.090,11	R\$ 23.609,01
2028	2112	R\$ 292.845,64	R\$ 29.284,56

Fonte: Elaboração própria

Em 2024, com uma capacidade de produção de 4224 toneladas por ano, o custo total de produção é estimado em R\$ 219.866,54, com R\$ 21.986,65 destinados à utilidades e consumíveis. No ano de 2026, com a expansão, a capacidade de produção aumenta para 6336 toneladas por ano, resultando em um custo total de produção de R\$ 236.090,11, sendo as despesas com utilidades e consumíveis de R\$ 23.609,01. Finalmente, em 2028, se a capacidade de produção atingir 8026 toneladas por ano, o custo total de produção aumentará para R\$ 292.845,64, dos quais R\$ 29.284,56 serão com utilidades e consumíveis.

Esses valores demonstram como os custos variáveis se ajustam ao aumento da capacidade de produção da planta, refletindo a necessidade de maiores insumos e utilidades para sustentar operações em escala ampliada.

Na Tabela 10 observa-se a participação de cada custo em relação ao custo total de operação do projeto em plena carga, sendo o mesmo a soma dos custos fixos com as variáveis.

Tabela 10 - Custos totais de operação

Ano Referência	Capacidade (ton/ano)	Custo fixo (R\$/ano)	Custo Consumíveis + Utilidades	Custo total produção (R\$/ano)
2024	1056	R\$ 219.866,54	R\$ 21.986,65	R\$ 241.853,00
2026	1584	R\$ 236.090,11	R\$ 23.609,01	R\$ 259.699,00
2028	2112	R\$ 292.845,64	R\$ 29.284,56	R\$322.130,00

Fonte: Elaboração própria

5.4. Estimativas de receitas

Foram definidos os três subprodutos que serão produzidos na biorrefinaria: são bioetanol, biogás e d-limoneno, sendo este último a ser analisado isoladamente conforme informado anteriormente.

Segundo o CEPEA (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – ESALQ USP) o valor de comercialização do etanol oscilou em torno de R\$ 2,50 durante o período de realização deste trabalho e estima-se que dificilmente haverá uma comercialização desse produto em valores acima do seu custo, muito devido a paridade com o valor do etanol obtido via cana de açúcar.

Em relação ao limoneno em 2023 foi vendido por aproximadamente R\$ 40 por kg para clientes do interior de São Paulo, segundo o gestor da planta. Esse valor comercial elevado faz do limoneno um subproduto importante, capaz de aumentar significativamente as receitas do processo proposto. Já o biogás pode ser vendido para as próprias extratoras devido à sua capacidade de geração de energia. De acordo com Sierra *et al.* (2008), o preço de venda do biogás é em torno de R\$ 2,00 por Nm³, valor este considerado na presente análise econômica.

Utilizando-se os valores unitários estimados anteriormente para o bioetanol (R\$ 2,50/L), limoneno (R\$ 40/kg) e biogás (R\$ 2,00/Nm³) e multiplicando-se pela quantidade total produzida, estimada para cada cenário (Tabela 3), obtém-se as estimativas de receitas conforme mostrado na Tabela 11:

Tabela 11 – Estimativas de receitas obtidas com os subprodutos

Ano	Total Bioetanol	Total Limoneno	Total Biogás	Receita total
2024	R\$ 104.280,00	R\$ 337.920,00	R\$ 94.617,60	R\$ 536.817,60
2026	R\$ 156.420,00	R\$ 506.880,00	R\$ 141.926,40	R\$ 805.226,40
2028	R\$ 208.560,00	R\$ 675.840,00	R\$ 189.235,20	R\$ 1.073.635,20

Fonte: Elaboração própria a partir de referências

Para o ano de 2024, é estimado que a planta terá uma produção de 41.712 m³ de etanol, resultando em uma receita de R\$ 104.280,00. A produção de limoneno será de 8.448 kg, gerando uma receita de R\$ 337.920,00. A produção de biogás será de 47.309 Nm³, obtendo-se R\$ 94.617,60 em receita. Assim, a receita total esperada para 2024 é de R\$ 536.817,60.

Em 2026, havendo a expansão, a produção de etanol aumentará para 62.568 m³, resultando em R\$ 156.420,00 de receita. A produção de limoneno subirá para 12.672 kg, gerando R\$ 506.880,00 enquanto que 70.963 Nm³ de biogás serão produzidos, obtendo-se R\$ 141.926,40. A receita total prevista para 2026 será de R\$ 805.226,40.

Para 2028, seguindo a mesma previsão e metodologia a produção de etanol chega a 83.424 m³, com uma receita de R\$ 208.560,00 enquanto que a produção de limoneno atingirá 16.896 kg, gerando R\$ 675.840,00. Serão produzidos 94.618 Nm³ de biogás, o que resultará em R\$ 189.235,20 de receita. Totalizando, a receita para 2028 será de R\$ 1.073.635,20.

5.5. Demonstrativos de fluxo de caixa

A seguir, serão apresentadas estimativas de fluxo de caixa para os anos de 2024, 2026 e 2028, com base nas estimativas de custos e receitas fornecidas. O fluxo de caixa é uma ferramenta essencial para analisar a liquidez e a capacidade da empresa de gerar caixa ao longo dos anos.

5.5.1. Fluxo de caixa estimado para 2024

Na Figura 8 está apresentado o fluxo de caixa estimado para o período entre 2024 e 2034.

Figura 8 - Fluxo de caixa estimado entre 2024 e 2034

	Construção Planta			Construção/Validação
	2024	2025	2026	2027
(+)Entradas	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 161.045,28
Receita Operacional Líquida	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 161.045,28
Retorno Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
(-)Saídas	R\$ 459.325,15	R\$ 2.296.625,76	R\$ 1.377.975,46	R\$ 609.562,05
(-)Custos Variáveis	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 21.986,65
Utilidades + Consumíveis	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 21.986,65
(-)Custos Fixos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 59.351,47
Mão de Obra	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 46.056,00
Manutenção	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Despesas Operacionais	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 13.295,47
Investimento total (FIXO + C.G)	R\$ 459.325,15	R\$ 2.296.625,76	R\$ 1.377.975,46	R\$ 528.223,92
Investimento Fixo	R\$ 459.325,15	R\$ 2.296.625,76	R\$ 1.377.975,46	R\$ 459.325,15
ISBL	R\$ 294.439,20	R\$ 1.472.196,00	R\$ 883.317,60	R\$ 294.439,20
OSBL	R\$ 58.887,84	R\$ 294.439,20	R\$ 176.663,52	R\$ 58.887,84
Custos de Engenharia	R\$ 70.665,41	R\$ 353.327,04	R\$ 211.996,22	R\$ 70.665,41
Encargos	R\$ 35.332,70	R\$ 176.663,52	R\$ 105.998,11	R\$ 35.332,70
Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 68.898,77
Lucro Bruto	-R\$ 459.325,15	-R\$ 2.296.625,76	-R\$ 1.377.975,46	-R\$ 448.516,77
(-)Impostos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Geração de Caixa	-R\$ 459.325,15	-R\$ 2.296.625,76	-R\$ 1.377.975,46	-R\$ 448.516,77

