

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Larissa Reducino Bezerra

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS DA LARANJA NA GERAÇÃO DE  
PRODUTOS COM MAIOR VALOR AGREGADO

São Carlos

2025

Larissa Reducino Bezerra

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS DA LARANJA NA GERAÇÃO DE  
PRODUTOS COM MAIOR VALOR AGREGADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Departamento de Engenharia Química da  
Universidade Federal de São Carlos para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Química.

Orientador: Prof. Dr. Diego Andrade Lemos

São Carlos

2025

Bezerra, Larissa Reducino

Valorização de resíduos agroindustriais da laranja na geração de produtos com maior valor agregado / Larissa Reducino Bezerra -- 2025.  
60f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos  
Orientador (a): Diego Andrade Lemos  
Banca Examinadora: Diego Andrade Lemos, Fábio Bentes Freire, Gustavo Dias Maia  
Bibliografia

1. Aproveitamento de resíduos agroindustriais. 2. Subprodutos do processamento da laranja. 3. Economia circular. I. Bezerra, Larissa Reducino. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliaram e aprovaram a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da candidata Larissa Reducino Bezerra, realizada em 08/12/2025:

---

**Orientador:** Prof. Dr. Diego Andrade Lemos  
DEQ - Universidade Federal de São Carlos

---

**Professor da disciplina:** Prof. Dr. Fábio Bentes Freire  
DEQ - Universidade Federal de São Carlos

---

**Convidado:** Prof. Dr. Gustavo Dias Maia  
DEQ - Universidade Federal de São Carlos

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu pai, à minha mãe e à minha irmã, que são as raízes que me sustentam e o chão que me impulsiona a voar, deixo meu agradecimento mais profundo.

## AGRADECIMENTO

Refletir sobre esses cinco anos de graduação é voltar a uma das fases mais desafiadoras e transformadoras da minha vida. Cada dificuldade virou aprendizado e cada conquista ganhou um significado especial. A UFSCar me entregou muito mais do que um diploma em Engenharia Química: foi o lugar onde cresci, amadureci e construí amizades. Encerrar esse ciclo desperta em mim uma gratidão enorme por tudo o que vivi e aprendi, tanto na parte técnica quanto na humana. Deixo aqui meu agradecimento a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa jornada e contribuíram para que este trabalho se tornasse possível.

À minha família, meu alicerce. Aos meus pais, Ana Paula e Edgar, pelo amor incondicional, pelo sacrifício e por acreditarem no meu potencial desde o início, além de serem minha fonte constante de alegria e suporte. Obrigada por cada palavra de apoio, por vibrar com minhas conquistas e por serem minha base em todos os momentos.

À minha irmã Anelise, obrigada por dividir a rotina em São Carlos comigo e por ser meu apoio mais próximo. Você, apesar de ser mais nova, me ensinou tanto no dia a dia e foi minha maior incentivadora nos momentos de cansaço e nas pequenas vitórias. Agradeço o companheirismo e por ser meu porto seguro.

Às minhas amigas da faculdade, sou grata por cada momento que compartilhamos, desde as longas horas de estudo até as festas e saídas que aliviaram nossa rotina. Obrigada pelas risadas que tornaram a vida mais leve e pelo apoio mútuo que nos permitiu crescer juntas. Esta conquista é, sem dúvida, nossa também.

Por fim, agradeço ao meu orientador Diego. Sua paciência e disponibilidade foram fundamentais para a condução desta pesquisa. Obrigada pela confiança depositada e pelos ensinamentos que levarei por toda a minha vida.

A todos, o meu mais sincero obrigada.

“A verdadeira sustentabilidade começa quando deixamos de ver resíduos e passamos a ver ciclos.”

(Ellen MacArthur)

## RESUMO

A indústria citrícola brasileira é líder mundial na produção e exportação de suco de laranja. No entanto, o processamento da fruta gera um volume expressivo de resíduos, como casca, semente e bagaço, que representam cerca de 50% da massa total, gerando um desafio ambiental e econômico. Atualmente, esse resíduo é majoritariamente convertido em *Citrus Pulp Pellets* (CPP), um subproduto de baixo valor agregado destinado à alimentação animal. Diante da necessidade de ampliar a eficiência do uso dessa biomassa e alinhar o setor aos princípios da economia circular, este trabalho avaliou rotas alternativas de valorização dos resíduos industriais da laranja, caracterizando a cadeia produtiva, descrevendo os resíduos gerados e analisando rotas tecnológicas baseadas em dados de mercado e literatura científica. A partir dessa avaliação, identificaram-se oportunidades relevantes na obtenção de pectina, etanol e biogás. Com base nesses dados, foi proposta uma configuração de biorrefinaria integrada ao processo já existente na indústria de suco, capaz de otimizar fluxos, reduzir perdas e aumentar a diversificação de produtos. Embora a análise econômica realizada considere apenas o valor potencial final dos coprodutos, sem incluir custos operacionais e de investimento, os resultados indicam que a valorização dos resíduos da laranja representa uma estratégia promissora para tornar a cadeia citrícola mais sustentável, inovadora e alinhada às demandas globais por processos industriais de baixo impacto ambiental.

**Palavras-chave:** Laranja; valorização de resíduos; indústria citrícola; biomassa; biorrefinaria integrada; *Citrus Pulp Pellets*; pectina; bioetanol; biogás; economia circular.

## ABSTRACT

Brazil's citrus industry is the global leader in orange juice production and exportation. However, fruit processing generates a significant amount of residues, such as peel, seeds, and pulp, which account for nearly 50% of the total mass, creating both environmental and economic challenges. Currently, these residues are largely converted into Citrus Pulp Pellets (CPP), a low value-added byproduct used as animal feed. Considering the need to improve biomass utilization efficiency and align the sector with circular economy principles, this study evaluated alternative routes for the valorization of orange processing residues by characterizing the production chain, describing the main waste streams, and reviewing technological pathways based on market data and scientific literature. The assessment identified relevant opportunities to produce pectin, ethanol and biogas. Based on these findings, an integrated biorefinery configuration was proposed, designed to complement the existing juice-processing infrastructure and optimize material flows, reduce losses and increase product diversification. Although the economic analysis considered only the potential market value of the resulting coproducts, without accounting for operational or capital costs, the results indicate that the valorization of orange residues represents a promising strategy to make the citrus chain more sustainable, innovative, and aligned with global demands for low-impact industrial processes.

**Keywords:** Orange; waste valorization; citrus industry; biomass; integrated biorefinery; Citrus Pulp Pellets; pectin; bioethanol; biogas; circular economy.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 01 – Maiores produtores de laranja do Brasil .....  | 17 |
| Figura 02 – Produção mundial de suco de laranja por país .....   | 18 |
| Figura 03 – Exportações brasileiras de suco de laranja em 2024.....  | 19 |
| Figura 04 – Exportações de suco de laranja pelo Brasil em volume de FCOJ e NFC<br>(toneladas) .....            | 22 |
| Figura 05 – Fluxograma geral do processamento industrial da laranja (toneladas) .....                          | 25 |
| Figura 06 – Visão anatômica do interior de uma laranja.....  | 26 |
| Figura 07 – Potenciais produtos derivados dos resíduos da laranja .....  | 27 |
| Figura 08 – <i>Pellets</i> de polpa cítrica ( <i>Citrus Pulp Pellets</i> ).....                                | 29 |
| Figura 09 – Fluxograma do processo de produção do CPP .....  | 30 |
| Figura 10 – Estrutura química da cadeia da pectina.....  | 32 |
| Figura 11 – Tendências do mercado mundial da pectina .....   | 33 |
| Figura 12 – Rendimento teórico de produtos e subprodutos da laranja .....                                      | 40 |
| Figura 13 – Proposta de integração das rotas de valorização de resíduos da laranja na<br>produção de CPP ..... | 47 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 01 – Maiores produtores de laranja do Brasil .....   | 21 |
| Tabela 02 – Terminologia utilizada na indústria cítrica .....   | 24 |
| Tabela 03 – Características dos principais artigos selecionados .....   | 42 |
| Tabela 04 – Estimativa de rendimento e valor econômico dos produtos obtidos a partir dos<br>resíduos da laranja ..... | 50 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAGED - Cadastro Geral de Empregados e Desempregados

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CITRUSBR - Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos

Comexstat - Secretaria de Comércio Exterior

CPP - *Citrus Pulp Pellets*

FCC - *Food Chemicals Codex*

FES - Fermentação em estado sólido

FCOJ - *Frozen Concentrated Orange Juice*

JECFA - Comitê Conjunto de Especialistas em Aditivos Alimentares

MMA - Ministério do Meio Ambiente

NFC - *Not From Concentrate*

PNRS - Plano Nacional de Resíduos Sólidos

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

WESOS - *Water Extracted Soluble Orange Solids*

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>2 OBJETIVO.....</b>  | <b>15</b> |
| 2.1 OBJETIVO GERAL.....   | 15        |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 15        |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>  | <b>16</b> |
| 3.1 CONTEXTO HISTÓRICO .....  | 16        |
| 3.2 MERCADO MUNDIAL .....   | 17        |
| 3.3 MERCADO NACIONAL .....  | 19        |
| 3.4 A INDÚSTRIA DE SUCO DE LARANJA .....  | 23        |
| 3.4.1 Principais produtos derivados da laranja .....                                      | 23        |
| 3.4.2 Panorama geral da produção de suco de laranja.....                                  | 23        |
| 3.5 LARANJA: SUBPRODUTOS E POSSÍVEIS USOS DE SEUS RESÍDUOS .....                          | 26        |
| 3.5.1 Citrus Pulp Pellets - CPP.....  | 29        |
| 3.5.2 Pectina.....  | 31        |
| 3.5.3 Biocombustíveis.....  | 36        |
| 3.6 IMPACTO AMBIENTAL E DESAFIOS NA GESTÃO DOS RESÍDUOS DA<br>LARANJA .....               | 37        |
| 3.7 POTENCIAL DE VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA LARANJA.....                                 | 39        |
| <b>4 METODOLOGIA.....</b>   | <b>41</b> |
| 4.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA .....  | 41        |
| 4.2 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS .....  | 41        |
| 4.3 SELEÇÃO DE CRITÉRIOS DE PESQUISA .....  | 41        |
| 4.4 ANÁLISE DAS ROTAS E PROPOSIÇÃO DE VALOR .....   | 44        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>44</b> |
| 5.1 JUSTIFICATIVA DA SELEÇÃO DAS ROTAS PRIORITÁRIAS .....                                 | 45        |
| 5.2 PROCESSOS INTEGRADOS (BIORREFINARIA).....   | 46        |
| 5.3 ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLES .....   | 49        |
| 5.4 A DOMINÂNCIA DO CPP: UMA ANÁLISE CRÍTICA DA VALORIZAÇÃO DOS<br>RESÍDUOS CÍTRICOS..... | 52        |
| <b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>  | <b>54</b> |
| <b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>56</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria citrícola desempenha papel estratégico na economia global, sendo os citros as frutas mais produzidas em escala mundial, com destaque para a laranja (VIDAL, 2024). Na safra 2024/25, a produção mundial de laranja alcançou 45,2 milhões de toneladas, enquanto o Brasil liderou a produção global, com 13 milhões de toneladas, representando 29% do total (USDA, 2025). Seu cultivo pode ser destinado à comercialização *in natura*, sendo vendida como fruta fresca, ou às indústrias de processamento, onde é selecionada e espremida para extração de suco. No país, mais de 90% da produção da fruta é destinada à indústria de suco, representando 53% do total mundial desse produto, o que reforça sua relevância no setor (CITRUSBR, 2023).

Nesse sentido, a produção de laranja ocupa posição de destaque na agricultura brasileira, sendo o Brasil o maior produtor mundial da fruta e responsável por cerca de 70% da produção global de suco de laranja concentrado e congelado (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil - CNA, 2019). Apenas o estado de São Paulo representa mais de 75% da produção nacional, demonstrando a relevância socioeconômica da citricultura para o país (SILVA et al., 2020).

Em contrapartida, o processamento da fruta gera um volume expressivo de resíduos, como casca, semente e bagaço, que representam cerca de 50% da fruta, gerando um desafio ambiental e econômico (SUZUKI, 2019). Atualmente, grande parte desses resíduos ainda é destinada a usos de baixo valor agregado, como a produção de farelo de polpa cítrica (*Citrus Pulp Pellets* - CPP), usado na ração de ruminantes como suplemento (CYPRIANO et al., 2017). Por outro lado, esses resíduos apresentam elevado potencial para geração de produtos de maior valor agregado, uma vez que podem constituir alternativas promissoras como matérias-primas para atender a diferentes setores industriais (ANDRADE et al., 2018), incluindo o alimentício, o químico e o energético (PORTO et al., 2021).

No contexto da economia circular, o avanço de tecnologias sustentáveis impulsiona a transformação de resíduos agroindustriais em insumos, agregando valor e reduzindo impactos ambientais (RIBEIRO; ALMEIDA, 2021). Pesquisas demonstram, por exemplo, a viabilidade do uso de resíduos da laranja na produção de alimentos funcionais, bioenergia e outros materiais (FERREIRA et al., 2020). Essa valorização depende de uma caracterização detalhada de seus componentes, o que viabilizou o surgimento de indústrias especializadas no processamento de subprodutos para gerar novas aplicações e valor, como a biorrefinaria (OBEROI et al., 2010).

Ela é definida como uma instalação industrial que integra processos de conversão de biomassa para gerar combustíveis, energia e produtos químicos de alto valor (OBEROI et al.,

2010). Ao aproveitar os diferentes componentes da biomassa da laranja e seus intermediários para a produção de múltiplos subprodutos, esse tipo de indústria maximiza o valor do material e diminui significativamente a quantidade de resíduos produzidos (OLIVEIRA, 2016).

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo investigar e propor alternativas de valorização dos resíduos gerados pela cadeia produtiva da laranja, buscando seu aproveitamento sustentável na fabricação de produtos com maior valor agregado. Considerando o crescente interesse por práticas ambientais responsáveis e economia circular, o estudo aborda técnicas e processos que permitem transformar subprodutos, como cascas e bagaços, em matérias-primas para indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica.

A pesquisa inclui a análise das propriedades químicas dos resíduos, metodologias de extração de compostos bioativos e uma análise econômica simples dos produtos finais. Os resultados indicam que a reutilização dos resíduos da laranja não só contribui para a redução do impacto ambiental, mas também gera novas oportunidades de negócio, agregando valor e promovendo a sustentabilidade no setor agroindustrial.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar rotas e alternativas para a valorização dos resíduos gerados no processamento da laranja no Brasil, com foco na produção de insumos de maior valor agregado, por meio do uso de metodologias e estudos que permitam identificar as opções mais promissoras e contribuir para a integração da cadeia citrícola aos princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar a cadeia produtiva da laranja no Brasil e sua relevância no mercado internacional e nacional, com ênfase no volume de produção e no papel da indústria de suco.
- Qualificar e descrever os principais resíduos gerados no processamento industrial da laranja, destacando suas características gerais e principais formas de aproveitamento.
- Revisar e sistematizar rotas alternativas de valorização desses resíduos a partir de literatura científica e dados de mercado.
- Identificar oportunidades estratégicas de diversificação e inovação na cadeia citrícola a partir da incorporação de tecnologias de reaproveitamento de resíduos.
- Realizar análise comparativa do potencial econômico dos subprodutos, considerando valores finais de mercado e perspectivas de aplicação industrial.
- Avaliar os impactos ambientais associados às rotas de valorização, destacando benefícios relacionados à redução de resíduos e à economia circular.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 CONTEXTO HISTÓRICO

A citricultura, com destaque para a laranja (gênero *Citrus*), representa um dos pilares do agronegócio brasileiro. Registros históricos e botânicos indicam que as laranjas se originaram no sudeste da Ásia, em uma região que abrange o sul da China, a Índia e a Indochina, há aproximadamente 4.000 anos (WEBBER, 1967), cuja disseminação pelo mundo ocorreu gradualmente, impulsionada por rotas comerciais e conflitos. A chegada ao continente americano, por sua vez, foi um marco significativo, ocorrendo por volta do ano 1500, no contexto das Grandes Navegações (NEVES et al., 2014).

