

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

EDSON STUPP DA SILVA

**REAPROVEITAMENTO DE MEXERICA PONKAN (*Citrus reticulata blanco*) PARA
A PRODUÇÃO DE ÁLCOOL**

Francisco Beltrão

2025

EDSON STUPP DA SILVA

**REAPROVEITAMENTO DE MEXERICA PONKAN (*Citrus reticulata blanco*)
PARA A PRODUÇÃO DE ÁLCOOL**

**Reuse of ponkan mandarin (*Citrus reticulata blanco*) for the production of
alcohol**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado(a) como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Ambiental e
Sanitária, da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof^a Dr.^a Claudia Eugênia Castro
Bravo.

Co-orientadora: Prof^a Dr.^a Ellen Porto Pinto.

FRANCISCO BELTRÃO

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

EDSON STUPP DA SILVA

**REAPROVEITAMENTO DE MEXERICA PONKAN (*Citrus reticulata blanco*) PARA
A PRODUÇÃO DE ÁLCOOL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado(a) como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Ambiental e
Sanitária, da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 26 de novembro de 2025

Claudia Eugênia Castro Bravo
Doutorado e Pós-doutorado, na área de Microbiologia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão

Ellen Porto Pinto
Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão

Tania Maria Cassol
Doutorado e Pós-doutorado em Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão

FRANCISCO BELTRÃO

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela saúde, motivação e resiliência, além da oportunidade de estudar em uma universidade pública e concluir este curso.

Expresso minha profunda gratidão à minha esposa, ao meu pai, à minha mãe e à minha irmã, que estiveram ao meu lado em todos os momentos. O apoio, os conselhos e as palavras de conforto foram fundamentais ao longo desta jornada. Muito obrigado por fazerem parte da minha vida.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária pela excelência no ensino, bem como à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Francisco Beltrão, pela oportunidade de formação acadêmica.

À minha orientadora e à minha coorientadora, manifesto especial reconhecimento pela paciência, compreensão, materiais e orientações fornecidas, pelo suporte no laboratório, pelo tempo dedicado e pelos valiosos momentos de aprendizado que me proporcionaram.

RESUMO

STUPP, EDSON, S. **REAPROVEITAMENTO DE MEXERICA PONKAN (*Citrus reticulata blanco*) PARA A PRODUÇÃO DE ÁLCOOL** 2025. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, 2025.

Este trabalho avalia a viabilidade do reaproveitamento de resíduos de mexerica ponkan (*Citrus reticulata blanco*) para a produção de álcool. A geração de resíduos alimentares em residências, feiras e mercados representa um desafio ambiental, agravado pelo descarte inadequado e pela falta de alternativas de reutilização. Propõe-se a transformação do suco da mexerica ponkan (*Citrus Reticulata Blanco*) em álcool, o qual pode ser destinado às mais variadas formas de utilização desde a indústria até ao uso residencial. A metodologia contemplou a coleta e caracterização físico-química, como a análise e monitoramento de pH e sólidos solúveis, preparo do mosto, fermentação com levedura selecionada e destilação. A destilação em alambique de cobre, resultando em produto com 38% v/v de teor alcoólico e aroma preservado da fruta, características que ampliam seu uso potencial tanto para fins alimentícios quanto industriais. O rendimento foi de 0,96 L de etanol absoluto a partir de 86,64 kg de mexerica, correspondendo a 0,011 L/kg. Esse valor está dentro da faixa esperada para processos fermentativos sendo que em estudos realizados com a cana-de-açúcar apresentou rendimento médio de 0,087 L/kg. Os resultados indicam a viabilidade técnica do processo, com redução da carga orgânica descartada e obtenção de produto útil com potencial comercial. O estudo reforça o papel da Engenharia Ambiental e Sanitária na conversão de passivos ambientais em soluções sustentáveis e de relevância social.

Palavras-chave: resíduos hortifrutigranjeiros; fermentação alcoólica; etanol; sustentabilidade; engenharia ambiental.

ABSTRACT

STUPP, EDSON, S. **REUSE OF PONKAN MANDARIN (*Citrus reticulata blanco*) FOR THE PRODUCTION OF ALCOHOL**. 2025. 44 f. Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree) – Environmental and Sanitary Engineering Program, Federal University of Technology – Paraná. Francisco Beltrão, 2025.