	Operação da Planta						
	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
(+)Entradas	R\$ 375.772,32	R\$ 536.817,60	R\$ 536.817,60	R\$ 536.817,60	R\$ 536.817,60	R\$ 536.817,60	R\$ 536.817,60
Receita Operacional Líquida	R\$ 375.772,32	R\$ 536.817,60	R\$ 536.817,60	R\$ 536.817,60	R\$ 536.817,60	R\$ 536.817,60	R\$ 536.817,60
Retorno Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
(-)Saídas	R\$ 242.073,06	R\$ 242.561,04	R\$ 243.053,89	R\$ 243.551,68	R\$ 244.054,44	R\$ 244.562,23	R\$ 245.075,09
(-)Custos Variáveis	R\$ 22.206,52	R\$ 22.428,59	R\$ 22.652,87	R\$ 22.879,40	R\$ 23.108,19	R\$ 23.339,28	R\$ 23.572,67
Utilidades + Consumíveis	R\$ 22.206,52	R\$ 22.428,59	R\$ 22.652,87	R\$ 22.879,40	R\$ 23.108,19	R\$ 23.339,28	R\$ 23.572,67
(-)Custos Fixos	R\$ 219.866,54	R\$ 220.132,45	R\$ 220.401,02	R\$ 220.672,28	R\$ 220.946,24	R\$ 221.222,95	R\$ 221.502,42
Mão de Obra	R\$ 46.056,00	R\$ 46.056,00	R\$ 46.056,00	R\$ 46.056,00	R\$ 46.056,00	R\$ 46.056,00	R\$ 46.056,00
Manutenção	R\$ 147.219,60	R\$ 147.219,60	R\$ 147.219,60	R\$ 147.219,60	R\$ 147.219,60	R\$ 147.219,60	R\$ 147.219,60
Despesas Operacionais	R\$ 26.590,94	R\$ 26.856,85	R\$ 27.125,42	R\$ 27.396,68	R\$ 27.670,64	R\$ 27.947,35	R\$ 28.226,82
Investimento total (FIXO + C.G)	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Investimento Fixo	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
ISBL	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
OSBL	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Custos de Engenharia	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Encargos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Lucro Bruto	R\$ 133.699,26	R\$ 294.256,56	R\$ 293.763,71	R\$ 293.265,92	R\$ 292.763,16	R\$ 292.255,37	R\$ 291.742,51
(-)Impostos	R\$ 45.457,75	R\$ 100.047,23	R\$ 99.879,66	R\$ 99.710,41	R\$ 99.539,48	R\$ 99.366,83	R\$ 99.192,45
Geração de Caixa	R\$ 88.241,51	R\$ 194.209,33	R\$ 193.884,05	R\$ 193.555,51	R\$ 193.223,69	R\$ 192.888,55	R\$ 192.550,06

Fonte: Elaboração própria

O fluxo de caixa projetado para os anos de 2024 a 2034, em seus diversos períodos, apresenta uma visão detalhada das entradas e saídas financeiras associadas à construção e operação de uma planta de produção:

- Período de Construção (2024-2026)

Durante os primeiros três anos, o fluxo de caixa reflete investimentos significativos na construção da planta. Em 2024, os investimentos totalizam R\$ 459.325,15, aumentando para R\$ 2.296.625,76 em 2025 e R\$ 1.377.975,46 em 2026. Esses custos abrangem itens como ISBL, OSBL, custos de Engenharia e encargos. No final de 2026, o fluxo de caixa é negativo, indicando a ausência de receitas durante este período de investimento pesado.

- Período de Construção e Validação (2027)

Em 2027, a planta começa a gerar receitas, com uma entrada total de R\$ 161.045,28. No entanto, ainda há saídas significativas, totalizando R\$ 609.562,05, o que resulta em um fluxo de caixa negativo de R\$ 448.516,77, refletindo o custo residual de construção e a validação operacional da planta.

- Período de Operação (2028-2034)

A partir de 2028, a planta entra em pleno funcionamento, gerando receitas anuais crescentes que chegam a R\$ 536.817,60 a partir de 2029. Durante este período, os custos variáveis, como utilidades e consumíveis, e os custos fixos, incluindo mão de obra, manutenção e despesas operacionais, são contabilizados. O fluxo de caixa se torna positivo em 2028, com uma geração de caixa de R\$ 88.241,51, e continua a aumentar, atingindo R\$ 192.550,06 em 2034. Esse aumento constante no fluxo de caixa indica a estabilização e rentabilidade da planta no período, porém pode não ser o suficiente para recuperação.

5.5.2. Fluxo de caixa estimado para expansão de 2026

Na Figura 9 está apresentado o fluxo de caixa estimado para o período entre 2026 e 2036. A análise do fluxo de caixa no citado período mostra duas fases principais: a construção da planta e a operação da planta. Nos anos de 2026 a 2028, o projeto está focado na construção, resultando em altos investimentos e nenhum retorno financeiro. Os investimentos totais nesses anos são de R\$ 688.987,73 em 2026, R\$ 3.444.938,64 em 2027 e R\$ 2.066.963,18 em 2028. Como consequência, a geração de caixa é negativa, refletindo os altos custos de construção.

A partir de 2029, a planta começa a operar e gerar receitas. Em 2029, a receita operacional líquida é de R\$ 241.567,92, aumentando para R\$ 805.226,40 anualmente de 2030 em diante. Os custos operacionais anuais incluindo utilidades, mão de obra, manutenção e despesas operacionais, somam entre R\$ 259.935,21 e R\$ 263.292,85.