No Brasil, as frutas cítricas foram trazidas logo após a chegada dos portugueses, no século XVI. Por volta de 1530, foram introduzidas as primeiras sementes de laranja doce, nos estados da Bahia e de São Paulo. Embora a fruta seja adaptável a diversos tipos de solo, a produtividade é otimizada em solos de textura média, caracterizados por um equilíbrio textural entre areia, silte e argila, o que promove boa aeração, drenagem adequada e eficiente retenção de nutrientes, além de apresentarem boa fertilidade e acidez moderada (PASSOS, 1990). A ocorrência dessas características, em conjunto com condições climáticas favoráveis no território brasileiro, proporcionou o pleno desenvolvimento da cultura, consolidando o país como um dos principais produtores mundiais no segmento (DONADIO et al., 2005).

Já a indústria brasileira de citros consolidou-se no mercado internacional após as geadas que provocaram perdas significativas na produção da Flórida ao longo das décadas de 1970, 1980 e 1990. Tal conjuntura favoreceu a expansão das exportações brasileiras de suco de laranja para os mercados europeu e norte-americano (ALCANTARA, 2017). Como resultado, o Brasil tornou-se um fornecedor alternativo importante, o que impulsionou a criação de pequenas indústrias de processamento no interior do estado de São Paulo (HASSE, 1987).

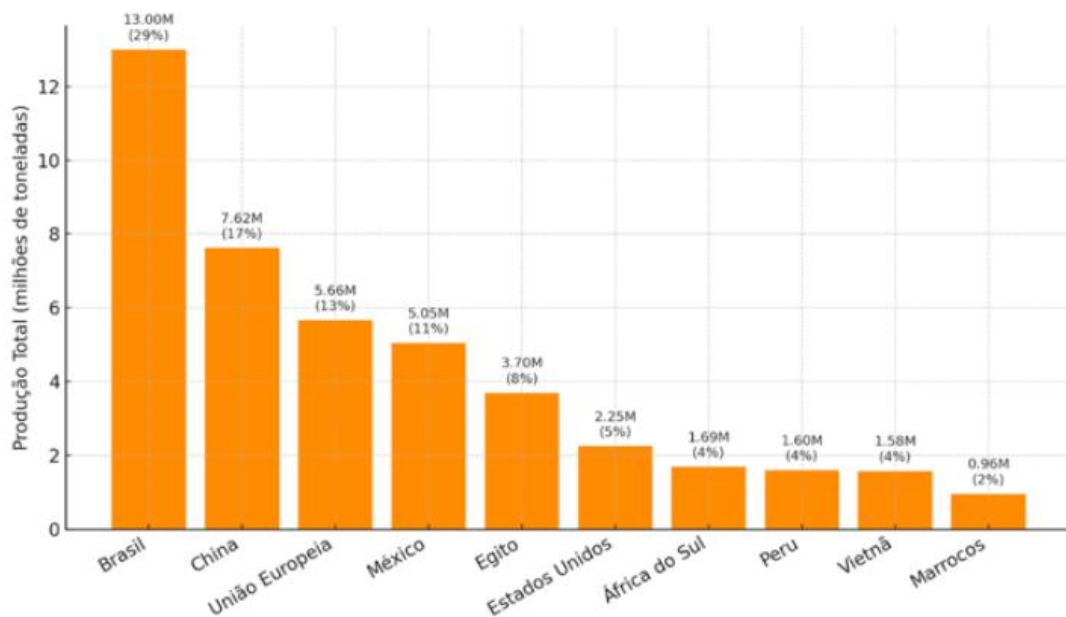
Assim, na década de 1980, o país consolidou-se como o maior produtor mundial de laranja, superando os Estados Unidos. Desde então, ele detém a hegemonia no mercado global, posicionando-se como o maior produtor mundial de laranja e o principal produtor e exportador de suco de laranja, respondendo por uma parcela majoritária do comércio internacional do produto (FAO, 2024).

### 3.2 MERCADO MUNDIAL

De acordo com dados da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), a produção mundial de laranja na safra 2024/2025 foi estimada em aproximadamente 45,2 milhões de toneladas. Observa-se, entretanto, que a produção global apresentou queda de 4% em comparação à última década e redução de 1% em relação à safra anterior, que totalizou 45,8 milhões de toneladas (USDA, 2025).

Nesse sentido, o mercado mundial de laranja apresenta grande concentração produtiva, sendo o Brasil o principal produtor global na safra 2024/2025, com aproximadamente 13 milhões de toneladas, o que representa 29% da produção mundial da fruta (Figura 01). Essa expressiva participação reforça a posição consolidada do país como líder do setor citrícola, impulsionado por fatores como clima favorável, extensas áreas cultiváveis e alto nível tecnológico nas etapas de cultivo, colheita e processamento. Na sequência, destacam-se China e União Europeia, com produções estimadas em 7,62 milhões (17%) e 5,66 milhões de toneladas (13%), respectivamente, seguidos por México, Egito e Estados Unidos.

Figura 01 - Principais produtores mundiais de laranja na safra 2024/2025

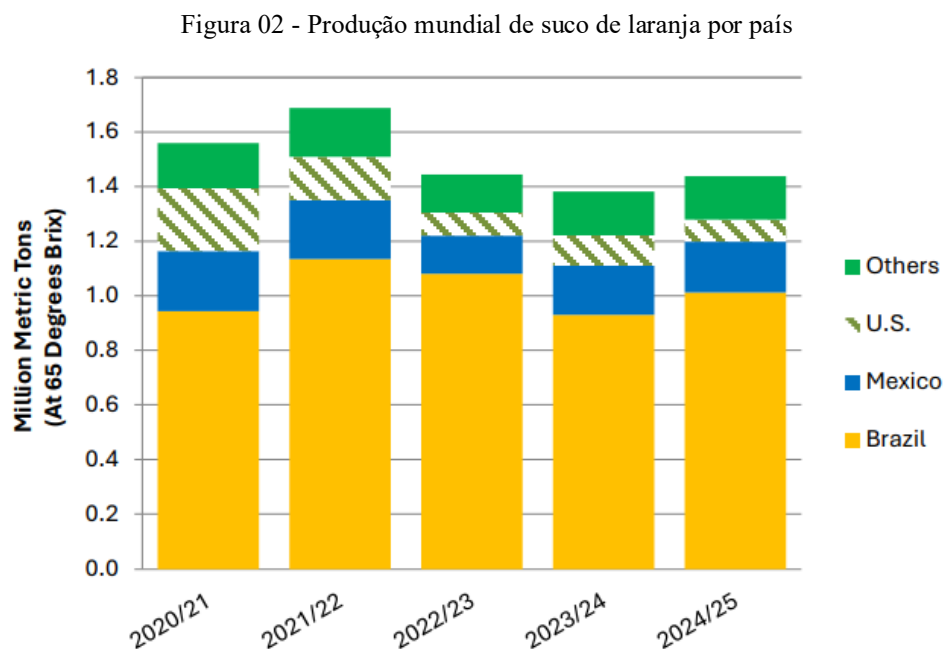


Fonte: Adaptado de USDA (*United States Department of Agriculture*), 2025

A distribuição da produção mundial demonstra que a citricultura está concentrada em países de clima tropical e subtropical, onde as condições de temperatura, luminosidade e regime pluviométrico são mais favoráveis ao cultivo da laranja (PASSOS et al., 2018; SILVA-DE PAULA et al., 2022). Nessas regiões, o cultivo é adaptado às condições ambientais que

proporcionam elevado rendimento e qualidade dos frutos, com destaque para o Brasil e países do Mediterrâneo (NEVES et al., 2011). Assim, a produção é voltada tanto para o consumo *in natura* quanto para o processamento industrial, principalmente para a obtenção de suco de laranja e seus derivados, principais destinações comerciais da fruta (YANG; WANG, 2025).

Além disso, o Brasil é o maior produtor de suco de laranja, com aproximadamente 60% da produção (FAO, 2024). A Figura 02 apresenta a produção mundial de suco, estratificada por país, para o período compreendido entre as safras de 2020/21 e 2024/25. Os dados, expressos em milhões de toneladas métricas, evidenciam a hegemonia do Brasil como o maior produtor global, bem como as variações significativas na produção de outros países relevantes, como México e Estados Unidos.



Fonte: USDA (2025)

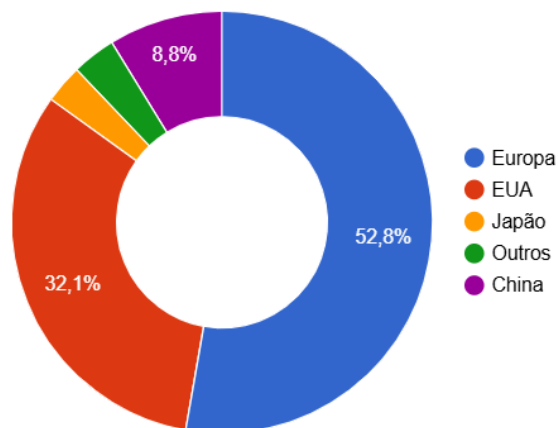
A análise do mercado mundial de laranja evidencia um cenário marcado por uma sutil retração na oferta global e uma acentuada concentração produtiva. A hegemonia do Brasil se mostra como o fator determinante deste mercado, com o país liderando de forma expressiva tanto a produção da fruta *in natura* quanto a industrialização e exportação de suco de laranja. Conclui-se que a dinâmica de preços e a segurança do abastecimento global de citros são intrinsecamente dependentes do desempenho da safra brasileira.

### 3.3 MERCADO NACIONAL

Em relação ao mercado nacional, o Brasil apresenta forte vocação agrícola, resultado de condições climáticas favoráveis, amplas áreas de terras cultiváveis e constantes investimentos em inovação tecnológica (EMBRAPA, 2023). Essa combinação de fatores contribui para o fortalecimento da competitividade do agronegócio nacional, especialmente na cadeia produtiva da citricultura. O setor citrícola brasileiro consolidou-se como um dos mais desenvolvidos e tecnicamente avançados do mundo, posicionando o país como líder global na produção de laranja desde a década de 1980 (NEVES et al., 2010). Em períodos subsequentes, a redução expressiva da produção na Flórida, nos Estados Unidos, resultou em elevação dos preços do suco e da fruta no mercado internacional, o que impulsionou ainda mais a produtividade, a eficiência e o desempenho econômico da citricultura brasileira (NEVES et al., 2010).

O Brasil também é responsável por 75% das exportações mundiais do produto. Ou seja, de cada quatro copos de suco de laranja consumidos no mundo, três são produzidos nas fábricas brasileiras e, além disso, o suco de laranja é a bebida de frutas mais consumida no mundo, com 35% de participação entre os sucos (NEVES, et al., 2010). A Figura 03 ilustra a distribuição percentual dos destinos das exportações brasileiras do produto em 2024.

Figura 03 - Exportações brasileiras de suco de laranja em 2024



Fonte: CitrusBR (2024)

A análise do gráfico evidencia uma acentuada concentração das vendas externas em dois mercados principais, que juntos absorvem a vasta maioria do produto nacional. O continente europeu destaca-se como o principal importador, sendo destino de 52,8% do volume total exportado, o que representa mais da metade de todo o suco de laranja comercializado pelo Brasil no cenário internacional. Em segunda posição, os Estados Unidos consolidam-se como um mercado estratégico, respondendo por 32,1% das exportações. A soma da participação da

Europa e dos EUA atinge 84,9%, revelando uma forte dependência do setor citrícola brasileiro em relação a esses dois mercados consolidados.

O restante das exportações é distribuído entre outros parceiros comerciais, com destaque para a China, que figura como um destino relevante ao importar 8,8% do suco brasileiro. Dessa forma, os dados demonstram a estrutura do comércio exterior do suco de laranja brasileiro, caracterizada pela hegemonia dos mercados europeu e norte-americano, mas com uma participação crescente e notável de mercados asiáticos.

Além de sua expressiva relevância no cenário internacional, a citricultura brasileira também exerce papel fundamental na economia nacional, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento socioeconômico de diversas regiões produtoras. Isso porque a atividade citrícola representa uma importante fonte de geração de renda aos produtores rurais, além de promover arrecadação tributária, criação de empregos diretos e indiretos e fortalecimento do setor agroindustrial brasileiro (KALAKI; NEVES, 2017). De acordo com dados do CAGED (Cadastro Geral de Empregados e Desempregados), a citricultura foi, em 2015, o segmento do agronegócio com o maior número de admissões no país, evidenciando sua relevância como geradora de empregos e impulsionadora da economia.

O estado de São Paulo é o principal produtor de laranja, respondendo por mais de 78% do total colhido no Brasil em 2024 (IBGE, 2024), conforme demonstra a Tabela 01. Devido à alta concentração produtiva na região paulista, o local denominou-se como cinturão citrícola, o qual compreende o Estado de São Paulo e o Triângulo Mineiro/Sudoeste (GUERREIRO NETO, 2019). A região reúne condições favoráveis, como solo adequado e fértil, clima ótimo na maior parte do ano e mão de obra qualificada, além da existência de vários institutos de pesquisa dedicados a encontrar soluções para a prevenção de doenças e o aprimoramento da qualidade da fruta.

Tabela 01 - Maiores produtores de laranja do Brasil

| <b>Mercado</b>    | <b>Produção Total (t)<br/>(2024/2025)</b> | <b>Participação na produção brasileira</b> |
|-------------------|---|--|
| São Paulo         | 13.643.857                                | 78,24%                                     |
| Minas Gerais      | 1.126.858                                 | 6,46%                                      |
| Paraná            | 735.808                                   | 4,22%                                      |
| Bahia             | 610.084                                   | 3,50%                                      |
| Sergipe           | 394.859                                   | 2,26%                                      |
| Rio Grande do Sul | 331.872                                   | 1,90%                                      |
| Pará              | 257.176                                   | 1,47%                                      |
| Goiás             | 173.400                                   | 0,99%                                      |
| Alagoas           | 97.741                                    | 0,56%                                      |
| Rio de Janeiro    | 65.916                                    | 0,38%                                      |

Fonte: Adaptado de IBGE, 2024

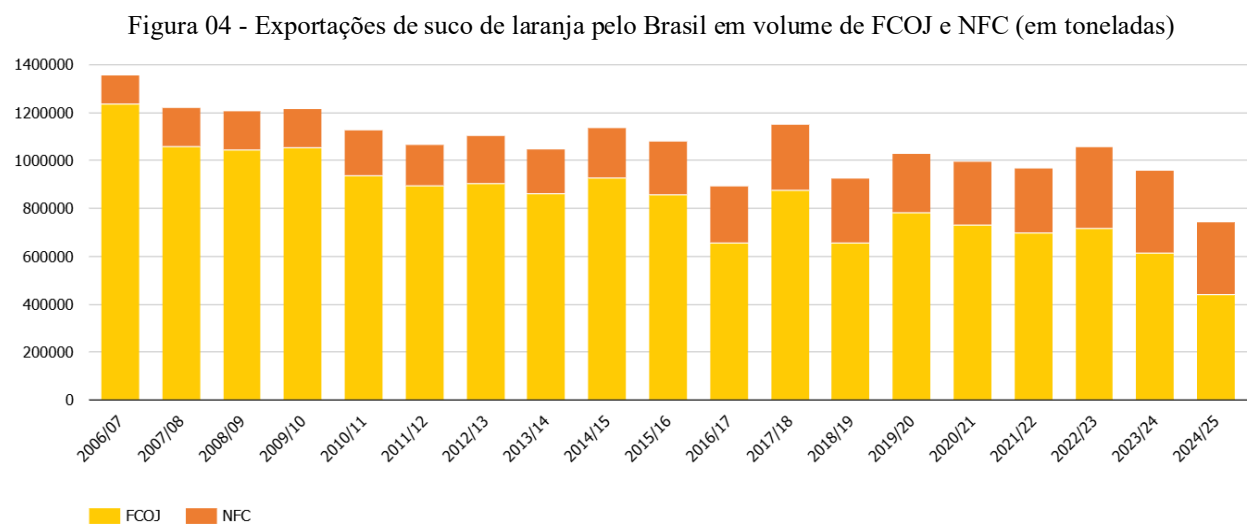
O fechamento da safra de laranja 2024/25 do cinturão citrícola de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro foi de 230,87 milhões de caixas de 40,8 kg, representando queda de 24,85% em relação à safra anterior, que totalizou 307,22 milhões de caixas. Já a primeira estimativa da safra 2025/26 aponta crescimento de 36% na produção, com projeção de 306,74 milhões de caixas, o que poderá restaurar o equilíbrio do setor após anos de escassez e pressão nos preços internacionais (FUNDECITRUS, 2025).