This work evaluates the feasibility of repurposing Ponkan tangerine (*Citrus reticulata blanco*) waste for alcohol production. The generation of food waste in households, street markets, and grocery stores represents an environmental challenge, aggravated by improper disposal and the lack of reuse alternatives. This study proposes the transformation of Ponkan tangerine juice into alcohol, which can be intended for various applications ranging from industrial to residential use. The methodology comprised collection and physicochemical characterization, including pH analysis and monitoring and soluble solids, must preparation, fermentation with selected yeast, and distillation. Distillation was performed in a copper still, resulting in a product with 38% v/v alcohol content and the preserved aroma of the fruit, characteristics that expand its potential use for both food and industrial purposes. The yield was 0.96 L of absolute ethanol from 86.64 kg of tangerine, corresponding to 0.011 L/kg. This value lies within the expected range for fermentative processes, considering that studies conducted with sugarcane presented an average yield of 0.087 L/kg. The results indicate the technical feasibility of the process, with a reduction in the discarded organic load and the obtainment of a useful product with commercial potential. The study reinforces the role of Environmental and Sanitary Engineering in converting environmental liabilities into sustainable solutions of social relevance.

Keywords: horticultural residues; alcoholic fermentation; ethanol; sustainability; environmental engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fruto da Mexerica Ponkan (Citrus reticulata Blanco).....	28
Figura 2 - Mosto Pronto para o Processo de Fermentação.....	30
Figura 3 - Sistema De Controle De Temperatura.....	31
Figura 4 - Aquecimento do mosto, aplicando-se chama direta sob o alambique.....	32
Figura 5 - Volume total do “coração” do destilado.....	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Destino dos Resíduos hortifrutigranjeiros - Caxias do Sul (RS).....	15
Gráfico 2 - Rendimento Volume/Massa de matéria-prima.....	34
Gráfico 3 - Acompanhamento de pH e sólidos solúveis.....	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Peso líquido (em kg) total de frutas, por variedade, gerado durante 30 dias em um supermercado de Caxias do Sul – RS.....	15
Quadro 2 - Principais matérias-primas utilizadas na produção de etanol.....	21
Quadro 3 - Compostos Voláteis no processo de destilação de vinho alcoólico.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros finais do processo de fermentação a partir de diferentes matérias-primas.....	25
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1. Objetivo geral.....	13
2.2. Objetivos específicos.....	13
3. REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1. Desperdício de alimentos e geração de resíduos hortifrutigranjeiros.....	14
3.2. Gases de Efeito Estufa (GEE).....	17
3.3. Decomposição da matéria orgânica em aterros e geração de efluentes.....	18
3.4. Importância da mitigação e alternativas de reaproveitamento de resíduos orgânicos.....	19
3.4.1. Compostagem.....	19
3.4.2. Biodigestão.....	20
3.4.3. Fermentação.....	20
3.5. Fermentação alcoólica.....	22
3.5.1. Tipos de fermentação.....	22
3.5.2. Fatores que influenciam no processo da fermentação alcoólica.....	23
3.5.3. Destilação e obtenção de álcool.....	24
3.6. Aplicações e utilizações do álcool.....	26
4. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1. Processo de obtenção da matéria-prima.....	28
4.2. Processo de preparo do mosto.....	29
4.3. Processo de inoculação.....	29
4.4. Processo de fermentação.....	29
4.5. Processo de Destilação.....	31
4.5.1. Fração Cabeça (65–78 °C).....	32
4.5.2. Fração Coração (78–92 °C).....	32
4.5.3. Fração Cauda (92–98 °C).....	32
4.5.4. Ponto de parada (~98 °C).....	33
4.5.5. Aferição da graduação alcoólica.....	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1. Rendimento de extração e caracterização do mosto.....	34
5.2. Desempenho da fermentação.....	34
5.3. Destilação e rendimento alcoólico.....	35
6. CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

O relatório Situação da População Mundial 2025 do Fundo de População das Nações Unidas (UNFPA), estima a população total mundial em 8,232 bilhões de pessoas em 2025, devendo chegar a cerca de 9,7 bilhões em 2050, com esta projeção de aumento da população mundial, aliado ao crescimento desordenado das cidades e aos padrões de consumo da atual sociedade, tem contribuído significativamente para o agravamento de um problema silencioso, e de grandes proporções, o desperdício de alimentos e geração de resíduos.