Figura 9 - Fluxo de caixa estimado entre 2026 e 2036

	Construção Planta			Construção/Validação
	2026	2027	2028	2029
(+)Entradas	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 241.567,92
Receita Operacional Líquida	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 241.567,92
Retorno Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
(-)Saídas	R\$ 688.987,73	R\$ 3.444.938,64	R\$ 2.066.963,18	R\$ 882.088,03
(-)Custos Variáveis	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 23.609,01
Utilidades + Consumíveis	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 23.609,01
(-)Custos Fixos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 66.143,13
Mão de Obra	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 50.776,74
Manutenção	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Despesas Operacionais	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 15.366,39
Investimento total (FIXO + C.G)	R\$ 688.987,73	R\$ 3.444.938,64	R\$ 2.066.963,18	R\$ 792.335,89
Investimento Fixo	R\$ 688.987,73	R\$ 3.444.938,64	R\$ 2.066.963,18	R\$ 688.987,73
ISBL	R\$ 441.658,80	R\$ 2.208.294,00	R\$ 1.324.976,40	R\$ 441.658,80
OSBL	R\$ 88.331,76	R\$ 441.658,80	R\$ 264.995,28	R\$ 88.331,76
Custos de Engenharia	R\$ 105.998,11	R\$ 529.990,56	R\$ 317.994,34	R\$ 105.998,11
Encargos	R\$ 52.999,06	R\$ 264.995,28	R\$ 158.997,17	R\$ 52.999,06
Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 103.348,16
Lucro Bruto	-R\$ 688.987,73	-R\$ 3.444.938,64	-R\$ 2.066.963,18	-R\$ 640.520,11
(-)Impostos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Geração de Caixa	-R\$ 688.987,73	-R\$ 3.444.938,64	-R\$ 2.066.963,18	-R\$ 640.520,11

	Operação da Planta						
	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
(+)Entradas	R\$ 563.658,48	R\$ 805.226,40	R\$ 805.226,40	R\$ 805.226,40	R\$ 805.226,40	R\$ 805.226,40	R\$ 805.226,40
Receita Operacional Líquida	R\$ 563.658,48	R\$ 805.226,40	R\$ 805.226,40	R\$ 805.226,40	R\$ 805.226,40	R\$ 805.226,40	R\$ 805.226,40
Retorno Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
(-)Saídas	R\$ 259.935,21	R\$ 260.480,99	R\$ 261.032,22	R\$ 261.588,97	R\$ 262.151,29	R\$ 262.719,23	R\$ 263.292,85
(-)Custos Variáveis	R\$ 23.845,10	R\$ 24.083,55	R\$ 24.324,39	R\$ 24.567,63	R\$ 24.813,31	R\$ 25.061,44	R\$ 25.312,05
Utilidades + Consumíveis	R\$ 23.845,10	R\$ 24.083,55	R\$ 24.324,39	R\$ 24.567,63	R\$ 24.813,31	R\$ 25.061,44	R\$ 25.312,05
(-)Custos Fixos	R\$ 236.090,11	R\$ 236.397,43	R\$ 236.707,83	R\$ 237.021,34	R\$ 237.337,98	R\$ 237.657,79	R\$ 237.980,79
Mão de Obra	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74
Manutenção	R\$ 154.580,58	R\$ 154.580,58	R\$ 154.580,58	R\$ 154.580,58	R\$ 154.580,58	R\$ 154.580,58	R\$ 154.580,58
Despesas Operacionais	R\$ 30.732,79	R\$ 31.040,11	R\$ 31.350,51	R\$ 31.664,02	R\$ 31.980,66	R\$ 32.300,47	R\$ 32.623,47
Investimento total (FIXO + C.G)	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Investimento Fixo	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
ISBL	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
OSBL	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Custos de Engenharia	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Encargos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Lucro Bruto	R\$ 303.723,27	R\$ 544.745,41	R\$ 544.194,18	R\$ 543.637,43	R\$ 543.075,11	R\$ 542.507,17	R\$ 541.933,55
(-)Impostos	R\$ 103.265,91	R\$ 185.213,44	R\$ 185.026,02	R\$ 184.836,73	R\$ 184.645,54	R\$ 184.452,44	R\$ 184.257,41
Geração de Caixa	R\$ 200.457,36	R\$ 359.531,97	R\$ 359.168,16	R\$ 358.800,70	R\$ 358.429,57	R\$ 358.054,73	R\$ 357.676,15

Fonte: Elaboração própria

Com o início das operações, o lucro bruto torna-se positivo, começando em R\$ 303.723,27 em 2029 e estabilizando-se em torno de R\$ 542.507,17 a R\$ 544.745,41 nos anos seguintes. A geração de caixa acompanha essa tendência, sendo positiva a partir de 2029 e alcançando aproximadamente R\$ 358.054,73 a R\$ 359.531,97 anualmente até 2036.

5.5.3. Fluxo de caixa estimado para expansão de 2028

Na Figura 10 é apresentado o fluxo de caixa estimado para o período entre 2028 e 2038.

Figura 10 - Fluxo de caixa estimado entre 2028 e 2038

	Construção Planta			Construção/Validação			
	2028	2029	2030	2031			
(+)Entradas	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 322.090,56			
Receita Operacional Líquida	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 322.090,56			
Retorno Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -			
(-)Saídas	R\$ 918.650,30	R\$ 4.593.251,52	R\$ 2.755.950,91	R\$ 1.229.248,75			
(-)Custos Variáveis	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 29.284,56			
Utilidades + Consumíveis	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 29.284,56			
(-)Custos Fixos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 143.516,33			
Mão de Obra	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 111.962,71			
Manutenção	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -			
Despesas Operacionais	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 31.553,62			
Investimento total (FIXO + C.G)	R\$ 918.650,30	R\$ 4.593.251,52	R\$ 2.755.950,91	R\$ 1.056.447,85			
Investimento Fixo	R\$ 918.650,30	R\$ 4.593.251,52	R\$ 2.755.950,91	R\$ 918.650,30			
ISBL	R\$ 588.878,40	R\$ 2.944.392,00	R\$ 1.766.635,20	R\$ 588.878,40			
OSBL	R\$ 117.775,68	R\$ 588.878,40	R\$ 353.327,04	R\$ 117.775,68			
Custos de Engenharia	R\$ 141.330,82	R\$ 706.654,08	R\$ 423.992,45	R\$ 141.330,82			
Encargos	R\$ 70.665,41	R\$ 353.327,04	R\$ 211.996,22	R\$ 70.665,41			
Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 137.797,55			
Lucro Bruto	-R\$ 918.650,30	-R\$ 4.593.251,52	-R\$ 2.755.950,91	-R\$ 907.158,19			
(-)Impostos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -			
Geração de Caixa	-R\$ 918.650,30	-R\$ 4.593.251,52	-R\$ 2.755.950,91	-R\$ 907.158,19			
	Operação da Planta						
	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038
(+)Entradas	R\$ 751.544,64	R\$ 1.073.635,20	R\$ 1.073.635,20	R\$ 1.073.635,20	R\$ 1.073.635,20	R\$ 1.073.635,20	R\$ 1.073.635,20
Receita Operacional Líquida	R\$ 751.544,64	R\$ 1.073.635,20	R\$ 1.073.635,20	R\$ 1.073.635,20	R\$ 1.073.635,20	R\$ 1.073.635,20	R\$ 1.073.635,20
Retorno Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
(-)Saídas	R\$ 261.237,07	R\$ 262.163,92	R\$ 263.100,03	R\$ 264.045,51	R\$ 265.000,44	R\$ 265.964,92	R\$ 266.939,05
(-)Custos Variáveis	R\$ 29.577,41	R\$ 29.873,18	R\$ 30.171,92	R\$ 30.473,63	R\$ 30.778,37	R\$ 31.086,15	R\$ 31.397,02
Utilidades + Consumíveis	R\$ 29.577,41	R\$ 29.873,18	R\$ 30.171,92	R\$ 30.473,63	R\$ 30.778,37	R\$ 31.086,15	R\$ 31.397,02
(-)Custos Fixos	R\$ 231.659,66	R\$ 232.290,74	R\$ 232.928,12	R\$ 233.571,88	R\$ 234.222,07	R\$ 234.878,77	R\$ 235.542,03
Mão de Obra	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74	R\$ 50.776,74
Manutenção	R\$ 117.775,68	R\$ 117.775,68	R\$ 117.775,68	R\$ 117.775,68	R\$ 117.775,68	R\$ 117.775,68	R\$ 117.775,68
Despesas Operacionais	R\$ 63.107,24	R\$ 63.738,32	R\$ 64.375,70	R\$ 65.019,46	R\$ 65.669,65	R\$ 66.326,35	R\$ 66.989,61
Investimento total (FIXO + C.G)	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Investimento Fixo	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
ISBL	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
OSBL	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Custos de Engenharia	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Encargos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Lucro Bruto	R\$ 490.307,57	R\$ 811.471,28	R\$ 810.535,17	R\$ 809.589,69	R\$ 808.634,76	R\$ 807.670,28	R\$ 806.696,15
(-)Impostos	R\$ 166.704,57	R\$ 275.900,24	R\$ 275.581,96	R\$ 275.260,49	R\$ 274.935,82	R\$ 274.607,89	R\$ 274.276,69
Geração de Caixa	R\$ 323.602,99	R\$ 535.571,05	R\$ 534.953,21	R\$ 534.329,19	R\$ 533.698,94	R\$ 533.062,38	R\$ 532.419,46