A maior parte da produção de laranja no país é destinada ao processamento industrial, reforçando o papel do Brasil como líder mundial na produção e exportação de suco de laranja. De acordo com dados da Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos (CITRUSBR), na safra 2024/25 aproximadamente 90% da produção foi direcionada à indústria, enquanto apenas uma pequena parcela foi destinada ao consumo *in natura* (CITRUSBR, 2025). Essa predominância industrial influencia diretamente a organização das propriedades rurais citrícolas, que são estruturadas com foco no atendimento das demandas da indústria de processamento, priorizando volume, padronização e regularidade na oferta de frutos (ITO, 2014).

Já em relação ao volume de suco de laranja exportado, segundo dados da Comexstat (Secretaria de Comércio Exterior), em equivalente concentrado (66° Brix), foi o menor de toda

a série histórica iniciada em 1997. Em contrapartida, a receita obtida com os embarques atingiu um recorde, refletindo a valorização da *commodity* diante da oferta restrita. Essa limitação na produção de laranjas, especialmente de frutos com padrão adequado de qualidade, comprometeu a capacidade da indústria em produzir sucos compatíveis com as exigências do mercado internacional, mas a redução na disponibilidade de matéria-prima impactou diretamente o volume exportado e contribuiu para o aumento dos preços globais do produto.

Nesse contexto, no acumulado da safra 2024/25, o Brasil exportou 776,78 mil toneladas de suco de laranja, conforme a Figura 04, valor 22,7% inferior ao registrado na safra anterior. Apesar da expressiva queda em volume, a elevação dos preços resultou em um crescimento de 28,4% na receita total, que alcançou US\$ 3,48 bilhões, configurando o maior montante já registrado. Esse cenário evidencia um contraste entre o aumento da rentabilidade e a retração do consumo, influenciada tanto pelos preços mais altos quanto pela menor tolerância dos mercados à baixa qualidade do produto (Comexstat, 2025).



Fonte: CitrusBR (2025)

Dessa forma, o mercado nacional de laranja demonstra a consolidação do Brasil como principal produtor e exportador mundial de suco, sustentado por condições edafoclimáticas favoráveis, infraestrutura tecnológica avançada e disponibilidade de mão de obra qualificada (GUERREIRO NETO, 2019). Em suma, a citricultura brasileira de laranja apresenta elevada competitividade internacional, combinando relevância econômica, social, tecnológica e estratégica, consolidando-se como um componente central do agronegócio nacional.

### **3.4 A INDÚSTRIA DE SUCO DE LARANJA**

#### **3.4.1 Principais produtos derivados da laranja**

Segundo a legislação brasileira, o suco de laranja é tecnicamente definido como a bebida não fermentada, obtida da parte do endocarpo do fruto maduro e sadio da laranja (*Citrus sinensis*), por meio de processo tecnológico adequado, submetida a tratamento que assegure a sua apresentação e conservação até o momento do consumo. Conforme as boas práticas de fabricação, o produto não deve conter substâncias estranhas à fruta, excetuando-se as previstas em legislação específica, sendo vedada a adição de aromas e corantes artificiais que não sejam os naturais da própria fruta (GONÇALVES, 2019).

No mercado global, o suco de laranja é comercializado predominantemente em duas formas distintas: o suco integral, conhecido como *Not From Concentrate* (NFC), que não sofre adição de açúcares e mantém sua concentração natural, e o suco de laranja concentrado e congelado, ou *Frozen Concentrate Orange Juice* (FCOJ), que passa por um processo de evaporação para remoção de parte da água, o que facilita sua logística e armazenamento (NEVES et al., 2010).

Além desses dois produtos principais, o processamento da laranja gera alguns coprodutos, como as *Frozen Cells* (células de laranja congeladas), que são as vesículas de polpa recuperadas durante a extração e que podem ser reincorporadas ao suco para conferir textura, e o WESOS (*Water Extracted Soluble Orange Solids*), um extrato aquoso dos sólidos solúveis da laranja, utilizado para padronizar o produto final ou como aditivo em outras bebidas, otimizando assim o aproveitamento integral da matéria-prima (UMANÃ et al., 2024).

#### **3.4.2 Panorama geral da produção de suco de laranja**

A agroindústria brasileira de suco de laranja ocupa uma posição de destaque no cenário mundial, e a maior parte do setor industrial está concentrada no estado de São Paulo, região que também lidera o cultivo da fruta no país. A complexidade desse tipo de indústria reside não apenas no volume de produção, mas também nas particularidades da matéria-prima e nos elevados padrões de qualidade impostos pelo mercado, tornando o planejamento da produção uma atividade estratégica e de alta complexidade (MUNHOZ; MORABITO, 2010).

Para melhor entendimento do processo, a Tabela 02 apresenta a terminologia relacionada utilizada na indústria cítrica.

Tabela 02 - Terminologia utilizada na indústria cítrica

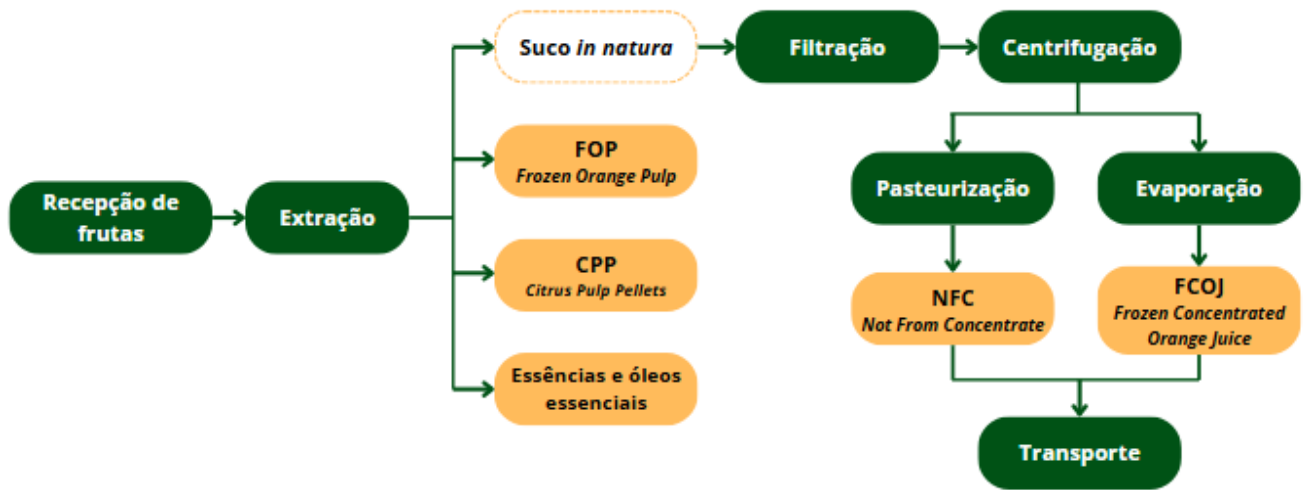
| <b>Caixa de fruta</b> | <b>Equivalente a 40,8 kg</b>  |
|-----------------------|---|
| Brix                  | Refere-se à porcentagem de sólidos solúveis ou açúcares e ácidos, sendo quantificado em graus brix por meio de refratômetro. O refratômetro é um instrumento utilizado para medir o índice de refração de soluções.   |
| Acidez                | Depois dos açúcares, os ácidos são os sólidos solúveis presentes em maior quantidade no suco. O teor de ácidos é determinado por titulação.   |
| <i>Ratio</i>          | É a relação brix/acidez e fornece o grau de maturação e qualidade do suco.  |
| Variedade             | As variedades de laranja Pera, Natal e Valência são as mais indicadas para a industrialização, enquanto a variedade Hamlin, por ser mais precoce, permite que a fábrica opere economicamente no início da safra, mas fornece um suco de qualidade inferior e de pouca aceitação no mercado. |

Fonte: Adaptado de (MUNHOZ; MORABITO, 2010)

O planejamento da produção neste setor é influenciado pela sazonalidade e pela variabilidade da matéria-prima. As características da laranja, como o teor de açúcar e a acidez, modificam-se ao longo da safra de acordo com as curvas de maturação de cada variedade. A acidez, por exemplo, tende a ser mais elevada no início da colheita e a diminuir com o avanço da maturação. Esta flutuação natural impacta diretamente a capacidade de se atingir o ratio especificado no produto final exigindo um planejamento que harmonize as decisões de colheita com as de processamento e estocagem (SOMBRA, 2018).

O processo produtivo do suco de laranja envolve diversas etapas interligadas, desde o cultivo e colheita até o processamento industrial e o armazenamento do produto final. O cultivo da laranja é caracterizado pela necessidade de manejo cuidadoso, que inclui controle fitossanitário, irrigação adequada e monitoramento da maturação dos frutos (MATTOS JUNIOR et al., 2005). Após a colheita, os frutos são transportados para as indústrias processadoras, onde passam por seleção, lavagem, extração e pasteurização (FELLOWS, 2009). A maior parte da produção destina-se à fabricação de suco concentrado congelado (FCOJ), embora o suco não concentrado (NFC) tenha ganhado relevância nos últimos anos devido à crescente demanda por produtos com menor grau de processamento (PALMIERI, 2018). A Figura 05 a seguir mostra um fluxograma geral do processo na indústria.

Figura 05 - Fluxograma geral do processamento industrial da laranja



Fonte: Adaptado de CITROSUCO (2018)

A cadeia produtiva geral do processamento da laranja se inicia com a recepção da fruta transportada do campo para a unidade de processamento. A primeira etapa é a extração, que visa separar a fração líquida (suco *in natura*) dos componentes sólidos, como cascas e bagaço. Este suco primário segue então para uma sequência de etapas de purificação, incluindo a filtração e a centrifugação, responsáveis pela remoção de partículas como sementes, membranas e excesso de polpa. Após esta fase, o processo se bifurca em duas linhas de produção principais.

Uma parte do suco é pasteurizada para produção de suco não concentrado (NFC), enquanto a outra parte é direcionada para evaporadores, onde uma grande fração de água é removida para gerar o suco de laranja concentrado congelado (FCOJ), resultando em um produto com alto teor de sólidos solúveis (°Brix). Este processo não só aumenta a vida útil do suco, mas também otimiza a logística de armazenamento e transporte. Ao final, ambos são acondicionados em tambores ou tanques de grande volume (a granel) e distribuídos para os mercados consumidores.

Por fim, há a possibilidade de uma outra etapa: a de mistura (*blending*), de fundamental importância para a padronização do produto. Nesta fase, sucos de diferentes lotes e variedades de laranja são combinados para atingir as especificações de qualidade demandadas pelos clientes. O parâmetro de controle mais crítico é o *ratio*, e a correta formulação das misturas é importante para garantir a consistência do sabor e da qualidade do produto final que será comercializado (CITROSUCO, 2018).

É importante destacar que, nos últimos anos, o setor passou por transformações impulsionadas por avanços tecnológicos e por uma maior preocupação com a sustentabilidade.

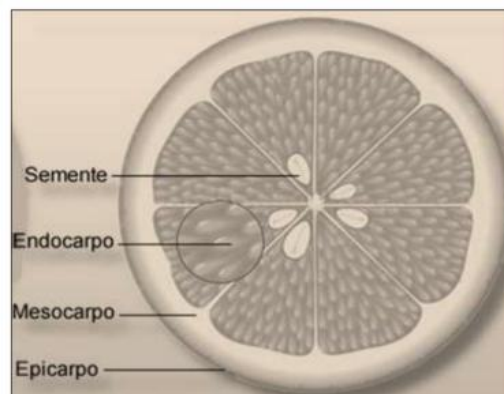
As indústrias têm adotado sistemas automatizados de controle de qualidade, rastreabilidade e otimização energética (NEVES; TROMBIN, 2020).

Além dos produtos principais, fica evidente que a industrialização da laranja se caracteriza pelo aproveitamento integral da matéria-prima, indo além da produção de apenas suco. Já na etapa inicial de extração, são gerados subprodutos que diversificam as fontes de receita da indústria. Dentre eles, destacam-se a polpa de laranja congelada (FOP) e os *pellets* de polpa cítrica, amplamente utilizados na fabricação de ração animal, além das essências e óleos, que servem como insumo para as indústrias de alimentos, bebidas, cosméticos e fragrâncias.

### 3.5 LARANJA: SUBPRODUTOS E POSSÍVEIS USOS DE SEUS RESÍDUOS

A laranja (*Citrus sinensis*) é uma das espécies frutíferas de maior relevância econômica e ampla distribuição geográfica, caracterizando-se por uma morfologia composta por epicarpo, mesocarpo, endocarpo e sementes (BENELLI, 2010). O mesocarpo, também denominado albedo, consiste em uma matriz esponjosa de coloração esbranquiçada, constituída majoritariamente por compostos fenólicos do grupo das flavanonas, responsáveis pelo sabor amargo, e por pectinas, que conferem propriedades reológicas e espessantes ao suco. Subjacente a essa camada, localizam-se os segmentos do fruto, formados por vesículas de suco envoltas por membranas celulósicas que compõem o endocarpo (QUEIROZ; MENEZES, 2005). O epicarpo, ou pericarpo externo, apresenta elevada concentração de pigmentos carotenoides, responsáveis pela coloração alaranjada do fruto maduro, além de conter limoneno e outros constituintes voláteis que compõem os óleos essenciais, determinando o aroma e o sabor característicos da espécie (QUEIROZ; MENEZES, 2005). A estrutura anatômica do fruto é ilustrada na Figura 06 abaixo.

Figura 06 - Visão anatômica do interior de uma laranja



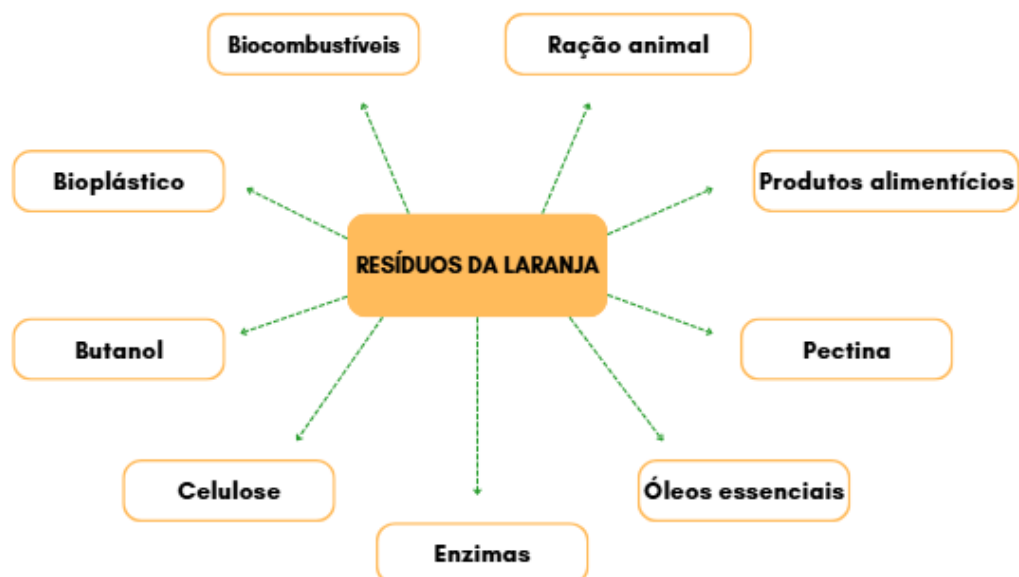
Fonte: BENEVIDES (2015)

A composição química dos subprodutos da laranja é notavelmente rica e diversificada, o que a torna uma matéria-prima com grande potencial para diversas aplicações industriais. O bagaço, principal componente do resíduo, é constituído majoritariamente por polissacarídeos como a pectina, celulose (aproximadamente 33,1%) e hemicelulose (5,4%), que servem como precursores para a produção de biocombustíveis e biopolímeros (MITSUHARA et al., 2025). Além disso, a casca da laranja é uma fonte abundante de compostos bioativos, como flavonoides, com destaque para a hesperidina, polifenóis, carotenoides e vitaminas. O óleo essencial extraído da casca, cujo principal componente é o D-limoneno, possui vasto emprego como aromatizante e solvente biodegradável (CYPRIANO et al., 2017).