A produção, distribuição e descarte de alimentos ocorrem dentro de uma logística marcada por excessos e ineficiência, onde toneladas de alimentos são desperdiçadas diariamente ao longo da cadeia de abastecimento, desde o campo até a mesa do consumidor, o qual causa um prejuízo de 940 bilhões de dólares (FAO, 2017). Dentro desse cenário, os produtos hortifrutigranjeiros (frutas, legumes, verduras e tubérculos) figuram entre os alimentos mais perecíveis e, conseqüentemente, mais descartados por questões estéticas, danos físicos, maturação excessiva ou falta de demanda no ponto de venda.

De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2024), em 2022, foram globalmente desperdiçadas cerca de 1,05 bilhão de toneladas de alimentos. Uma fração significativa desse total provém do consumo doméstico, onde se estima que cerca de 79 kg por pessoa são desperdiçados anualmente.

No Brasil, a realidade é ainda mais crítica, dados do Ministério da Saúde (2023) apontam que apenas uma pequena fração da população consome frutas e hortaliças regularmente, o que indica uma baixa valorização desses alimentos, favorecendo o descarte nos estabelecimentos de venda. Somente em 2019 a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos correspondeu a cerca de 49,4 milhões de toneladas (SNIS, 2019). Sendo que apenas 299.379,7 toneladas foram tratadas em unidades de compostagem. O restante da matéria orgânica foi encaminhado para disposição em aterros sanitários ou para aterros controlados e lixões (SNIS, 2019).

É urgente repensar o destino dado a esse tipo de resíduo, sobretudo porque muitos desses alimentos, mesmo fora dos padrões comerciais, mantêm propriedades bioquímicas e nutricionais que os tornam úteis para outros fins. Dentre as alternativas possíveis, o reaproveitamento dos resíduos orgânicos para produção de bioprodutos surge como uma estratégia eficaz e ambientalmente responsável. É nesse contexto que se insere o presente trabalho, que propõe investigar a viabilidade da produção de álcool a

partir de resíduos hortifrutigranjeiros, em específico a mexerica Ponkan (*Citrus reticulata*) reduzindo sua destinação aos aterros sanitários e promovendo uma solução alternativa de grande utilidade social e sanitária.

A escolha pela produção de álcool como destino final dos resíduos não é aleatória. O álcool etílico, amplamente utilizado na saúde pública quanto na indústria, sobretudo em contextos pandêmicos como o vivenciado recentemente com a COVID-19. A alta demanda revelou a necessidade de alternativas para sua produção, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. A transformação de resíduos em etanol, por meio de processos de fermentação alcoólica, representa uma oportunidade para aliar saúde pública, sustentabilidade e inovação tecnológica.

A fermentação alcoólica, realizada principalmente por leveduras como a *Saccharomyces cerevisiae*, é um processo bioquímico que converte açúcares em etanol e dióxido de carbono sob condições controladas de pH, temperatura e tempo (APARECIDO *et al.*, 2020). A maior parte dos resíduos hortifrutigranjeiros contém carboidratos fermentáveis, o que os torna matéria-prima viável para esse tipo de conversão (LINS, 2021). Após a fermentação, o vinho obtido passa por etapas de separação e purificação, geralmente realizadas em equipamentos de destilação, em alambiques ou colunas de destilação (MORAES, 2006). Com ajustes no processo, é possível alcançar a concentração alcoólica exigida pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) para formulações sanitizantes, em geral, de 70% (v/v), conforme determina a Resolução RDC nº 350/2020.

A destinação inadequada de resíduos orgânicos aos aterros sanitários representa não apenas um desperdício de recursos, mas também uma fonte significativa de emissões de gases de efeito estufa (GEE), principalmente metano (CH₄), contribuindo para o aquecimento global. Segundo dados recentes do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2024), entre 8% e 10% das emissões globais de GEE estão diretamente associadas à perda e ao desperdício de alimentos, onde os alimentos produzidos e desperdiçados resultam em 4,4 bilhões de quilos de GEE (FAO, 2017). O reaproveitamento desses resíduos, portanto, contribui para mitigar os impactos climáticos e amplia a vida útil dos aterros sanitários, além de estimular a economia circular.