Fonte: Elaboração própria

A análise do fluxo de caixa para o período de 2028 a 2038 revela duas fases distintas: a construção da planta, seguida pela operação da planta. Durante os anos de 2028 e 2029, os esforços são focados na construção, resultando em investimentos substanciais e nenhuma receita operacional. Em 2028, o investimento total é de R\$ 918.650,30, aumentando significativamente para R\$ 4.593.251,52 em 2029. Esses investimentos resultam em fluxos de caixa negativos nos respectivos anos, evidenciando os altos custos de construção.

A partir de 2031, a planta passa a operar, gerando receitas operacionais que começam em R\$ 322.090,56 em 2031 e aumentam para R\$ 1.073.635,20 anualmente de 2032 em diante. Os custos operacionais anuais incluem utilidades, mão de obra, manutenção e despesas operacionais, variando entre R\$ 261.237,07 e R\$ 266.939,05.

Com a entrada em operação, o lucro bruto torna-se positivo a partir de 2031, começando com R\$ 490.307,57 e aumentando gradualmente até estabilizar-se em torno de R\$ 806.696,15 em 2038. Consequentemente, a geração de caixa também se torna positiva a partir de 2031, alcançando aproximadamente R\$ 532.419,46 em 2038.

5.6. Fluxo de caixa para produção independente de d-limoneno

Para a análise de viabilidade da produção independente de d-limoneno, foram considerados dois cenários distintos, baseados em propostas fornecidas por duas empresas da região. Buscou-se comparar as duas propostas, levando-se em conta os custos fixos, variáveis e a participação nas receitas, para determinar a melhor opção para a operação da planta.

A primeira empresa apresentou uma proposta com um custo fixo anual de R\$ 250.000,00, sujeito a um reajuste de 5% ao ano, justificado pela necessidade de acompanhar a inflação, cobrir aumentos nos custos de insumos, energia e outros fatores econômicos que impactam diretamente os custos operacionais. Além do custo fixo, foram estimados outros custos operacionais pela empresa e pelo gestor da planta, incluindo utilidades, estimadas em R\$ 126.000,00 anuais, também sujeitos a um aumento de 5% ao ano, visando cobrir os aumentos nos preços de energia elétrica, água e outros consumíveis que geralmente sofrem variações conforme o mercado.

Outro custo significativo é com operadores, que parte de um valor inicial de R\$ 46.056,00, o qual é também corrigido em 5% ao ano para atender a necessidade de ajustes salariais objetivando manter a competitividade e a motivação dos funcionários, além de cobrir aumentos nos benefícios e encargos trabalhistas.

O índice de 5% adotado para os reajustes foi escolhido com base em indicadores econômicos que refletem a inflação esperada, aumentos salariais e outras variáveis econômicas. Segundo dados históricos do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) e outras fontes econômicas, a inflação no Brasil nos últimos anos tem oscilado em torno desse valor, o que torna este reajuste razoável e alinhado com a realidade econômica do país.

A segunda empresa propôs um modelo de coparticipação nas receitas, cobrando um custo fixo de R\$ 100.000,00 por ano, sem correções anuais, além de 20% de participação sobre as vendas de d-limoneno. Este modelo de coparticipação é vantajoso em termos de custos fixos, pois a ausência de reajustes anuais no valor do aluguel proporciona uma previsibilidade maior dos gastos a longo prazo. No entanto, a participação nas receitas implica que a empresa lucrará menos por unidade vendida, o que pode impactar significativamente os ganhos totais, dependendo do volume de vendas.

A primeira proposta implica um custo inicial mais alto, mas oferece uma previsibilidade melhor quanto aos aumentos anuais, facilitando o planejamento financeiro a longo prazo. A segunda proposta reduz os custos fixos iniciais, mas introduz uma variável significativa nos ganhos, que é a coparticipação em 20% sobre as vendas. A escolha entre as duas propostas deve considerar diversos fatores, incluindo previsibilidade de custos, impacto nas receitas e riscos e benefícios. A primeira proposta permite um planejamento financeiro mais controlado, apesar dos aumentos anuais. A segunda proposta pode ser mais atrativa inicialmente devido aos menores custos fixos, mas, a participação em 20% nas receitas pode reduzir significativamente os lucros, especialmente se o volume de vendas for alto.

A análise detalhada das duas propostas deve incluir uma projeção dos custos e receitas ao longo do tempo, considerando os reajustes e a participação nas vendas, para determinar qual opção oferece maior viabilidade econômica e se alinha melhor aos objetivos estratégicos da empresa. No item seguinte são apresentadas tabelas com as projeções financeiras para cada cenário, permitindo uma análise comparativa mais aprofundada dos resultados esperados para cada proposta.