O processamento industrial da laranja, majoritariamente focado na extração de suco, gera volumes expressivos de resíduos sólidos, conhecidos como bagaço de citros (incluindo casca, polpa e sementes), que podem representar até 50% da massa total da fruta processada, constituindo um desafio logístico e ambiental significativo para a indústria. Contudo, este resíduo é uma matéria-prima de alto potencial para a implementação de biorrefinarias, visando a valorização integral da biomassa (CIRIMINNA et al., 2019).

A Figura 07 exemplifica esquematicamente o conceito de biorrefinaria aplicado aos resíduos da laranja, demonstrando um leque diversificado de produtos de valor agregado que podem ser obtidos. Esta abordagem integrada permite o fracionamento e a conversão dos diversos componentes bioquímicos presentes no resíduo, seguindo um princípio de aproveitamento em cascata.

Figura 07 - Potenciais produtos derivados dos resíduos da laranja



Fonte: Autoria própria

Inicialmente, destacam-se os compostos de extração direta. A fração do flavedo (parte colorida da casca) é rica em óleos essenciais, cujo principal componente é o D-limoneno, um terpeno de vasta aplicação industrial como solvente biodegradável, agente de sabor e fragrância. Paralelamente, a fração do albedo (parte branca) é uma fonte primária de pectina, sendo um hidrocoloide de alto valor comercial e amplamente utilizado como agente gelificante, espessante e estabilizante em geleias, doces e laticínios (CYPRIANO et al., 2017).

Ainda no âmbito da indústria alimentícia, as aplicações são vastas e promissoras. A incorporação da farinha ou do pó da casca de laranja em produtos de panificação, como pães, bolos e biscoitos, não apenas agrega valor nutricional, enriquecendo-os com fibras dietéticas e compostos bioativos, mas também atende a uma crescente demanda dos consumidores por alimentos mais saudáveis e sustentáveis (CIRRINCIONE et al., 2024). Já no setor de materiais avançados e química verde, as fibras lignocelulósicas presentes no bagaço podem ser empregadas como agente de reforço em compósitos poliméricos, conferindo maior resistência mecânica e propriedades de isolamento a materiais plásticos, que podem ser utilizados na indústria automobilística e de construção civil (MAGAJI et al., 2023).

Uma rota tecnológica de ainda maior valor agregado é a extração de nanocelulose, um material de fronteira com propriedades excepcionais de resistência e leveza, com potencial de aplicação em áreas que vão desde embalagens inteligentes até a medicina regenerativa (CYPRIANO et al., 2017). Após a extração desses compostos de alto valor, a biomassa sólida remanescente, rica em carboidratos (celulose, hemicelulose e açúcares solúveis) e fibras, possui destinos tradicionais, como a secagem para a formulação de ração animal, notadamente para ruminantes, devido ao seu valor energético (BAMPIDIS; ROBINSON, 2006).

O potencial de valorização, entretanto, expande-se significativamente através de rotas biotecnológicas. A fração lignocelulósica pode ser submetida à hidrólise (química ou enzimática) para a quebra dos polissacarídeos em açúcares simples e posterior fermentação (CYPRIANO et al., 2017). Como resultado, tem-se a produção de biocombustíveis, como o etanol de segunda geração e o butanol, com poder calorífico superior ao do etanol, além de ser um importante precursor de solventes.

Alternativamente, os caldos hidrolisados podem ser direcionados para fermentações microbianas que visam a produção de outros bioprodutos. O resíduo de laranja é um substrato viável para a produção de enzimas (como celulases, xilanases e pectinases) através de fermentação em estado sólido (FES), as quais podem ser reempregadas no próprio processo de hidrólise (LÓPEZ-LINARES et al., 2020). Adicionalmente, os açúcares podem ser convertidos

em bioplásticos, como os polihidroxialcanoatos (PHAs), polímeros biodegradáveis acumulados intracelularmente por certas bactérias.

Assim, a reconfiguração da cadeia produtiva da laranja sob a ótica da valorização integral de seus resíduos é uma estratégia de inovação tecnológica e desenvolvimento econômico, capaz de gerar novos negócios e produtos sustentáveis. A valorização integrada maximiza o aproveitamento da biomassa, reduz o impacto ambiental do descarte e agrega valor econômico substancial à cadeia produtiva citrícola.

### 3.5.1 *Citrus Pulp Pellets* - CPP

Dentre as diversas rotas de valorização dos resíduos da laranja apresentadas, os *Citrus Pulp Pellets* (CPP) se destacam pela ampla aplicação no setor citrícola. A produção do farelo de polpa cítrica peletizada é uma etapa de aproveitamento dos resíduos da indústria de sucos, transformando o bagaço e o licor cítrico em um produto com valor agregado, amplamente utilizado na alimentação animal, especialmente de ruminantes (SANTOS et al., 2020). A Figura 08 apresenta os *pellets* de polpa cítrica obtidos a partir desse processo, caracterizados por sua forma compactada e coloração escura típica do material seco. Essa polpa é composta por cascas, sementes, bagaço e frutos cítricos descartados, e apresenta 88% de matéria seca, 7% de proteína bruta, 22% de fibra em detergente neutro, 26% de açúcares totais, 1% de amido e 33% de fibra solúvel (HALL, 2001).

Figura 08 - *Pellets* de polpa cítrica (*Citrus Pulp Pellets*)



Fonte: Elaborado pelo autor

Além do elevado teor de açúcares, a polpa cítrica apresenta, em sua composição, a pectina, que é um carboidrato complexo de grande importância para a nutrição de ruminantes.

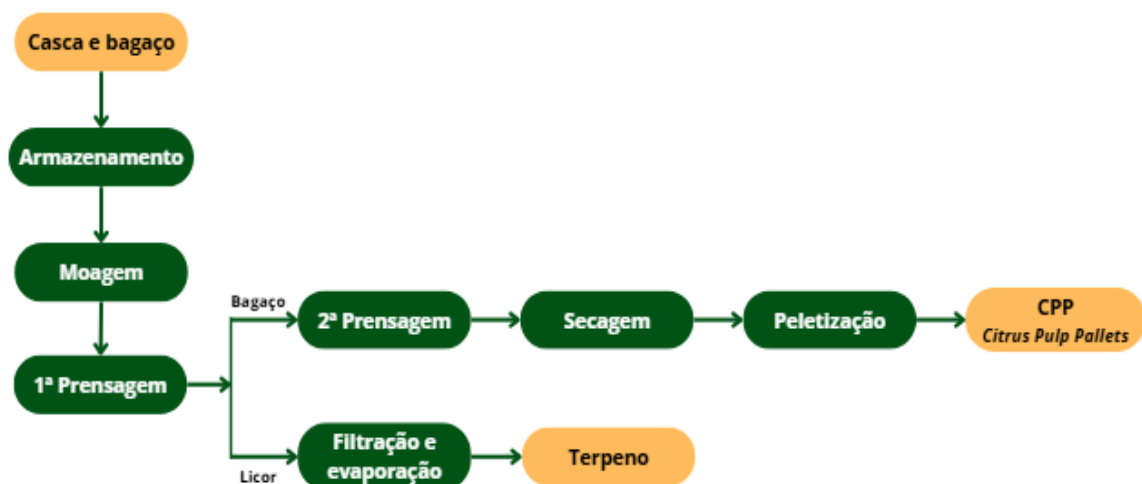
Isso porque, em comparação ao amido, promove um padrão de fermentação ruminal com maior relação acetato/propionato e reduzida produção de ácido lático. Portanto, o fornecimento de CPP possui fibra de elevada digestibilidade e ocasiona maior digestibilidade desse nutriente nas dietas mistas (MENEZES JR. et al., 2000).

O bagaço de laranja é frequentemente submetido ao processo de peletização antes de sua comercialização. Entretanto, a indústria de sucos continua a gerar grandes volumes desse resíduo *in natura*, caracterizado por um elevado teor de umidade, que pode ultrapassar 80% (base úmida), dificultando o transporte e o armazenamento devido à alta perecibilidade (OLIVEIRA et al., 2022).

A etapa de desidratação e peletização do bagaço de laranja envolve o uso de compostos alcalinos, como a cal virgem (CaO) ou o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>). Devido ao seu elevado teor de umidade, o bagaço apresenta limitações quanto à conservação na forma de silagem, uma vez que o excesso de água favorece processos fermentativos indesejáveis e deterioração microbiana. Nesse contexto, a adição de cal promove reações químicas que contribuem para o desprendimento da água e o aumento do teor de matéria seca, tornando o resíduo mais estável e adequado para armazenamento e posterior processamento (PINTO, 2007).

O fluxograma do processo produtivo completo está detalhado na Figura 09. De acordo com a Citrosuco (2021), o CPP apresenta teor de umidade de até 12% e temperatura final próxima a 50 °C, garantindo sua conservação e estabilidade durante o armazenamento e transporte.

Figura 09 - Fluxograma do processo de produção do CPP



Fonte: Adaptado de (CITROSUCO, 2021)

O processo de produção tem início com a correção de pH do bagaço e do licor cítrico por meio da adição de cal virgem. Essa etapa facilita a remoção da umidade e melhora as condições para o processamento subsequente (OLIVEIRA et al., 2018). Em seguida, o material passa pelas fases de moagem e prensagem, que têm como objetivo reduzir o teor de umidade do bagaço e separar o licor cítrico, posteriormente destinado à etapa de filtração e evaporação (CITROSUCO, 2021).

Na sequência, o bagaço parcialmente desidratado é submetido à etapa de secagem, cujo objetivo é reduzir a umidade residual em até aproximadamente 12%. Essa fase é considerada uma das mais relevantes e onerosas do processo, pois requer elevado consumo de energia térmica (FERREIRA et al., 2020). Embora a secagem proporcione maior estabilidade e conservação do produto, seu custo energético permanece significativo. Diante disso, observa-se um crescente interesse em desenvolver alternativas tecnológicas e novos mercados para o aproveitamento do bagaço de laranja *in natura* (SILVA et al., 2023).

Após a secagem, ocorre a peletização, processo no qual a polpa seca é compactada e moldada em pequenos pellets. Essa etapa confere maior densidade ao produto, reduzindo o volume e facilitando o transporte e o armazenamento (GOMES et al., 2017). O produto final, o CPP, é então resfriado, armazenado e preparado para comercialização. Paralelamente, o licor cítrico extraído nas etapas iniciais passa por um processo de evaporação, resultando na obtenção de licor cítrico concentrado, conhecido como *Citrus Terpene*. Os terpenos são compostos orgânicos voláteis presentes naturalmente nas cascas dos frutos cítricos, responsáveis pelo aroma característico e por diversas propriedades bioativas. Um exemplo típico é o d-limoneno, que confere o aroma cítrico da laranja e é amplamente utilizado como aromatizante, fragrância em cosméticos, solvente natural e em produtos de limpeza (MENEZES et al., 2022).

De forma geral, a produção de CPP representa uma solução para o aproveitamento dos subprodutos da cadeia citrícola, contribuindo para a redução de resíduos e a geração de valor econômico e ambiental. O processo combina etapas de correção, prensagem, secagem e peletização, culminando em um produto estável e de alta aplicabilidade na pecuária (SILVA et al., 2021).

### **3.5.2 Pectina**

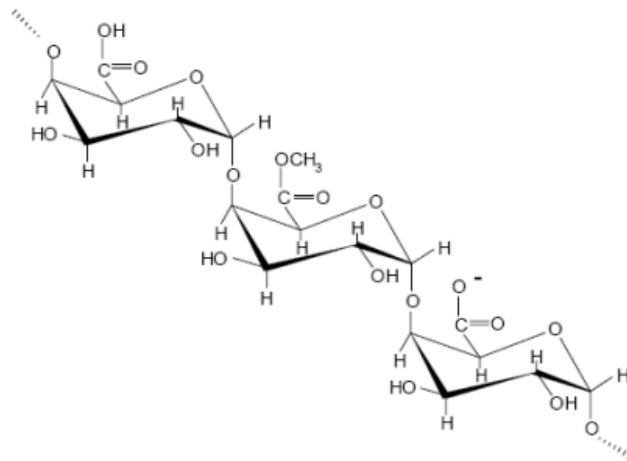
#### ***3.5.2.1 Características gerais e aplicações***

A pectina é o principal componente das paredes primárias das células vegetais não lenhosas, sendo abundante na maioria das frutas e vegetais. Ela confere força e flexibilidade à

parede celular, além de desempenhar diversas funções biológicas fundamentais, como sinalização celular, proliferação, diferenciação e adesão entre células (CIRIMINNA, 2015).

Nesse sentido, pode ser definida como um heteropolissacarídeo complexo presente nas paredes celulares de frutas, plantas e vegetais, composto majoritariamente por ácido galacturônico, com cadeias ramificadas que conferem propriedades reológicas e emulsificantes de interesse industrial. Estruturalmente, a pectina consiste em uma cadeia principal linear formada por unidades de ácido D-galacturônico conectadas por ligações glicosídicas  $\alpha$  (1,4), cujos grupos carboxílicos podem estar parcialmente esterificados com grupos metoxila (Figura 10).

Figura 10 - Estrutura química da cadeia da pectina



Fonte: BIERHALZ (2010)

A principal fonte comercial de pectina, respondendo por 85% da produção, são os resíduos das cascas de frutas cítricas. Seu teor nas cascas de laranja, por exemplo, pode variar entre 20% e 30% da matéria seca, o que torna esses resíduos uma das fontes mais economicamente atrativas para extração (SURI et al., 2022). Além de suas importantes propriedades tecnológicas para a indústria, a pectina oferece benefícios biológicos significativos. Ela funciona como uma fibra alimentar ligada à saúde do intestino, reduzindo o colesterol e protegendo o corpo contra diferentes doenças, como diabetes e câncer (SILVA et al., 2024).

Sua pureza é tecnicamente definida pela sua concentração de ácido galacturônico. Enquanto fontes de alta qualidade, como as de origem cítrica, podem apresentar teores superiores a 74% (THAKUR et al., 1997), um padrão mínimo é exigido para a comercialização do produto como aditivo alimentar. A regulamentação internacional estabelece que a pectina

de grau comercial deve conter, no mínimo, 65% de ácido galacturônico, valor adotado tanto pelo Comitê Conjunto de Especialistas em Aditivos Alimentares (JECFA) quanto pelo *Food Chemicals Codex* (FCC), referência utilizada pela *Food and Drug Administration* (FDA) nos Estados Unidos.

Dentre as várias aplicações industriais, ela desempenha funções como agente gelificante, emulsificante, estabilizante e espessante. Na indústria alimentícia, sua aplicação é comum em iogurtes, sucos e bebidas concentradas, bem como em sobremesas à base de frutas e leite, produtos lácteos fermentados e confeitarias (SILVA et al., 2024). Em bebidas, a pectina é capaz de estabilizar e aprimorar a textura de sucos de frutas e de outras bebidas feitas à base de frutas.

Ademais, também é usada na fabricação de embalagens, evidenciando sua versatilidade e importância no setor alimentício (CASTRO et al., 2024), além de contribuir para prevenir a flotação de partículas em produtos com pedaços de frutas, melhorar a estabilidade em produtos de panificação e otimizar a textura e a consistência dos alimentos (FISCHER; BERMAN, 2019).

A Figura 11 mostra que o mercado global de pectina apresenta um crescimento consistente, sendo estimado em aproximadamente US\$ 1,01 bilhão em 2024 e com previsão de atingir cerca de US\$ 1,33 bilhões até 2029, o que representa uma taxa média anual de expansão de 5,7% (MORDON INTELLIGENCE, 2025). Esse avanço ocorre sobretudo porque há um aumento expressivo na demanda por ingredientes naturais utilizados como espessantes e estabilizantes na indústria alimentícia, tendo a região da Ásia-Pacífico como principal polo de expansão, já que apresenta o ritmo mais acelerado de crescimento (IMARC GROUP, 2024). Nesse contexto, o movimento de investimento em novas unidades industriais, como a fábrica da Cargill no Brasil, reforça essa tendência de expansão e demonstra que o setor tem direcionado esforços tanto para atender o mercado interno quanto para fortalecer o comércio internacional (CARGILL, 2023).

Figura 11 - Tendências do mercado mundial da pectina



Fonte: Adaptado de Mordor Intelligence (2025)

Tal expansão tem sido impulsionada pela diversificação de suas aplicações na indústria alimentícia. O crescimento é notável em setores como sucos de frutas, onde a pectina atua como agente de corpo, melhorando a sensação tátil na boca, e em produtos lácteos e proteicos acidificados, nos quais sua função primordial é a estabilização de proteínas (CIRIMINNA et al., 2016).

Além disso, por ser um hidrocoloide bioativo com excelente perfil de segurança, a pectina tem sido cada vez mais utilizada nas áreas cosmética e farmacêutica. Nos cosméticos e produtos de cuidados pessoais, a pectina é empregada não apenas como agente natural de textura em pomadas, óleos e cremes, mas também como espessante e estabilizante eficaz em xampus, loções e tônicos capilares. Atualmente, também é utilizada como um agente eficaz no combate ao envelhecimento da pele, devido às suas propriedades hidratantes, antioxidantes e protetoras (LEBRETON-DECOSTER et al., 2011).

Adicionalmente, a crescente conscientização dos fabricantes sobre a multifuncionalidade da pectina tem fomentado sua adoção. Além de sua clássica aplicação como agente gelificante, é valorizada por otimizar processos e características do produto final. Segundo revisões da área, seu uso pode contribuir para a redução do tempo de cocção, melhoria da textura e da estabilidade da cor, e para o aumento da vida de prateleira dos alimentos (WANG et al., 2011).

Portanto, além de ser uma alternativa de aproveitamento para o resíduo da indústria processadora de suco de laranja, a extração de pectina é uma forma de agregar valor a esse resíduo, resultando em benefícios econômicos e minimizando danos ao meio ambiente.

### 3.5.2.2 Métodos de extração

A casca de laranja é uma fonte particularmente rica em pectina, representando cerca de 28% do seu peso seco. Métodos de extração como a extração ácida, hidrólise enzimática, extração assistida por micro-ondas e ultrassom são utilizados para obter a pectina do resíduo (SILVA et al., 2024).

Sua extração é um processo delicado, comumente realizado pela solubilização das cadeias poliméricas em solventes levemente ácidos, dependendo de um controle rigoroso de parâmetros como tempo e temperatura, que influenciam diretamente o rendimento final e as características do produto obtido (SILVA et al., 2021). No entanto, se o processo for conduzido sob condições muito severas, como temperaturas excessivas ou acidez muito alta, pode ocorrer a degradação (despolimerização) da cadeia de pectina. Esse dano estrutural afeta negativamente suas propriedades reológicas, como a viscosidade e a capacidade de formar géis (MELLOUL et al., 2022).

Por isso, a procura por métodos de extração eficientes e a sua correta aplicação são de grande importância. O desafio atual da pesquisa é estabelecer condições otimizadas que não apenas aumentem o rendimento do método, mas que também garantam a alta qualidade do produto, tornando-o funcionalmente comparável às pectinas comerciais já disponíveis no mercado.

De forma geral, o processo industrial de extração da pectina envolve o tratamento da matéria-prima com solução ácida diluída e aquecida, por um período aproximado de 2 a 4 horas, sob pH em torno de 2. Após essa etapa, o material sólido é removido por filtração, e a pectina presente na solução é então precipitada com álcool isopropílico ou etanol. O precipitado é lavado para remoção de contaminantes, como metais pesados, resíduos de agrotóxicos, ácidos, compostos fenólicos, pigmentos, oligossacarídeos e proteínas. Em seguida, o produto é submetido à secagem e moagem, obtendo-se a pectina em pó pronta para uso comercial (KANMANI et al., 2014).

Mais especificamente, segundo Kimball (1991), o processo tradicional de extração da pectina é realizado com ácido diluído, clorídrico ou sulfúrico, a pH 2, a uma temperatura de 40 a 100°C durante 45 a 60 minutos. Após o tempo de extração, a solução filtrada usando papel filtro, terra diatomácea ou similar, empregando vácuo. O filtrado contém cerca de 1% de pectina e deve ser concentrado até 3 a 4%. Depois, álcool é adicionado à solução (50 a 70% da quantidade de ácido utilizado), resultando na precipitação da pectina em uma massa gelatinosa. Uma prensa hidráulica geralmente é usada para separar a pectina da solução. Para lavar a pectina normalmente é usada solução de 50 a 70% de álcool em água, finalizando com um

lavagem alcoólica-aquosa de 80 a 90%. A secagem envolve ar quente, com umidade final de 6 a 10%.

No estudo com a casca de lima-doce, estimou-se que ela contém 17% de pectina. Além disso, após a extração da pectina da casca de lima-doce, observou-se que o teor de celulose aumentou (dados não publicados). Isso ocorre devido à extração ácida da pectina, que atua como uma etapa de pré-tratamento para a produção de bioetanol (VAEZ et al., 2021). Dessa forma, o custo de produção do bioetanol pode ser reduzido eliminando-se a enzima pectinase comercial do processo e, em contrapartida, a extração da pectina também agrega valor econômico

Portanto, além de ser uma alternativa de aproveitamento para o resíduo da indústria processadora de suco de laranja, a extração de pectina a partir desse material é uma forma de agregar valor a esse resíduo, resultando em benefícios econômicos e minimizando danos ao meio ambiente.

### **3.5.3 Biocombustíveis**

A crescente demanda por fontes energéticas renováveis e a preocupação ambiental quanto à dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à produção de biocombustíveis. Nesse contexto, surge também uma outra alternativa estratégica de valorização dos resíduos da laranja: a geração de biocombustíveis, como o bioetanol e o biogás (AWAN, 2013; ZACHARIAS, 2015).

A biomassa de laranja é composta predominantemente por polissacarídeos estruturais, como celulose, hemicelulose e pectina, além de açúcares simples como glicose e frutose, o que a torna uma matéria-prima lignocelulósica promissora para a produção de etanol de segunda geração (RIVAS et al., 2008; SATARI et al., 2017). A produção de bioetanol a partir de qualquer biomassa lignocelulósica envolve três etapas principais: pré-tratamento, hidrólise e fermentação. O pré-tratamento é necessário para romper a estrutura da lignina e tornar os carboidratos acessíveis às enzimas hidrolíticas, enquanto a hidrólise libera monossacarídeos fermentáveis que são posteriormente convertidos em etanol por leveduras como *Saccharomyces cerevisiae* (CREMASCO, 2018).

Estudos desenvolvidos por Awan (2013) e Zacharias (2015) demonstraram a viabilidade técnica da utilização do bagaço de laranja industrial como substrato para produção de etanol 2G. Utilizando resíduos cedidos por indústrias de suco, as pesquisas envolveram hidrólise enzimática e fermentação em condições otimizadas, obtendo rendimentos de até 22% de etanol por grama de biomassa seca e conversão de 51,11% dos açúcares fermentescíveis em bioetanol.

As leveduras *S. cerevisiae* apresentaram melhor desempenho fermentativo, especialmente em co-culturas, demonstrando a eficiência da biomassa cítrica como fonte renovável. Além do bioetanol, os resíduos cítricos podem ser aproveitados em biorrefinarias integradas para a coprodução de biogás por digestão anaeróbia.

Complementarmente, o estudo conduzido por Pourbafrani et al. (2010), foi proposto um modelo de biorrefinaria de resíduos de suco de laranja integrando a produção de bioetanol, biogás e limoneno. O processo resultou em um balanço energético positivo, com conversão eficiente de açúcares em etanol e aproveitamento dos resíduos sólidos e líquidos para produção de metano, reduzindo emissões e custos operacionais. De modo similar, Satari et al. (2017) otimizaram o processo de extração de pectina e subsequente fermentação dos resíduos sólidos, demonstrando que a integração entre recuperação de biopolímeros e geração de energia aumenta a viabilidade técnico-econômica do sistema.

O aproveitamento do bagaço de laranja para a produção de biocombustíveis apresenta vantagens relevantes: baixo custo da matéria-prima, alta disponibilidade sazonal, e composição rica em carboidratos fermentáveis (CASAGRANDE et al., 2013; NEVES et al., 2010). Além disso, o uso desses resíduos reduz o impacto ambiental associado ao descarte inadequado e contribui para a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>, favorecendo o cumprimento de metas de descarbonização no setor energético (GRASEL et al., 2017).

Portanto, a conversão de resíduos da laranja em biocombustíveis insere-se em um contexto de inovação tecnológica alinhado aos princípios de sustentabilidade e economia circular. A implementação de biorrefinarias possibilita não apenas a produção de etanol de segunda geração, mas também a geração de subprodutos de maior valor agregado, consolidando o aproveitamento integral da biomassa e a transição para uma matriz energética mais limpa e eficiente.

### **3.6 IMPACTO AMBIENTAL E DESAFIOS NA GESTÃO DOS RESÍDUOS DA LARANJA**

A transição do modelo econômico linear para a economia circular configura-se como um pilar para o desenvolvimento sustentável contemporâneo, motivada pela necessidade de dissociar o crescimento econômico do consumo de recursos finitos e de mitigar as emissões de gases de efeito estufa (LIMA; COSTA, 2021). Dentro deste paradigma, a valorização de biomassa residual agroindustrial estabelece-se como um pilar estratégico, permitindo a reintegração de coprodutos como matérias-primas secundárias em novas cadeias de valor (SILVA; PEREIRA, 2021).

A expressiva produção citrícola no Brasil, embora represente uma força econômica de grande relevância, acarreta um impacto ambiental significativo, posicionando o setor como o quarto maior gerador de biomassa residual agrícola do país. De acordo com dados do PNRS (Plano Nacional de Resíduos Sólidos), a cultura da laranja é responsável pela geração anual de 8,8 milhões de toneladas de resíduos. Em termos de volume, esse montante é superado apenas pelos resíduos provenientes das culturas de cana-de-açúcar (201,4 milhões de toneladas/ano), soja (41,8 milhões de toneladas/ano) e milho (29,4 milhões de toneladas/ano) (Ministério do Meio Ambiente - MMA, 2022).

Contudo, diferentemente dos resíduos das outras culturas mencionadas, os da laranja são notoriamente subaproveitados. O armazenamento do bagaço apresenta grandes dificuldades devido às suas características físico-químicas, notadamente o elevado teor de umidade (MAGALHÃES; BRAGA, 2021). Essa condição favorece a rápida fermentação e deterioração do material, o que pode liberar odores desagradáveis, atrair insetos e servir como meio para a proliferação microbiana, configurando-o como um potencial poluente ambiental (PINTO, 2022).

Essa condição compromete a estabilidade e reduz o tempo disponível para transporte e aproveitamento, tornando o manejo do resíduo um grande desafio (ÍTAVO et al., 2000). Além disso, o bagaço fresco é volumoso, pesado e de difícil distribuição, o que eleva os custos logísticos e limita seu transporte para regiões mais distantes. Devido a esses fatores, torna-se necessária a busca por alternativas que viabilizem o aproveitamento do bagaço de laranja e minimizem o desperdício gerado pela indústria citrícola. Entre as soluções estudadas, destacam-se a ensilagem e a desidratação, que permitem prolongar o tempo de conservação e reduzir as perdas nutricionais, tornando o resíduo apto para uso na alimentação animal ou como insumo em processos biotecnológicos (ÍTAVO et al., 2000).

Além disso, a sazonalidade da safra da laranja impõe um desafio operacional, concentrando a geração de resíduos em um período específico do ano e exigindo alta capacidade instalada de processamento ou armazenamento (SILVA; PEREIRA, 2021). A gestão deve, ainda, estar em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), que estabelece uma hierarquia para o gerenciamento, priorizando a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e o tratamento antes da disposição final.

Embora existam rotas alternativas para o seu aproveitamento, como a compostagem, onde o resíduo poderia atuar como fonte de nutrientes e matéria orgânica para o solo, há limitações técnicas, já que a aplicação de resíduos cítricos pode provocar a acidificação do solo, afetando negativamente a eficiência do processo (RUIZ; FLOTATS, 2014). Diante desses

desafios, o bagaço e a casca da laranja são majoritariamente utilizados como suplemento na alimentação animal (GUZMÁN et al., 2020). Contudo, essa prática demanda um investimento energético intensivo e de alto custo operacional, o que pode comprometer sua viabilidade econômica a depender das flutuações de mercado (OLIVEIRA, 2022).

Apesar de sua consolidação como rota tradicional, ela subutiliza o potencial biotecnológico e econômico da matéria-prima (ANDRADE et al., 2018), tornando a agregação de maior valor a esses resíduos uma área de grande interesse científico, tecnológico, social e econômico.

### 3.7 POTENCIAL DE VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA LARANJA

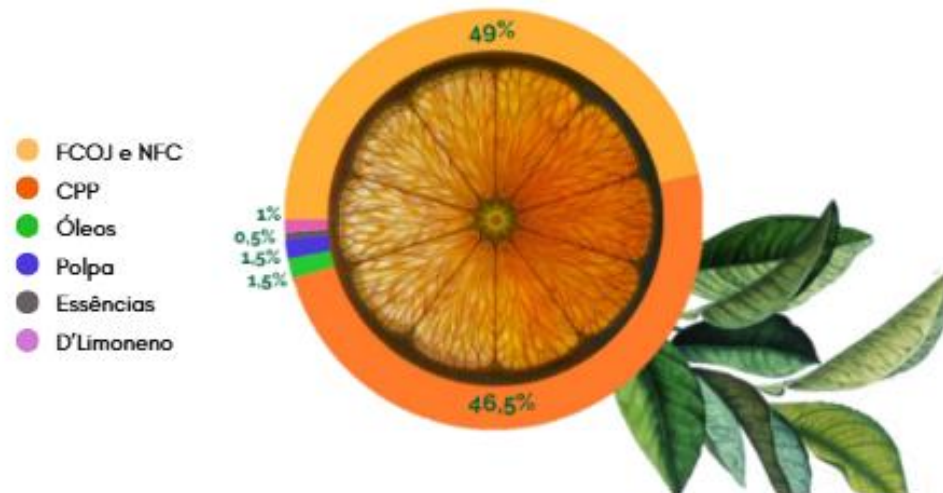
Diante do grande volume de resíduos gerados no processamento industrial da laranja, surge a necessidade de explorar alternativas para seu aproveitamento eficiente. Além de representar um desafio ambiental, esses subprodutos possuem significativo potencial econômico, podendo ser transformados em matérias-primas para diferentes setores industriais. Nesse contexto, torna-se relevante analisar as possibilidades de valorização dos resíduos da laranja.

Durante o processamento industrial da laranja para a extração de suco, aproximadamente 50% da massa total da fruta é descartada na forma de casca, bagaço e sementes (MITSUHARA et al., 2025). Atualmente, grande parte desses resíduos ainda é destinada a usos de baixo valor agregado, como a produção de farelo de polpa cítrica (*Citrus Pulp Pellets* - CPP), usado na ração de ruminantes como suplemento (CYPRIANO, 2016), conforme discutido anteriormente. Por outro lado, esses resíduos apresentam elevado potencial para geração de produtos de maior valor agregado, uma vez que podem constituir alternativas promissoras como matérias-primas para atender a diferentes setores industriais (ANDRADE et al., 2018), incluindo o alimentício, o químico e o energético.

A Figura 12 ilustra a utilização integral da laranja no processo produtivo. A maior fração da laranja, representando 49% do total, é destinada à produção de suco (FCOJ - *Frozen Concentrated Orange Juice*, e NFC - *Not From Concentrate*), sendo esta a principal aplicação comercial da fruta. Em seguida, 46,5% correspondem ao CPP (*Citrus Pulp Pellet*), subproduto utilizado majoritariamente como ingrediente na alimentação animal. As demais frações, embora menores em volume, representam componentes de maior valor agregado. Os óleos essenciais (1,5%) extraídos da casca têm ampla aplicação nas indústrias cosmética, farmacêutica e alimentícia. A polpa (1,5%), as essências (1%) e o D-Limoneno (0,5%), um composto

comumente usado como flavorizante e solvente natural, são ingredientes importantes utilizados em diversos setores industriais.

Figura 12 - Rendimento teórico de produtos e subprodutos da laranja



Fonte: Adaptado de CITROSUCO (2021)

A elevada proporção do bagaço de laranja destinado à produção de CPP evidencia uma oportunidade estratégica para a agregação de valor na cadeia produtiva da laranja. Embora ele desempenhe um papel relevante como insumo para alimentação animal, trata-se de um produto de baixo valor agregado em comparação a outros derivados possíveis a partir do mesmo resíduo. A partir do bagaço, é tecnicamente viável extrair compostos bioativos com maior valor de mercado, com aplicações consolidadas e em expansão nas indústrias alimentícia, cosmética, farmacêutica e de biotecnologia.