5.6.1. Análise da Empresa 1 para os 3 cenários de produção

Para 2024, a Empresa 1 apresenta uma receita de R\$ 337.920,00, enquanto as despesas totalizam R\$ 422.056,00, resultando numa geração de caixa negativa de -R\$ 84.136,00. O maior contribuinte para as despesas é o custo de aluguel, que representa 59% das despesas totais. Utilidades e consumíveis, juntamente com os custos com operadores, compõem o restante das despesas.

À medida que se avança pelos anos, as receitas crescem a um ritmo constante, mas não o suficiente para compensar o aumento das despesas. O crescimento das despesas é impulsionado principalmente pelo aumento do custo de aluguel, que cresce a uma taxa mais rápida em comparação com as outras categorias de custos. Como resultado, a geração de caixa continua a ser negativa ao longo dos anos projetados, com valores negativos crescentes.

Essa análise indica que, sem intervenções significativas para aumentar a eficiência, reduzir custos ou aumentar as receitas de forma mais agressiva, a metodologia de trabalho da Empresa 1 se mostra ineficaz.

Já para o ano de 2026, a Empresa 1 apresenta uma receita de R\$ 506.880,00, enquanto as despesas totalizam R\$ 431.867,14, resultando numa geração de caixa positiva de R\$ 75.012,86. A maior parte das despesas é composta pelo custo de aluguel, representando aproximadamente 58% das despesas totais. Utilidades e consumíveis, junto com os custos com operadores, respondem pelo restante das despesas.

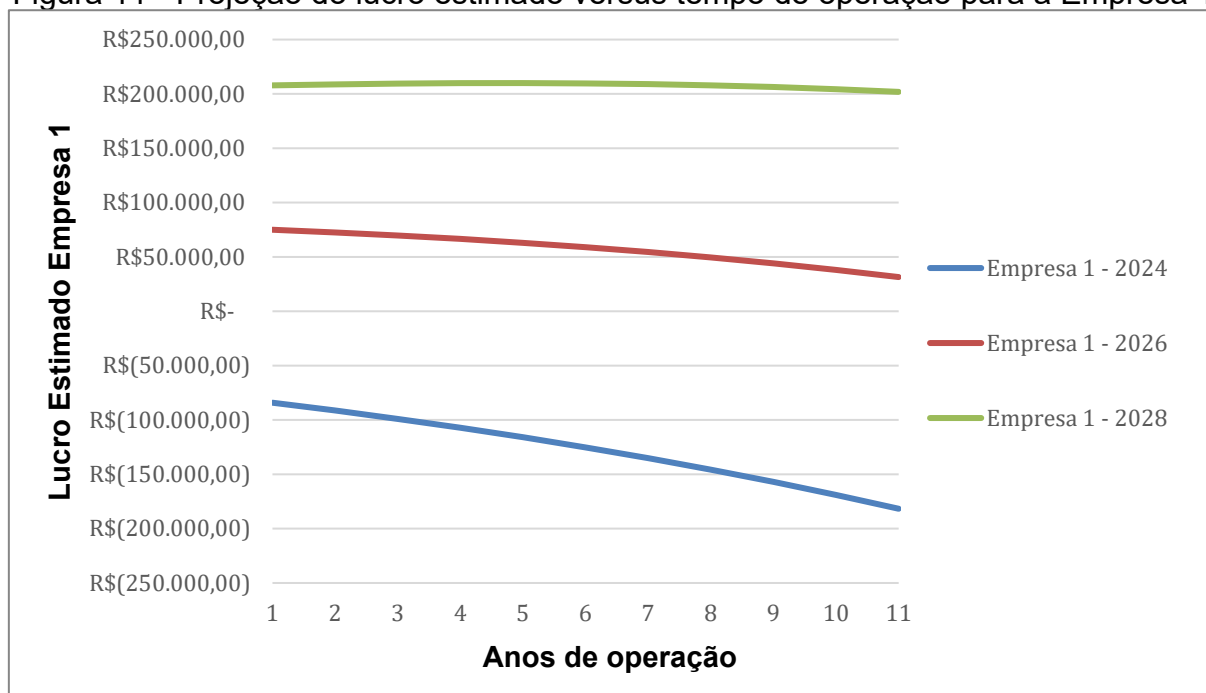
No decorrer dos anos, as receitas crescem em ritmo constante, mas, a geração de caixa apresenta uma tendência de diminuição, sugerindo que, embora a produção atualmente gere caixa positivo, o aumento contínuo das despesas, especialmente do custo de aluguel, possa vir eventualmente a superar o crescimento das receitas, reduzindo a geração de caixa.

Para 2028, a Empresa 1 apresenta uma receita de R\$ 675.840,00, com as despesas totalizando R\$ 467.992,81, o que resulta numa geração de caixa positiva de R\$ 207.847,19, sendo a maior parte das despesas composta pelo custo de aluguel, que representa aproximadamente 59% das despesas totais. Utilidades e consumíveis, junto com os custos com operadores, compõem o restante das despesas.

Apesar de anualmente as receitas crescerem em ritmo constante, a geração de caixa apresenta uma tendência de diminuição, o que sugere que embora se esteja atualmente gerando caixa positivo, o aumento contínuo de despesas, especialmente do custo de aluguel, possa eventualmente superar o crescimento das receitas, gerando caixa negativo.

Na Figura 11 apresenta-se a projeção do lucro estimado para a Empresa 1 nos 3 cenários diferentes, considerando um período de 10 anos. É possível observar que para a Empresa 1, a implementação da geração de d-limoneno tem tendência de declínio do lucro para os 3 anos, porém com uma tendência menor de declínio para o ano de 2028, sendo este comportamento atribuído ao aumento do volume produtivo.

Figura 11 - Projeção do lucro estimado versus tempo de operação para a Empresa 1



Fonte: Elaboração própria

5.6.2. Análise da Empresa 2 para os 3 cenários de produção

Para 2024, estima-se para a Empresa 2 uma receita de R\$ 270.336,00 com uma participação de 20% nas vendas de óleo, com as despesas totais somando R\$ 272.056,00 e uma geração de caixa negativa de R\$ 1.720,00. A maior parte das despesas é devida ao custo fixo de aluguel, o qual representa aproximadamente 36,76% das despesas totais, sendo o restante atribuído conjuntamente a Utilidades, consumíveis e custos com operadores.

Com o passar dos anos, as receitas aumentam em ritmo constante, com a geração de caixa tornando-se positiva a partir de 2025 num valor de R\$ 1.567,28, e continuando a crescer nos anos subsequentes, o que indica que a geração do subproduto apresenta trajetória de melhoria financeira, com geração de caixa crescente, atingindo R\$ 34.695,31 em 2034.