Portanto, a exploração de rotas alternativas para a utilização da fração atualmente destinada majoritariamente à produção de CPP surge como uma estratégia promissora de valorização dos resíduos da laranja. Ao direcionar parte desse material para a obtenção de produtos de maior valor agregado, é possível não apenas diversificar a matriz produtiva e aumentar a rentabilidade do setor, mas também promover uma integração mais efetiva dos resíduos na própria cadeia produtiva.

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA**

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa e exploratória. Esta abordagem metodológica foi selecionada por ser a mais adequada para atingir o objetivo proposto, que consiste em reunir, analisar e discutir criticamente o conhecimento científico e tecnológico consolidado sobre o tema. Através de uma revisão criteriosa da literatura, busca-se identificar as principais rotas de aproveitamento dos subprodutos da indústria citrícola, as tecnologias de conversão empregadas e o potencial de mercado para os produtos de maior valor agregado, construindo assim uma base teórica sólida para a pesquisa.

### **4.2 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS**

Para a coleta do material bibliográfico, foi definida uma estratégia de busca sistemática em três bases de dados de reconhecida relevância acadêmica e científica: Google Acadêmico, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO) e o Portal de Periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). A escolha destas plataformas justifica-se pela ampla cobertura de publicações nacionais e internacionais que elas oferecem.

As buscas foram realizadas utilizando um conjunto de descritores e palavras-chave, em português e inglês, a fim de maximizar o alcance da pesquisa. Os termos foram combinados com o uso de operadores booleanos (*and*, *or*) para refinar os resultados. Os principais descritores utilizados foram: "resíduos da laranja", "bagaço de laranja", "casca de laranja", "subprodutos cítricos", "valorização de resíduos", "produtos de valor agregado", "biocompostos", "pectina", "óleos essenciais", "biocombustíveis de laranja", "orange waste", "orange peel", "waste valorization" e "value-added products". Após a aplicação dos filtros, identificaram-se 20 fontes consideradas mais relevantes para a análise detalhada.

### **4.3 SELEÇÃO DE CRITÉRIOS DE PESQUISA**

Para garantir a pertinência e a qualidade do material bibliográfico, foram estabelecidos rigorosos critérios de inclusão e exclusão. A seleção incluiu artigos científicos publicados em periódicos revisados por pares, dissertações de mestrado, teses de doutorado e capítulos de livros. Deu-se preferência a publicações datadas dos últimos 25 anos, a fim de contemplar os avanços mais recentes na área, sem, no entanto, descartar trabalhos mais antigos de alta relevância. O escopo temático foi delimitado a estudos que abordassem diretamente o

aproveitamento e a conversão de resíduos da laranja (bagaço, casca e sementes) em novos produtos, com foco em processos de valorização por rotas biotecnológicas, químicas ou físico-químicas. Em contrapartida, foram excluídos da análise documentos que tratam apenas do cultivo da laranja, publicações de caráter não científico, trabalhos cujo acesso ao texto completo não foi possível e artigos em idiomas diferentes de português, inglês e espanhol.

O processo de seleção foi realizado em duas etapas: primeiramente, a análise dos títulos e resumos para uma triagem inicial e, posteriormente, a leitura integral dos trabalhos pré-selecionados para confirmar sua adequação aos objetivos da pesquisa. A base para a coleta e análise de dados reside na seleção de artigos científicos que tratam do tema central desta pesquisa. Nesse contexto, a Tabela 03 serviu como núcleo da revisão bibliográfica, apresentando os trabalhos mais relevantes que forneceram a fundamentação conceitual e tecnológica inicial. Esses artigos detalham o subproduto da laranja investigado, a base de dados empregada na busca e a tecnologia utilizada em cada estudo.

Tabela 03 - Características dos principais artigos selecionados

(continua)

| <b>ID</b> | <b>Subproduto/<br/>Tema principal</b> | <b>Base de dados</b> | <b>Tecnologia empregada</b>   | <b>Referência</b>       |
|-----------|---------------------------------------|----------------------|---|-------------------------|
| 1         | Biocombustíveis                       | Google Acadêmico     | Digestão anaeróbia da matéria orgânica para produção de metano  | SANTOS (2022)           |
| 2         | Biocombustíveis                       | Periódicos CAPES     | Fermentação alcoólica dos resíduos da laranja, seguida de destilação para obtenção de etanol                                | CHRISTOF et al. (2022)  |
| 3         | Biocombustíveis                       | SciELO               | Extração de d-limoneno por destilação e métodos termoquímicos e produção de bioetanol por fermentação dos resíduos cítricos | JOHN et al. (2017)      |
| 4         | Bioplástico                           | Periódicos CAPES     | Extração ácida + plastificação com glicerol (produção direta do filme)  | YARADODDI et al. (2022) |
| 5         | Bioplástico                           | Google Acadêmico     | Revisão sobre vários tipos de extração de bioplástico dos resíduos da laranja   | DAVID; UPADHYAY (2025)  |
| 6         | Bioplástico                           | Google Acadêmico     | Extração de amido de cascas de frutas e incorporação de óleos essenciais, seguida de testes físico-químicos                 | KEERTHANA et al. (2022) |
| 7         | Biossorvente                          | Periódicos CAPES     | Biossorção em leito fixo usando bagaço de laranja como adsorvente   | FIORENTIN et al. (2015) |
| 8         | Butanol                               | SciELO               | Fermentação ABE de resíduos de laranja para produção de butanol.  | SILVA et al. (2020)     |
| 9         | Celulose                              | Google Acadêmico     | Processo físico-químico integrado para valorizar o bagaço de laranja (obtenção de frações celulósicas)                      | MANTOVAN et al. (2020)  |

Tabela 03 - Características dos principais artigos selecionados

(conclusão)

| ID | Subproduto/<br>Tema principal    | Base de dados    | Tecnologia empregada  | Referência                 |
|----|----------------------------------|------------------|---|----------------------------|
| 10 | <i>Citrus Pulp Pellets</i> (CPP) | Google Acadêmico | Revisão sobre a geração, composição e formas de utilização do bagaço de laranja das indústrias de suco, como o CPP  | PEGORARO et al. (2012)     |
| 11 | <i>Citrus Pulp Pellets</i> (CPP) | Google Acadêmico | Uso do bagaço de laranja para produzir pellets enriquecidos com maior valor proteico para alimentação animal  | LIMA et al. (2017)         |
| 12 | Farinha                          | Google Acadêmico | Avaliação da qualidade físico-química e tecnológica de farinhas produzidas a partir de resíduos da agroindústria de laranja e melancia                          | FILHO et al. (2019)        |
| 13 | Pectina                          | Periódicos CAPES | Pré-tratamento com ácido diluído para produção sequencial de pectina, etanol e biogás   | VAEZ et al. (2021)         |
| 14 | Pectina                          | Periódicos CAPES | A pectina como produto estratégico e central na biorrefinaria de resíduos cítricos  | CIRIMINNA et al. (2015)    |
| 15 | Pectina                          | SciELO           | Revisão sobre os principais métodos de extração de pectina (químicos, físicos e enzimáticos)  | CAMPOS et al. (2022)       |
| 16 | Pectina                          | Periódicos CAPES | Produção de oligossacarídeos prebióticos (POS e COS) a partir de subprodutos de laranja e maçã utilizando homogeneização de alta pressão e hidrólise enzimática | MANTHEI et al. (2024)      |
| 17 | Biorrefinaria cítrica            | Google Acadêmico | Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da produção em cascata a partir de resíduos de casca de laranja  | TEIGISEROVA et al. (2022)  |
| 18 | Biorrefinaria cítrica            | SciELO           | Pré-tratamento hidrotermal numa abordagem de biorrefinaria para otimizar a produção de biocombustíveis a partir de resíduos de laranja                          | SAADATINAVAZ et al. (2021) |
| 19 | Biorrefinaria cítrica            | Google Acadêmico | Revisão sobre a valorização de resíduos de casca cítrica para a produção de produtos de valor agregado  | SHARMA et al. (2022)       |
| 20 | Biorrefinaria cítrica            | Google Acadêmico | Abordagem de biorrefinaria integrada para a valorização sustentável de resíduos cítricos  | YADAV et al. (2022)        |

Fonte: Elaborado pela autora

É importante ressaltar que ela engloba uma ampla gama de possibilidades de produtos e tecnologias derivadas dos resíduos da laranja. Contudo, após uma análise inicial abrangente, e aplicando critérios de relevância, viabilidade e foco do trabalho, apenas alguns produtos foram selecionados para serem explorados com mais detalhes nas etapas seguintes deste trabalho.

#### 4.4 ANÁLISE DAS ROTAS E PROPOSIÇÃO DE VALOR

Após a consolidação da revisão bibliográfica, o estudo avançou para a etapa de análise e síntese dos dados coletados. Com base no conhecimento adquirido, foram exploradas e detalhadas as rotas alternativas escolhidas para a valorização dos principais subprodutos gerados durante o processamento industrial da laranja, como o bagaço e a casca. O diferencial desta análise consistiu em contextualizar as rotas tecnológicas propostas dentro de cadeias produtivas já existentes. Será avaliado, portanto, não apenas o potencial de novos bioprodutos, mas a viabilidade de integração e acoplamento desses processos às plantas industriais atuais de suco cítrico que já operam na região produtora.

Para as possibilidades de rotas identificadas, foi realizada uma análise econômica simplificada dos possíveis produtos a serem gerados, considerando fatores como o potencial de mercado, o valor agregado e as aplicações industriais. Cabe ressaltar que esta abordagem não contemplou um levantamento exaustivo de todos os custos do processo de produção, como investimentos de capital (CAPEX) ou custos operacionais (OPEX) detalhados. O foco foi na comparação do valor agregado gerado e no potencial de mercado.

O objetivo desta etapa foi hierarquizar as diferentes possibilidades e identificar quais apresentaram a melhor combinação de retorno econômico potencial e viabilidade de implementação prática. Esta análise contribuiu com uma visão estratégica sobre o aproveitamento integral da matéria-prima, servindo como diretriz inicial e sugestão para que uma Análise Técnico-Econômica (ATE) completa e detalhada seja realizada em trabalhos futuros.

### 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir da revisão crítica da literatura sobre o aproveitamento e valorização dos resíduos da laranja evidenciam um cenário de grande potencial tecnológico e econômico ainda subexplorado pela indústria citrícola. De maneira geral, verificou-se que, embora o Brasil ocupe posição de liderança mundial na produção e exportação de suco de laranja, o aproveitamento integral da biomassa gerada durante o processamento permanece limitado, concentrando-se majoritariamente na produção de *Citrus Pulp Pellets* (CPP), um subproduto de baixo valor agregado destinado à alimentação animal. Essa prática, apesar de consolidada, representa um uso restrito frente às possibilidades de transformação química e biotecnológica dos resíduos.

A literatura indica que aproximadamente 50% da massa total da fruta é descartada na forma de casca, bagaço e sementes (SUZUKI, 2019), configurando um desafio ambiental e

logístico. No entanto, esses resíduos possuem elevado teor de compostos de interesse industrial, como pectina, flavonoides, carotenoides e açúcares fermentescíveis, os quais poderiam ser explorados em processos de extração e conversão para obtenção de bioprodutos de maior valor comercial. Diversos estudos revisados ressaltam a viabilidade de rotas tecnológicas que envolvem desde a recuperação de óleos essenciais e compostos bioativos até a produção de biopolímeros, com crescente demanda em setores como o farmacêutico, cosmético e de embalagens sustentáveis, além das áreas de biocombustíveis e bioenergia (FERREIRA et al., 2020).

De modo geral, os resultados apontam para um consenso: os resíduos da laranja constituem um recurso valioso, porém ainda subvalorizado. A conversão desses resíduos em produtos de maior valor agregado não apenas diversifica a matriz produtiva da indústria citrícola, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental e para o fortalecimento econômico regional. Contudo, para que tais avanços sejam efetivamente consolidados, é necessário o investimento em inovação tecnológica, capacitação técnica e incentivos que viabilizem a transição de um modelo linear de produção para um modelo circular e sustentável.

### **5.1 JUSTIFICATIVA DA SELEÇÃO DAS ROTAS PRIORITÁRIAS**

Embora a Tabela 03 contemple vários produtos, abordagens e tecnologias, sua principal função foi permitir uma triagem inicial. Assim, com base em critérios de relevância temática, maturidade tecnológica, viabilidade operacional e aderência aos objetivos do estudo, apenas alguns produtos foram selecionados para uma investigação aprofundada nas etapas subsequentes. Adicionalmente, outras fontes e documentos complementares foram consultados para fortalecer a análise.

No processo de seleção, optou-se por priorizar a pectina, o bioetanol e o biogás, dada sua relevância estratégica em abordagens de biorrefinaria integrada, pois esses compostos são obtidos a partir de etapas sequenciais de processamento, permitindo o aproveitamento cascata de diferentes frações do resíduo cítrico. A pectina constitui um produto de valor agregado derivado das fases iniciais de hidrólise ácida, o bioetanol se integra como rota fermentativa subsequente ao uso dos açúcares remanescentes e o biogás surge como etapa final de conversão da matéria orgânica residual via digestão anaeróbia.

Adicionalmente, além de tecnicamente consolidadas e economicamente relevantes, essas rotas apresentam menor complexidade operacional em comparação a alternativas mais sofisticadas, demandando condições reacionais estabelecidas e acessíveis. Somado a isso, verificou-se também maior disponibilidade de artigos, estudos científicos, dados e análises, o

que proporcionou maior comparabilidade e confiabilidade às discussões desenvolvidas. Dessa forma, a seleção dessas rotas permitiu estruturar uma análise metodológica consistente e alinhada ao conceito de valorização integral dos resíduos cítricos.

## **5.2 PROCESSOS INTEGRADOS (BIORREFINARIA)**

Nesse contexto, a valorização integrada de resíduos industriais da laranja em biorrefinarias representa uma solução tecnológica e ambiental promissora para o aproveitamento completo dos subprodutos gerados. Esses resíduos (cascas e bagaços) são uma matéria-prima estratégica, pois sua composição, rica em carboidratos estruturais, pectina, limoneno e lignina é particularmente vantajosa. A alta concentração de pectina, associada ao baixo teor de lignina, facilita a degradação da biomassa e a obtenção de açúcares simples, tornando-a ideal para a produção de biocombustíveis líquidos, como o bioetanol (THOMPSON, 2010; POURBAFRANI et al., 2010). Simultaneamente, o aproveitamento integral permite a recuperação de compostos de alto valor comercial, como limoneno, flavonoides e a própria pectina purificada, amplamente empregada nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética (SRIVASTAVA; MALVIYA, 2011).