Em 2026, projeta-se para a Empresa 2 uma receita de R\$ 286.799,46, com participação em 20% nas vendas do óleo. As despesas totais são estimadas em R\$ 281.867,14, resultando em uma geração de caixa positiva de R\$ 4.932,32. A maior parte das despesas é composta pelo custo fixo de aluguel, representando aproximadamente 35,47% das despesas totais. Utilidades e consumíveis, juntamente com os custos com operadores, compõem o restante das despesas.

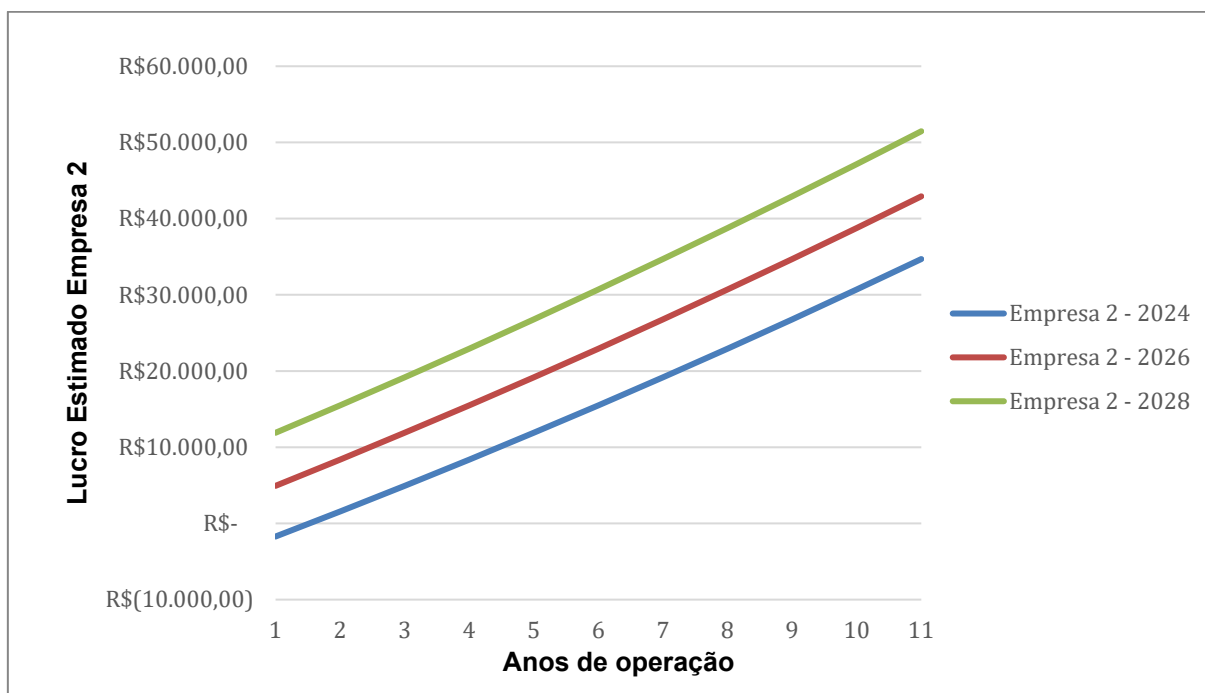
À medida que decorrem os anos, as receitas aumentam em ritmo constante, e a geração de caixa torna-se positiva, crescendo anualmente até atingir R\$ 42.926,07 em 2036.

Para 2028, é prevista para esta empresa uma receita de R\$ 304.265,55, com a participação em 20% nas vendas de óleo e as despesas totais sendo de R\$ 292.367,81, o que resulta numa geração de caixa positiva de R\$ 11.897,74. Aproximadamente 34,21% das despesas é devido ao custo fixo com aluguel, sendo o resto devido à Utilidades, consumíveis e custos com operadores.

No período de 10 anos, as receitas aumentam de forma constante e a geração de caixa torna-se positiva, crescendo anualmente até atingir R\$ 51.465,40 em 2038.

Na Figura 12 está mostrada a projeção do lucro previsto para os 3 cenários diferentes, considerando um período de 10 anos. É possível observar que todos os cenários apresentam uma tendência de aumento no lucro, porém para o cenário referente ao ano de 2028, a curva se mostra com uma inclinação maior, sendo correto afirmar que há um aumento do lucro de forma mais acelerada para esse cenário em relação aos demais.

Figura 12 - Projeção do lucro estimado versus tempo de operação para a Empresa 2



Fonte: Elaboração própria

5.7. Análise de viabilidade e sustentabilidade da biorrefinaria

A análise de viabilidade e sustentabilidade da biorrefinaria, fundamentada nos cálculos dos principais indicadores econômicos apresentados na Tabela 12, revela que o projeto enfrenta desafios significativos para ser considerado economicamente viável. Os resultados obtidos para os anos de 2024, 2026 e 2028 mostram que todos os indicadores apresentam valores negativos, sugerindo uma inviabilidade econômica consistente ao longo do tempo. A SOMA VP (Soma dos Valores Presentes) dos primeiros 10 anos é negativa, evidenciando que os fluxos de caixa descontados não conseguem cobrir o investimento inicial e outras despesas, resultando em -R\$ 2.906.663,34 para 2024, -R\$ 4.114.802,71 para 2026 e -R\$ 5.342.357,11 para 2028.

Tabela 12 - Tabela de indicadores de viabilidade e sustentabilidade

	SOMA VP (1-10)	VPL	TIR	TAXA DE LUCRO	TEMPO DE PB
2024	-R\$ 2.906.663,34	-R\$ 3.365.988,49	-19,07%	-632,81%	Projeto inviável TMA > TIR
2026	-R\$ 4.114.802,71	-R\$ 4.489.291,02	-16,13%	-597,22%	Projeto inviável TMA > TIR
2028	-R\$ 5.342.357,11	-R\$ 6.261.007,41	-14,70%	-581,54%	Projeto inviável TMA > TIR

Fonte: Elaboração própria

O Valor Presente Líquido (VPL), que representa a soma dos fluxos de caixa ao longo do horizonte de planejamento descontados por uma taxa de desconto (TMA), também é negativo em todos os anos analisados. Os valores de -R\$ 3.365.988,49 em 2024, -R\$ 4.489.291,02 em 2026 e -R\$ 6.261.007,41 em 2028 indicam que o projeto não gera valor suficiente para superar o custo de capital. Adicionalmente, a Taxa Interna de Retorno (TIR), que deveria ser positiva e superior à TMA para um projeto viável, é negativa, com -19,07% em 2024, -16,13% em 2026 e -14,70% em 2028, reforçando a falta de atratividade econômica.

A taxa de lucro negativa, que varia de -632,81% em 2024 a -581,54% em 2028, evidencia a ineficiência financeira do projeto, incapaz de gerar retornos suficientes para justificar o investimento. Além disso, o tempo de *payback* descontado não é alcançado dentro do horizonte de planejamento, pois a TMA supera a TIR em todos os casos analisados, significando que o projeto não consegue recuperar o investimento inicial em um período razoável, comprometendo sua viabilidade.

Esses resultados, embora preliminares, indicam a necessidade de revisões substanciais no projeto da biorrefinaria para melhorar sua viabilidade econômica. Ajustes nas premissas de custos, receitas e outras variáveis são essenciais para tornar o projeto mais atrativo. Uma análise de sensibilidade detalhada pode identificar os fatores críticos que impactam a viabilidade econômica e explorar possíveis cenários nos quais o projeto possa se tornar viável. Adicionalmente, considerar aspectos técnicos, ambientais e sociais é crucial para fornecer uma visão abrangente da sustentabilidade do projeto. Essa abordagem holística permitirá avaliar não apenas a viabilidade financeira, mas também os benefícios ambientais e sociais, contribuindo para a decisão final sobre a implementação da biorrefinaria.

6. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a viabilidade técnica e econômica da implementação de uma biorrefinaria voltada para o processamento de resíduos cítricos, com foco na produção de bioetanol, biogás e d-limoneno. A análise financeira revelou que o projeto, como originalmente proposto, enfrenta desafios econômicos substanciais, com resultados negativos para os principais indicadores financeiros. O Valor Presente Líquido (VPL) mostrou-se negativo em todos os cenários analisados (2024, 2026 e 2028), sugerindo que os fluxos de caixa projetados não são suficientes para cobrir os investimentos iniciais. A Taxa Interna de Retorno (TIR) também apresentou valores negativos, indicando que a rentabilidade esperada do projeto não é suficiente para superar a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Além disso, a taxa de lucro foi negativa, variando de -632,81% em 2024 para -581,54% em 2028, refletindo a ineficiência financeira do projeto. O tempo de *payback* descontado não foi alcançado dentro do horizonte de planejamento, apontando para a incapacidade do projeto de recuperar o capital investido em um período considerado razoável.

Em paralelo, foi realizada uma análise de viabilidade para a produção e comercialização independente de d-limoneno, considerando propostas de duas empresas da região. A primeira empresa apresentou uma proposta com custos fixos anuais de R\$ 250.000,00, sujeito a reajuste de 5% ao ano, além de custos operacionais com utilidades e operadores. A segunda empresa propôs um modelo de coparticipação, com um custo fixo de R\$ 100.000,00 por ano e 20% de participação nas receitas de vendas de d-limoneno. A primeira proposta oferece maior previsibilidade financeira a longo prazo, enquanto a segunda reduz os custos fixos iniciais, mas reduz a margem de lucro devido à participação nas receitas.

Apesar dos resultados desestimulantes para a biorrefinaria como um todo, a produção independente de d-limoneno mostrou-se promissora. A escolha entre as duas propostas para a produção de d-limoneno deve ser feita com base em uma análise detalhada dos riscos e benefícios, considerando o volume de vendas esperado e as condições do mercado.

Em conclusão, embora a implementação da biorrefinaria completa não seja viável sob as condições propostas, a produção de d-limoneno como alternativa independente se apresenta como uma oportunidade viável e estratégica. A análise de

sensibilidade para variáveis críticas, como custos de insumos e flutuações de mercado, é essencial para ajustar a estratégia de produção de d-limoneno. Uma abordagem mais focada e flexível pode não apenas viabilizar economicamente a operação, mas também contribuir para a sustentabilidade do projeto, gerando valor econômico e ambiental.

7. PERSPECTIVAS

Sugere-se que os futuros estudos se concentrem na reavaliação de alternativas que visem à obtenção mais eficiente dos bioprodutos considerados, com destaque especial para o biogás e o d-limoneno. Esse foco deve priorizar metodologias de extração capazes de maximizar o volume extraído dos resíduos cítricos, garantindo o máximo aproveitamento da matéria-prima. Além disso, considera-se relevante avaliar continuamente as atualizações nos valores de mercado desses produtos, possibilitando uma melhor adaptação às variações de preços e à demanda do mercado consumidor. Investimentos em tecnologias que incrementem o rendimento dos processos poderão não apenas aumentar a lucratividade do setor, mas também reduzir o impacto ambiental, em alinhamento com as práticas de economia circular e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, E.M.; DENNINSON, R.A.; SHAW, P.E. Effect of selected oil and essence volatile components on flavor quality of pump-out orange juice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.26, p.368-372, 1978.

ANANDARAMAN, S.; REINECCIUS, G.A. Stability of encapsulated orange peel oil. **Food Technology**, v.40, p.88-93, 1986.

ANDRADE JUNIOR, Milton Aurelio et al. Exploring future scenarios of ethanol demand in Brazil and their land-use implications. **Energy Policy**, v.134, n.110958, p.12, Nov. 2019.

AWAN, Almas Taj. Orange waste as a biomass for 2G-ethanol production. Campinas, 2013. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Estadual de Campinas.

BALABAN, M.O. et al. Enzyme inactivation by pressurized carbon dioxide. In: YALPANI, M. (Ed.). **Biotechnology, supercritical fluids, membranes and other advanced technologies for low-calorie, healthy food alternatives**. ATL Press, 1993. p.235-252.

BARBOSA, R. D.; CURTOLO, J. E. Produção industrial de suco e subprodutos cítricos. In: MATTOS, D. Jr. et al. (Ed.). **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundag, 2005.

BOVÉ, J. M. Huanglongbing: a destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. **Journal of Plant Pathology**, v.88, n.1, p.7-37, 2006.

BRADDOCK, R.J. By-products of citrus fruit. **Food Technology**, v.49, p.74-77, 1995.

CARVALHO, Felipe. PRÉ-TRATAMENTO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR POR AUTOHIDRÓLISE, COM ÊNFASE NA REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA. Brasília, 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Químicas e Biológicas) - Universidade de Brasília.

CHAUVEL, A.; FOURNIER, G.; RAIMBAULT, C. **Manual of Process Economic Evaluation**. Paris: Editions Technip, 2003.

CHEN, C.S.; JOHNSON, J.R. Pilot plant citrus juice evaporator for concentrate development and scale-up production. In: CONFERENCE OF FOOD

ENGINEERING, 4., West Lafayette. Proceedings... West Lafayette, 1995. p.192-196.

CHEN, Yike et al. Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products: Chapter 9: Citrus. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, United States, 2019, p.217-242.

CITRUSBR. Estatísticas de Processamento Industrial. [S.l.]: **CitrusBR**, [2023]. Disponível em: <https://citrusbr.com/estatisticas/processamento-industrial/>. Acesso em: 11 dez. 2023.