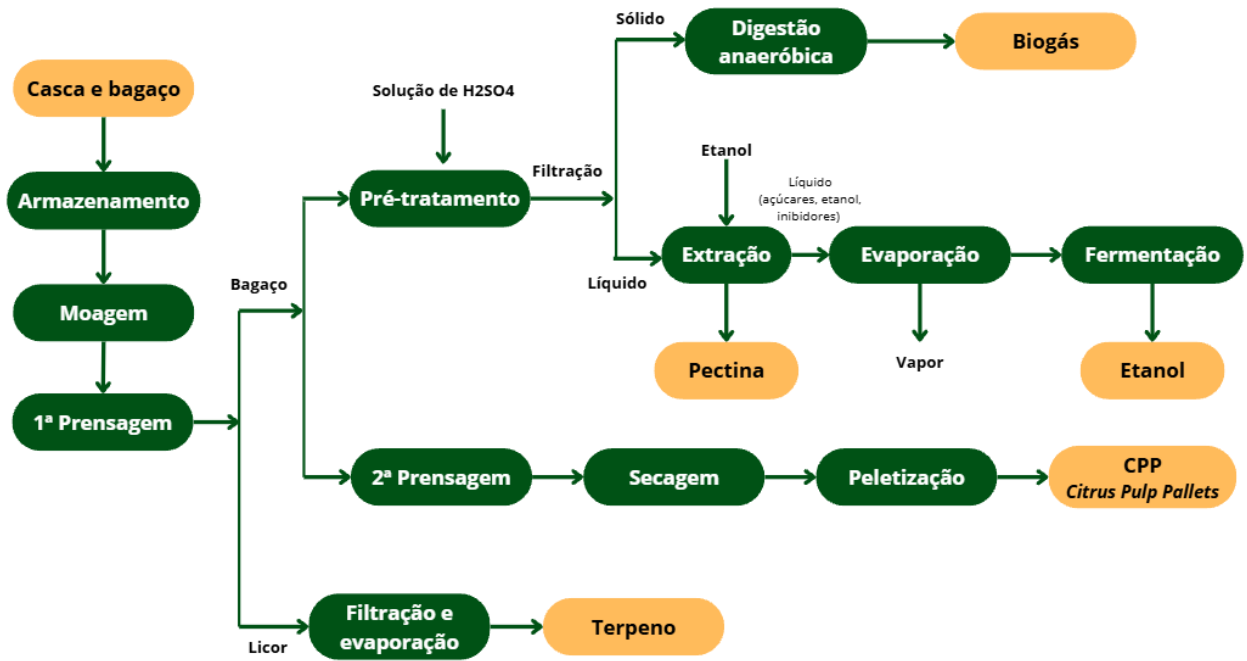
No estudo de Vaez et al. (2021), foi desenvolvido um processo integrado de biorrefinaria que utiliza o resíduo de laranja como substrato para obtenção de pectina, etanol e biogás, sem consumo de enzimas. O processo inicia-se com um pré-tratamento de ácido diluído que atua simultaneamente na extração de pectina, hidrólise parcial da biomassa lignocelulósica e remoção de compostos inibidores, como o limoneno. Esse passo é seguido por uma filtração, na qual ocorre a separação de duas frações: sólida (rica em celulose, lignina e cinzas) e líquida (contendo pectina, açúcares e compostos solúveis).

A importância dessa integração reside na maximização do aproveitamento da matéria-prima, na redução de resíduos sólidos e emissões, e na diversificação dos produtos gerados, alinhando-se aos princípios da economia circular e da bioeconomia sustentável. Além disso, a substituição da hidrólise enzimática por tratamento ácido reduz significativamente os custos operacionais, tornando o processo economicamente mais atrativo (VAEZ et al., 2021).

Nesse contexto, a Figura 13 apresenta uma proposta de fluxograma integrado para a valorização de resíduos cítricos. O modelo parte da rota tradicional de produção de CPP (adaptado de Citrosuco, 2021), mas incorpora rotas alternativas (baseado em Vaez et al., 2021) voltadas ao aproveitamento dos subprodutos gerados durante o processamento industrial da laranja. Tal modificação visa aprimorar a eficiência do uso da biomassa residual, promovendo

a valorização integral da casca e do bagaço de laranja sob a perspectiva de um modelo de biorrefinaria cítrica.

Figura 13 - Proposta de integração das rotas de valorização de resíduos da laranja na produção de CPP



Fonte: Adaptado de Citrosuco (2021); Vaez et al. (2021)

A partir do fluxograma elaborado por Vaez et al. (2021), é proposta uma modificação rota convencional de produção de CPP. Nesse modelo, o bagaço obtido após a primeira prensagem, tradicionalmente destinado integralmente às etapas de secagem e peletização, é agora dividido em duas correntes complementares: uma segue para a produção de CPP, mantendo o processo original, e a outra é desviada para uma nova rota tecnológica voltada à obtenção de pectina, etanol e biogás.

Na rota tradicional, representada pela Figura 05, o bagaço segue para uma segunda prensagem, onde ocorre a retirada do excesso de umidade. O sólido resultante é encaminhado para as etapas de secagem e posterior peletização, sendo usado como insumo para ração animal e responsável pela maior parcela de aproveitamento industrial dos resíduos da laranja. Essa sequência de operações mantém o caráter simples e economicamente estável do processo tradicional, amplamente difundido no setor citrícola brasileiro.

Em paralelo, o licor da primeira prensagem, que contém compostos voláteis e óleos essenciais, segue para uma etapa de filtração e evaporação, destinada à recuperação de terpenos,

especialmente o d-limoneno. Essa rota, já existente e tradicional dentro do processo, tem dupla função: além de gerar um coproduto de valor comercial, também contribui para a remoção de substâncias que poderiam atuar como inibidoras nas etapas fermentativas e de digestão anaeróbica subsequentes.

Na rota alternativa, parte do bagaço da primeira prensagem é encaminhada a um pré-tratamento ácido diluído, utilizando uma solução de ácido sulfúrico a aproximadamente 1% (m/v) (VAEZ et al., 2021). Essa etapa tem como função principal promover a solubilização parcial da pectina e a hidrólise da fração hemicelulósica, liberando açúcares fermentescíveis, além de auxiliar na remoção de compostos inibitórios, como o limoneno, que comprometem o desempenho das etapas subsequentes (VAEZ et al., 2021). Após o pré-tratamento, a mistura passa por um processo de filtração, que separa a fração líquida (hidrolisada) da fração sólida residual.

A fração líquida, rica em açúcares simples (glicose, xilose, galactose e arabinose) e em pectina solubilizada, é encaminhada para a extração e purificação de pectina, conduzida por precipitação alcoólica, centrifugação e secagem. Essa operação permite a obtenção de pectina com rendimentos médios de 24,7%, apresentando pureza superior a 70% em ácido galacturônico, o que a torna adequada para aplicações alimentícias e farmacêuticas (VAEZ et al., 2021). O licor remanescente dessa extração, ainda contendo quantidades significativas de açúcares solúveis, é concentrado por evaporação e então submetido à fermentação alcoólica com *Saccharomyces cerevisiae*. Nessa etapa, obtém-se etanol com rendimento próximo a 82,9% (VAEZ et al., 2021), sem necessidade de hidrólise enzimática adicional, o que representa uma redução importante de custos operacionais e de tempo de processamento.

O aspecto interessante dos processos integrados é que a extração da pectina não é apenas um fim em si, mas atua como uma etapa de pré-tratamento para a biomassa lignocelulósica remanescente (SATARI et al., 2017). Esta etapa de "despectinação" é essencial, pois remove a barreira estrutural da pectina, aumentando a porosidade do material e facilitando o acesso enzimático à celulose nas etapas subsequentes.

Enquanto isso, a fração sólida resultante da filtração é encaminhada à digestão anaeróbica, onde ocorre a conversão da matéria orgânica remanescente em biogás. O biogás obtido apresentou teores de metano entre 41% e 52% (VAEZ et al., 2021), podendo ser utilizado como fonte energética térmica e elétrica dentro da própria planta industrial, contribuindo para a autossuficiência energética do sistema e reduzindo o consumo de combustíveis fósseis. Além disso, a lignina residual, de alto poder calorífico, pode ser destinada à combustão direta, reforçando a integração energética do processo.

Assim, o fluxograma integrado proposto estabelece um sistema de aproveitamento múltiplo, no qual o bagaço cítrico é transformado em diferentes produtos, como CPP, pectina, etanol e biogás, a partir de rotas interligadas e complementares. A produção de CPP é mantida como fluxo principal, garantindo a estabilidade econômica do processo, enquanto as correntes desviadas para a rota alternativa ampliam o valor agregado da biomassa e reduzem a necessidade de descarte de resíduos. Essa abordagem demonstra o potencial de transformação do processo industrial cítrico em uma biorrefinaria integrada, capaz de aliar eficiência energética, sustentabilidade e diversificação produtiva, embora ainda dependa de avanços tecnológicos e de investimentos em infraestrutura para sua implementação em escala industrial (GUERRA NETO, 2023).

Em suma, o modelo de biorrefinaria que integra a extração de subprodutos de maior valor agregado, como a pectina, a um pré-tratamento para a produção de etanol ou biogás, representa uma estratégia promissora. Esta abordagem não só mitiga um passivo ambiental, mas também cria fluxos de receita, melhorando a economia do processo e alinhando a produção industrial aos preceitos da economia circular, diversificando o portfólio de produtos e minimizando a geração de resíduos finais (SATARI et al., 2017).

### **5.3 ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLES**

Uma análise do potencial de agregação de valor dos produtos derivados do resíduo da laranja é importante para justificar a implementação de rotas de biorrefinaria. Esta análise, no entanto, é tratada neste trabalho de forma simplificada, focando estritamente no valor de mercado bruto dos produtos, desconsiderando os substanciais custos de capital (Capex) para novos equipamentos, custos operacionais (Opex) de processo, manutenção ou demanda energética. O objetivo é comparar as ordens de grandeza do valor agregado.

A Tabela 04 sintetiza os preços médios, rendimentos e receitas brutas estimadas por tonelada de resíduo, permitindo uma análise comparativa do potencial econômico das diferentes rotas de valorização do bagaço e das cascas de laranja. Os preços médios citados devem ser interpretados como faixas indicativas, uma vez que variam amplamente em função de fatores regionais, temporais, escala produtiva, grau de pureza do produto e condições contratuais.

Tabela 04 - Estimativa de rendimento e valor econômico dos produtos obtidos a partir dos resíduos da laranja

| <b>Produto</b>                   | <b>Preço médio (R\$/kg)</b> | <b>Rendimento por tonelada de resíduo úmido (kg/t)</b> | <b>Receita bruta estimada por tonelada de resíduo (R\$/t)</b> |
|----------------------------------|-----------------------------|--|---|
| <i>Citrus Pulp Pellets</i> (CPP) | 0,69                        | 250  | 172,50  |
| Pectina                          | 82,50                       | 180  | 14.850,00   |
| Etanol                           | 3,73                        | 20,93  | 78,06   |
| Biogás                           | 2,35                        | 42,48  | 99,82   |

Fonte: Elaborado pela autora, com base em Citrosuco (2024), Vaez et al. (2021) e dados de mercado (IMARC, 2024; Argus Brasil, 2024).

Já os rendimentos reais podem variar significativamente em função da composição da matéria-prima (proporção entre casca e polpa), do teor de umidade, da eficiência dos processos de extração e da destinação adotada para cada rota de aproveitamento (por exemplo, a fração do bagaço direcionada à produção de CPP, pectina ou bioetanol). Ou seja, são apresentados valores de estudos experimentais e estimativas teóricas, com o objetivo de ilustrar o potencial de geração de valor a partir do processamento de resíduos da laranja.

O processo industrial atual foca na produção de CPP, uma *commodity* consolidada destinada à ração animal. Sendo um produto de baixo processamento e mercado maduro, seu valor é o menor da cadeia, tendo um preço médio no Brasil de R\$ 690,00 por tonelada, o que equivale a R\$ 0,69 por quilograma (AGRO2BUSINESS, 2025). Como alternativa, a produção de bioetanol apresenta um valor agregado moderado. O etanol combustível é igualmente uma *commodity*, e seu preço no mercado das usinas paulistas, segundo o Indicador CEPEA/ESALQ (2025), varia na faixa de R\$ 2,75 a R\$ 3,15 por litro. Considerando sua densidade (aproximadamente 0,79 kg/L) e um valor médio, o preço seria de R\$ 3,73 por quilograma de etanol, um valor 5 vezes superior ao do CPP.

Em contrapartida, a pectina de grau alimentício posiciona-se em uma categoria distinta, já que consiste em um ingrediente utilizado como hidrocoloide na indústria alimentícia e farmacêutica. Relatórios de mercado B2B indicam que o preço da pectina cítrica no mercado internacional situa-se na faixa de USD \$12,00 a \$18,00 por quilograma (IMARC GROUP, 2024). Em uma conversão direta (assumindo câmbio de R\$ 5,50), o valor bruto alcançaria entre R\$ 66,00 e R\$ 99,00 por quilograma.

Contudo, esta análise crítica deve ser ponderada. O elevado preço de mercado da pectina é um reflexo direto da complexidade tecnológica e dos altos custos associados à sua extração e

purificação. A viabilidade de uma rota de extração, como a precipitação do licor com etanol, depende da implementação de novos reatores, sistemas de centrifugação ou filtração, lavagem e secadores, que representam um Capex considerável. Além disso, o Opex é impactado pelo uso intensivo de solventes (etanol) e pela demanda energética da secagem.

Em relação ao etanol e biogás, embora apresentem receitas brutas mais modestas por tonelada de resíduo, possuem um papel estratégico importante na viabilização de uma biorrefinaria cítrica integrada. O rendimento do etanol indica que, mesmo gerando menor receita direta, ele oferece vantagens operacionais: pode ser utilizado internamente no próprio processo de extração da pectina (diminuindo custos de compra de solvente), pode ser recuperado e recirculado com alta eficiência e, eventualmente, comercializado. Além disso, o biocombustível pode atuar como um subproduto complementar, reduzindo a dependência exclusiva do valor de mercado da pectina e melhorando o equilíbrio econômico do processo.

Vale ressaltar que o rendimento de biogás, pelo estudo de Vaez et al. (2021), foi de 36 m<sup>3</sup> por tonelada de resíduo úmido de laranja. Para converter esse valor para massa, de modo a padronizar as unidades utilizadas na análise e possibilitar comparações diretas com os demais produtos, considerou-se a densidade do biogás nas condições ambientes de temperatura e pressão (25 °C e 1 atm). Nessa condição, a densidade do biogás (composto tipicamente por cerca de 60% de metano e 40% de dióxido de carbono) é cerca de 1,18 kg/m<sup>3</sup>. A conversão do rendimento volumétrico para rendimento mássico foi realizada pela multiplicação direta do volume de biogás produzido pela densidade correspondente às condições ambientes.

Apesar de apresentar a segunda menor receita bruta da tabela, o biogás demonstra alta relevância energética. Seu rendimento corresponde a um fluxo energético capaz de suprir parcialmente as demandas térmicas e elétricas da planta, reduzindo o custo operacional global do sistema. Além disso, a digestão anaeróbia permite tratar frações residuais de baixo valor, contribuindo para a redução de carga orgânica e impactos ambientais associados ao descarte. Ou seja, atua não apenas como gerador de receita, mas como elemento importante na sustentabilidade energética e mitigação de passivos ambientais.

Portanto, os dados demonstram que, embora a pectina apresente o maior retorno financeiro potencial, a viabilidade industrial de uma rota integrada depende da capacidade de integração entre todos os produtos. O CPP oferece estabilidade e redução de volume, a pectina possui o maior valor final agregado, o etanol pode reduzir custos internos e diversificar receitas, e o biogás contribui na demanda energética do processo. Assim, a análise econômica inicial revela não apenas a atratividade da extração de pectina, mas também reforça a lógica de um

modelo integrado de biorrefinaria, no qual diferentes fluxos de produtos podem garantir equilíbrio econômico, operacional e ambiental.

#### **5.4 A DOMINÂNCIA DO CPP: UMA ANÁLISE CRÍTICA DA VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS CÍTRICOS**

A proposta de integração de novas rotas de valorização ao processo convencional de produção de CPP representa um avanço importante na direção de uma economia circular e de um modelo de biorrefinaria sustentável. A inclusão das etapas de extração de pectina, fermentação alcoólica para produção de etanol e digestão anaeróbica para geração de biogás amplia significativamente o aproveitamento da biomassa residual da laranja, reduzindo o volume de resíduos e diversificando a matriz de produtos obtidos (VAEZ et al., 2021).

Do ponto de vista ambiental, a rota integrada apresenta vantagens notáveis. A conversão da fração líquida em etanol e pectina permite o reaproveitamento de compostos de maior valor agregado, enquanto a digestão anaeróbica da fração sólida reduz a carga orgânica residual e contribui para a geração de energia renovável na forma de biogás. Essa abordagem não apenas diminui a necessidade de disposição de resíduos, mas também pode melhorar a autossuficiência energética do processo (ALMEIDA, 2023).

Por outro lado, retomando o paradoxo anteriormente identificado, embora alternativas como a extração de pectina apresentem um potencial de receita bruta muito maior, a rota industrial dominante, e muitas vezes única, adotada pelas processadoras de suco é a produção de *Citrus Pulp Pellets* para ração animal. A compreensão dessa dinâmica exige uma análise além da simples comparação de preços finais dos produtos, focando nos desafios logísticos, ambientais e nos custos de investimento (Capex) e operação (Opex).