COHN, R.; COHN, A.L. The by-products of fruit processing. In: ARTHEY, D.; ASHURST, P.R. (Ed.). **Fruit processing**. London: Blackie Academic & Professional, 1996. p.196-220.

CROCKER, D.C.; PROTCHETT, D.E. Improved encapsulated citrus oils, modified matrix increases moisture resistance. **Food Technology**, v.32, p.36-39, 1978.

CYPRIANO, Daniela Zacharias. Biomassa de casca de laranja industrial como fonte de bioetanol e produtos de alto valor agregado. Campinas, 2015. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual de Campinas.

DEUS, R. M.; Battistelle, R. A. G.; Silva, G. H. R. Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.20, 2015.

Demirbas, A. Pyrolysis of municipal solid waste for energy and environmental benefits. **Energy Sources**, v.23, n.11, p.981-987, 2001.

DUGO, P. et al. Deterpenation of sweet orange and lemon essential oils with supercritical carbon dioxide using silica gel as an absorbent. **Flavor Fragrance Journal**, v.10, p.51-58, 1995.

FELLERS, P.J. Problems in sensory evaluation of citrus products. In: NAGY, S.; ATTAWAY, J.A. (Ed.). **Citrus nutrition & quality**, ACS Symp. Washington, DC.: American Chemical Society, 1980. (Series 143).

FUNDECITRUS. Safra de laranja 2022/23 é encerrada com produção total de 31,421 milhões de caixas. Disponível em: FUNDECITRUS. Safra de laranja 2022/23 é encerrada com produção total de 314,21 milhões de caixas. [S.l.]: **Fundecitrus**, [2023]. Disponível em: <https://www.fundecitrus.com.br/comunicacao/noticias/integra/safra-de-laranja-202223-e-encerrada-com-producao-total-de-31421-milhoes-de-caixas/1307>. Acesso em: 10 dez. 2023.

GHERARDI, S. et al. The use of ultrafiltration for the production of high-quality orange juice. **Fruit Processing**, v.2, p.164-166, 1992.

GOODNER, J.K. High-pressure processing of orange and grapefruit juices. 1998. Dissertation (Doctor of Philosophy) - University of Florida, UF, Gainesville.

HENDRIX JUNIOR, C.M.; HENDRIX, D.L. Specialty and by-products. In: REDD, J.B. et al. (Ed.). **Quality control manual for citrus processing plants**. Auburndale: AGScience, 1996. v.3, p.202-232.

HERNANDEZ, E. et al. Viscosity changes in orange juice after ultrafiltration and evaporation. **Journal of Food Engineering**, v.25, p.387-396, 1995.

JIA, M.; ZHANG, Q.H.; MIN, D.B. Pulsed electric field processing effects on flavor compounds and microorganisms of orange juice. In: Institute of Food Technologists Annual Meeting, Atlanta, 1998. 20D-4. (Paper).

JOHNSON, J.D.; VORA, J.D. Natural citrus essences. **Food Technology**, v.52, p.56, 1983.

KIMBALL, D.A. **Citrus processing**. Gaithersburg: Aspen Pub., 1999. 450p.
Marcotte, M.; Stewart, B.; Fustier, P. Abused thermal treatment impact on degradation products of chilled pasteurized orange juice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.46, p.1991-1996, 1998

MATTOS, D. et al. Características agronômicas dos citros. In: MATTOS, D. Jr. et al. (Ed.). **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundag, 2005.

MCMILLAN, J.D.; BAKER, J.O. Cellulose hydrolysis. In: MIELENZ, J.R. (Ed.). **Biomass conversion: methods and protocols**. Totowa: Humana Press, 2009. p.81-106.

MINTEER, S.D. **Alcoholic fuels**. Boca Raton: CRC Press, 2006.

NAGY, S.; WARDOWSKI, W.F.; SHAW, P.E. (Ed.). **Fruits of tropical and subtropical origin: composition, properties, and uses**. Lake Alfred: Florida Science Source, 1990.

OETTERER, M.; PRATI, P.; MELO, J.T. Tecnologia de alimentos de origem vegetal. **Engenharia de Alimentos**, v.10, p.112-117, 2006.

OJEDA, M. et al. Production of d-limonene by biotechnological processes: challenges and prospects. **Biotechnology Advances**, v.38, p.77-89, 2020.

PARDO, C.; ANDRADE, C. Citrus juice concentrate. In: DE LA ROSA, L.A.; ALVAREZ-PARRILLA, E.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G.A. (Ed.). **Fruit and vegetable phytochemicals: chemistry, nutritional value and stability**. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2010. p.391-408.

RATHORE, A. et al. Recycling of citrus peel waste for ethanol production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.41, p.503-515, 2015.
 REDD, J.B. et al. **Quality control manual for citrus processing plants**. Auburndale: AGScience, 1996.

SANTANA-MÉRIDA, J.A. et al. Valorization of citrus peel waste using microbial fermentation for ethanol production. **Food and Bioproducts Processing**, v.85, p.211-217, 2007.
 SHI, J.; MAGALHÃES, J. **Citrus bioactives: applications in functional foods**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

SILVA, A.P.G. Produção de etanol de segunda geração utilizando resíduos da cadeia cítrica. São Carlos, 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos.

SINCLAIR, W.B. **The biochemistry and physiology of the lemon and other citrus fruits**. Oakland: University of California, 1984.

SUGIYAMA, H.; YOKOYAMA, T.; FUJITA, T. Development of ethanol production system with supercritical fluid. **Energy**, v.26, n.2, p.149-160, 2001.

SWISHER, M.E.; MONTERROSO, J. Small-scale citrus juice processing. **Food Reviews International**, v.6, p.13-20, 1990.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TONIOLO, M.A. Estratégias de reaproveitamento de resíduos da indústria cítrica: estudo de caso. Campinas, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Estadual de Campinas.

UNCTAD. United Nations Conference on Trade and Development. World citrus juice market. Geneva, 2018. Disponível em: <https://unctad.org/publications>. Acesso em: 11 dez. 2023.

USDA. United States Department of Agriculture. Citrus: World Markets and Trade. Washington, 2023. Disponível em: <https://www.usda.gov/data-reports>. Acesso em: 11 dez. 2023.

VARGAS, A.G. Aproveitamento energético de resíduos sólidos industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.1098-1104, 2011.

WAUGH, D.L. Citrus grove management. **Journal of Citrus Science**, v.12, n.3, p.97-103, 2004.

YATES, B. New developments in citrus waste utilization. **Agricultural Waste Management**, v.45, p.44-55, 1982.

YOUSEFI, H.; LALH, M. Citrus processing for juice and by-products: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v.52, p.156-168, 2015.