Isso porque o problema reside na natureza do resíduo gerado. O bagaço úmido de laranja é um passivo imediato e de alto risco para a indústria de sucos, extremamente perecível, fermentando rapidamente devido à presença de açúcares residuais e da alta atividade da água. Essa perecibilidade gera pressão logística (necessidade de escoamento imediato), riscos ambientais e problemas sanitários (atração de vetores) (FERREIRA, 2019). A indústria de suco, cujo foco principal é o processamento da fruta e não a biotecnologia, necessita primariamente de uma solução que elimine esse passivo de forma rápida, barata e em larga escala.

É neste contexto que a rota do CPP ainda se estabelece como a solução hegemônica. O processo de secagem e peletização, embora demande um gasto energético considerável na secagem (LOPES et al., 2020), representa uma tecnologia madura, de implementação relativamente simples e de Capex significativamente inferior ao de uma biorrefinaria. Mais

importante, ela resolve o problema central, ou seja, transforma um resíduo úmido, pesado e perecível em um produto seco, estável, de fácil armazenamento, logística simplificada e com um mercado consumidor massivo e já estabelecido, especialmente para bovinos.

Adicionalmente, as rotas de maior valor agregado carregam barreiras proporcionais. A extração de pectina, por exemplo, exige a implementação de uma planta química mais complexa. O processo envolve etapas de extração ácida, precipitação com solventes, purificação e secagem, demandando não apenas um alto Capex, mas também um Opex elevado devido ao uso de reagentes e energia (PACHECO et al., 2023). Além disso, o produto final (pectina grau alimentício ou farmacêutico) exige um rigoroso controle de qualidade e certificações, inserindo a indústria de suco em um mercado de especialidades químicas (FREITAS; COSTA, 2021).

Já no caso da produção de biocombustíveis, como o etanol e biogás, a viabilidade técnica é reconhecida, mas a implementação em larga escala enfrenta limitações. A composição complexa da casca de laranja, rica em limoneno e outros compostos fenólicos, inibe a atividade microbiana durante os processos fermentativos, exigindo pré-tratamentos e tecnologias mais sofisticadas (SOUZA et al., 2021). Além disso, a elevada umidade dos resíduos e a sazonalidade da colheita dificultam a operação contínua e a logística de suprimento (COSTA et al., 2022).

Para além das questões de rendimento, a natureza gasosa do biogás impõe que ele seja consumido no local de produção (*in loco*). Isso demanda a instalação de uma infraestrutura com caldeiras, unidades de cogeração ou sistemas de purificação (*upgrading*) dentro do complexo industrial. Em contraste direto com o bioetanol, que é líquido e possui flexibilidade de armazenamento e comercialização, o biogás não permite a criação de estoque e não dispõe, no contexto citrícola, de um mercado externo consolidado. Consequentemente, sua viabilidade econômica está atrelada à existência de uma demanda energética interna contínua, um requisito que entra em conflito com a sazonalidade da indústria da laranja.

Conclui-se, portanto, que a predominância do CPP na matriz produtiva não decorre de desconhecimento sobre o potencial de valorização do resíduo, mas reflete uma estratégia orientada para a redução de riscos operacionais (FERNANDES, 2022). A transição para rotas de maior valor agregado, como a pectina ou biocombustíveis, exige mais do que uma simples análise de preço de venda final, já que demanda uma mudança de paradigma de uma indústria de processamento para um modelo de biorrefinaria integrada, o que implica investimentos vultosos, desenvolvimento de novas competências tecnológicas e a disposição para assumir os riscos de mercados voláteis e altamente técnicos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos ao longo deste estudo evidenciam que aproximadamente 50% da massa total da laranja processada é convertida em resíduos, como casca, bagaço e sementes, configurando um volume expressivo de biomassa que, apesar de seu elevado potencial químico e biotecnológico, permanece subaproveitado pela indústria citrícola brasileira. Mesmo ocupando posição de destaque mundial na produção e exportação de suco, o setor ainda opera predominantemente um modelo de aproveitamento limitado, centrado na produção de *Citrus Pulp Pellets* (CPP), um subproduto de baixo valor agregado. Embora essa rota seja tecnicamente consolidada e operacionalmente segura, ela representa apenas uma fração das possibilidades de transformação e agregação de valor oferecidas pelos resíduos da laranja.

A análise demonstra que a biomassa residual possui um alto potencial de valorização, especialmente a fração pécica e os açúcares fermentescíveis, possibilitando a obtenção de produtos com demanda crescente nos setores alimentício, farmacêutico e de bioenergia. A revisão das tecnologias disponíveis mostra que essas rotas permitem diversificar a matriz produtiva, seja pela recuperação de biopolímeros ou pela conversão dos resíduos da laranja em biocombustíveis renováveis, como o bioetanol e o biogás. Além de seu potencial econômico, essas alternativas promovem também benefícios ambientais, uma vez que ampliam o aproveitamento integral da matéria-prima, alinhando-se diretamente aos princípios da economia circular.

Vale ressaltar que a permanência do CPP como principal rota de valorização dos resíduos da laranja está associada menos à sua superioridade tecnológica e mais à sua viabilidade imediata e ao baixo risco de implantação. Embora as alternativas apresentem maior potencial de inovação e maior valor agregado, carecem de estabilidade de mercado e maturidade tecnológica para competir com a robustez e a previsibilidade econômica do CPP. O desafio para o setor, portanto, reside em promover a transição de um modelo consolidado, porém limitado e subvalorizado, para um sistema de integração múltiplo e integrado, típico de uma biorrefinaria cítrica.

Além disso, pode-se argumentar que a predominância do CPP reflete também uma inércia tecnológica do setor citrícola. A dependência dessa rota limita a diversificação produtiva e restringe o potencial de valorização biológica, química e energética do resíduo da fruta. A falta de incentivos à pesquisa aplicada e a ausência de políticas públicas voltadas à implementação de biorrefinarias contribuem para a manutenção desse modelo. Segundo estudos recentes, a integração de diferentes rotas poderia aumentar significativamente o valor

econômico por tonelada de resíduo, reduzindo desperdícios e ampliando a sustentabilidade do sistema.

Nesse contexto, o presente trabalho propôs uma configuração possível de biorrefinaria integrada aos processos já existentes na indústria citrícola, de modo a otimizar fluxos, reduzir perdas e potencializar a geração de coprodutos. É importante destacar que, para este estudo, a análise econômica considera apenas o valor agregado dos possíveis produtos obtidos a partir dos resíduos da laranja (pectina, bioetanol e biogás), sem contabilizar os custos de investimento e operação decorrentes da instalação dos novos equipamentos e processos. Ou seja, a avaliação foi conduzida de forma simplificada, buscando apenas evidenciar o potencial de valorização econômica da biomassa cítrica em comparação ao processo tradicional de produção de CPP.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de uma análise técnico-econômica completa, incorporando a simulação do processo para um balanço de massa e energia detalhado, parâmetros de CAPEX (investimento em novos equipamentos) e OPEX (custos operacionais, consumo energético e manutenção) e receitas estimadas, além de indicadores de viabilidade financeira, como tempo de retorno (*payback*) e taxa interna de retorno (TIR). Tal estudo permitiria avaliar com maior precisão a viabilidade industrial do processo integrado, servindo como base para o escalonamento em larga escala.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, P. F.; BUSSULO, J. R.; CARPI, J. M. G.; PEREIRA, I. B. T.; YAMAMOTO, K. BAMPIDIS, V. A.; ROBINSON, P. H. Citrus pulp as animal feed: a review. *Animal Feed Science and Technology*, v. 128, n. 3-4, p. 175-214, 2006.
- BENELLI, P. Agregação de valor ao bagaço de laranja (*citrus sinensis* L. Osbeck) mediante obtenção de extratos bioativos através de diferentes técnicas de extração. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- CANTERI, M. H. G. et al. *Pectina: estrutura, propriedades e aplicações*. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 14, n. 1, p. 57-68, 2012.
- CHAVICHIOLO, A. P. *Análise da viabilidade técnica e econômica da extração de óleos essenciais de resíduos da industrialização de laranja*. 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.
- CIRIMINNA, R.; FARAONE, L.; MENNITI, A.; PAGLIARO, M. The modern citrus biorefinery. *Green Chemistry*, v. 21, n. 17, p. 4687-4700, 2019.
- CITRINO – Indústria de suco de laranja integral. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Apucarana, 2018.
- CITROSUCO. *Relatório de Sustentabilidade 2023*. Matão: Citrosuco, 2023.
- CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). Relatório anual de atividades 2019. Brasília, DF: CNA, 2019. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/publicacoes/relatorio-de-atividades-2019>. Acesso em: 10 de outubro de 2025.
- CYPRIANO, D. Z.; SILVA, L. L.; MARIÑO, M. A.; TASIC, L. A biomassa da laranja e seus subprodutos. *Revista Virtual de Química*, v. 9, n. 1, p. 176-191, 2017. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/TasicNoPrelo.pdf>.
- DAVID, M.D; UPADHYAY, K. *Revolutionizing Bioplastic Production: A Focus on Sustainable Alternatives Using Orange Peels and Carboxymethyl Starch: A Review*. *Green Energy and Environmental Technology* 4(1), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.5772/geet.20240073>. 2025
- DONADIO, L. C.; MOURÃO FILHO, F. A. A.; MOREIRA, C. S. Centros de origem, distribuição geográfica das plantas cítricas e histórico da citricultura no Brasil. In: MATTOS JUNIOR, D.; DE NEGRI, J. D.; PIO, R. M.; POMPEU JUNIOR, J. (Ed.). *Citros*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2005. p. 279-316.

- FAO. Citrus Fruit: A Commodity in Focus. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, [s.d.]. (Série Commodity in Focus - Citrus Fruit)
- FELLOWS, P. J. Food processing technology: principles and practice. 3. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009.
- FERREIRA, E. B.; OLIVEIRA, C. C.; FERREIRA, K. B; DA SILVA, J. L; VIEIRA , A. N. *Industrial reuse of orange peel: A review of current applications*. Seven Editora, [S. l.], p. 941–956, 2024. Disponível em: <https://sevenpubl.com.br/editora/article/view/5700>. 2024.
- FISCHER, M.; BERMAN, J. *Functional properties of food hydrocolloids*. Food Hydrocolloids, v. 87, p. 119–134, 2019.
- GUERREIRO NETO, M. A citricultura no Brasil. In: SIMPÓSIO DE CITRICULTURA, 15., 2019, Botucatu.
- KALAKI, R. B.; NEVES, M. F. Plano estratégico para o sistema agroindustrial citrícola brasileiro. Revista Gestão & Produção, São Carlos. Jan/2017.
- LÓPEZ-LINARES, J. C. et al. Biorefinery of orange peel waste: a valorisation strategy based on the production of biofuels and high value-added compounds. Journal of Cleaner Production, v. 242, 118485, 2020.
- MAGALHÃES, C. N. R; BRAGA, L. S.. Produção do etanol 2G a partir do bagaço da laranja. Ouro Branco – MG: Universidade Federal de São João del-Rei. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). 2021.
- MATTOS JUNIOR, D.; DE NEGRI, J. D.; PIO, R. M. (Ed.). Citros. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundag, 2005.
- MAY, C. D. Industrial pectins: sources, production and applications. Carbohydrate Polymers, v. 12, n. 1, p. 79-99, 199
- MITSUHARA, A. T.; MORAES, J. C.; CRESTANI, C. E. Caracterização química do bagaço de laranja: potencial rota para uso desse resíduo. Revista Principia, v. 62, e7678, 2025. Instituto Federal de São Paulo (IFSP). Matão, São Paulo. 2025.
- MUNHOZ, J. R; MORABITO, R. Otimização no planejamento agregado de produção em indústrias de processamento de suco concentrado congelado de laranja. Gestão & Produção, São Carlos, v. 17, n. 3, p. 465-481, 2010.
- NEVES, E. M.; LOPES, S. A.; YAMAMOTO, P. T. História da citricultura. In: Citros: a mais importante cultura frutícola do Brasil. Brasília, DF: Embrapa, 2014. cap. 1, p. 19-30.

- NEVES, M. F. et al. *Impact of climate change on citrus growing*. In: *The Orange Juice Business*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2011. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.3920/978-90-8686-739-4\\_18](https://link.springer.com/chapter/10.3920/978-90-8686-739-4_18). Acesso em: 12 out. 2025.
- OLIVEIRA, M. R.; SANTOS, J. P.; ALMEIDA, F. P. *Characterization and valorization of orange peel and bagasse: composition and potential applications*. *Foods*, v. 11, n. 2, p. 387, 2022.
- PALMIERI, Fernanda Geraldini. *A competitividade das firmas de suco de laranja de pequeno porte no estado de São Paulo*. 2018. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.
- FERNANDES, M. F. et al. *Energy evaluation of drying systems applied to citrus residues*. *Journal of Cleaner Production*, v. 328, p. 129653, 2021.
- SILVA, L. C.; COSTA, R. D.; MENDES, A. G. *Potential uses of citrus processing by-products in animal nutrition and biotechnological applications*. *Tropical Animal Science Journal*, v. 7, n. 1, p. 1–10, 2023.
- PASSOS, O. S. *Citricultura no Brasil*. Cruz das Almas: Embrapa-CNPMPF, 1990. 45 p. (Embrapa-CNPMPF. Documentos, 28).
- PASSOS, O. S. et al. *Citrus Industry in Brazil with Emphasis on Tropical Areas*. In: SAJID, M. (ed.). *Citrus Health Benefits and Production Technology*. London: IntechOpen, 2018. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/63361>. Acesso em: 12 out. 2025.
- RUIZ, B.; FLOTATS, X. *Citrus essential oils and their influence on the anaerobic digestion process: an overview*. *Waste Management*, v. 34, n. 11, p. 2063–2079, 2014. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.06.026.
- SANTOS, R.M.; NAAS, I.A.; MOLLO-NETO, M.; VENDRAMETTO, O. *An overview on the Brazilian orange juice production chain*. *Revista Brasileira de Fruticultura*, vol.35, no1, março de 2013.
- SILVA-DE PAULA, M. C. M. et al. *Agronomic Performance of Sweet Orange Genotypes under the Brazilian Humid Subtropical Climate*. *Horticulturae*, v. 8, n. 3, p. 254, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/8/3/254>. Acesso em: 12 out. 2025.
- SOARES, G. H. B. *Bagaço de laranja na alimentação de vacas leiteiras: revisão bibliográfica*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/236168>.

- SOMBRA, K. E.; SILVA, A. C. C.; RODRIGUES, A. J. O. et al. Identificação e caracterização físico-química de frutos de laranja de Russas no semiárido cearense, Brasil. *Citrus Research & Technology*, v. 39, e1035, 2018.
- SRIVASTAVA, P.; MALVIYA, R. *Sources, extraction and purification of pectin: a review*. *Pharmacognosy Journal*, v. 3, n. 23, p. 1-18, 2011.
- THAKUR, B. R. et al. *Chemistry and uses of pectin: a review*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 37, n. 1, p. 47–73, 1997.
- UMAÑA, M.; SIMAL, S.; DALMAU, E.; TURCHIULI, C.; CHEVIGNY, C. Evaluation of Different Pectic Materials Coming from Citrus Residues in the Production of Films. *Foods* 2024, 13, 2138. <https://doi.org/10.3390/foods13132138>.
- VAEZ, S.; KARIMI, K.; MIRMOHAMADSADEGHI, S.; JEIHANIPOUR, A. *An optimal biorefinery development for pectin and biofuels production from orange wastes without enzyme consumption*. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 152, p. 513–526, 2021
- VARNAM, A. H.; SUTHERLAND, J. P. *Bebidas: tecnología, química y microbiología*. Zaragoza: Acribia, 1997.
- VIDAL, Maria de Fátima. *Citricultura (Laranja): Caderno Setorial ETENE*, Banco do Nordeste do Brasil. Fortaleza, ano 9, n. 328, março 2024. Apresenta que o Brasil é o maior produtor mundial de laranja e maior fornecedor de suco de laranja, com destaque para os polos de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro, bem como a importância econômica da cultura no Nordeste.
- WEBBER, H. J. History and development of the citrus industry. In: REUTHER, W.; WEBBER, H. J.; BATCHELOR, L. D. (Eds.). *The citrus industry*. Vol. 1. Berkeley: University of California Press, 1967. p. 1-39.
- YANG, M.; WANG, Q. Carbon footprint and cost analysis of non-thermal food processing technologies: a review with a case study on orange juice. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 9, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2025.1585467/full>. Acesso em: 12 out. 2025.