Ao propor uma solução para o reaproveitamento de mexerica ponkan (*Citrus reticulata blanco*) para a produção de álcool, este trabalho também pretende fomentar o debate sobre educação ambiental e responsabilidade coletiva.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

- Investigar a viabilidade do reaproveitamento de mexerica ponkan (*citrus reticulata blanco*) para a produção de álcool.

2.2. Objetivos específicos

- Coletar e analisar pH e quantidade de sólidos solúveis no suco de resíduos da mexerica ponkan "*citrus reticulata blanco*".
- Realizar a fermentação do suco da mexerica ponkan "*citrus reticulata blanco*" para obtenção de álcool.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Desperdício de alimentos e geração de resíduos hortifrutigranjeiros

O desperdício de alimentos é um fenômeno que afeta todas as etapas da cadeia de produção, distribuição e consumo. Segundo a FAO (2011), aproximadamente um terço dos alimentos produzidos para consumo humano não é consumido e é descartado por razões que variam desde perdas na colheita até a rejeição por padrões estéticos impostos pelo mercado e pelo consumidor. Esse cenário representa não apenas um grave problema ambiental, mas também social, em um planeta onde milhões de pessoas ainda enfrentam a insegurança alimentar diariamente (FAO, 2011).

Em 2022, foram descartadas 1,05 bilhão de toneladas de alimentos nos setores de varejo, serviços de alimentação e no ambiente doméstico. Isso representa, em média, 132 quilos por pessoa ao longo do ano. Desse total, a maior parte — 79 kg per capita — veio dos domicílios, seguida por 36 kg do setor de alimentação e 17 kg do varejo. O custo econômico global associado à perda e ao desperdício de alimentos, por sua vez, gira em torno de US\$ 1 trilhão por ano (PNUMA, 2024).

Um estudo realizado em Caxias do Sul (RS) por ESPÍNDOLA e KELLER (2021) ajuda a ilustrar a realidade do desperdício no setor hortifrutigranjeiro da região Sul do Brasil. Durante 30 dias, foram coletados 17.047,20 kg de resíduos brutos conforme o quadro 1, em um supermercado local, o que corresponde a uma média diária de aproximadamente 568,24 kg. Desse montante, apenas 27,7% apresentavam condições de reaproveitamento.

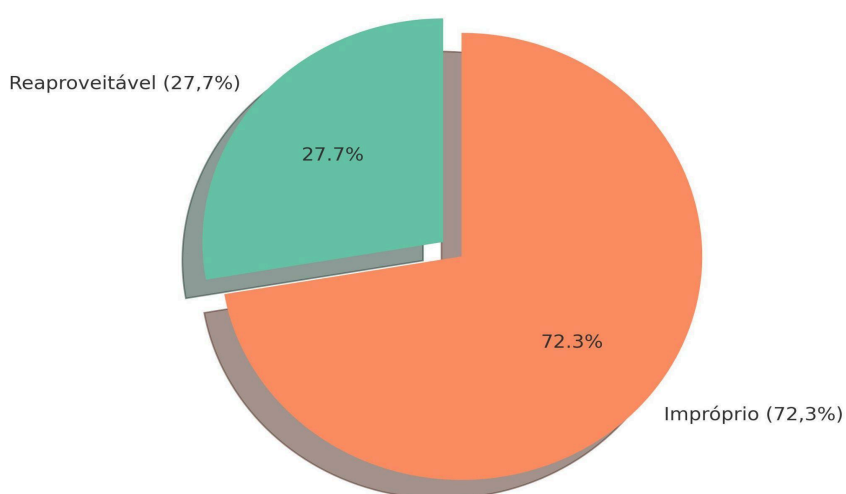
Quadro 1 - Peso líquido (em kg) total de frutas, por variedade, gerado durante 30 dias em um supermercado de Caxias do Sul – RS.

Frutas	Peso Líquido		
Abacate	28,52	Kiwi	18,03
Abacaxi	45,60	Laranja	239,32
Ameixa vermelha	9,47	Limão	114,89
Banana	462,71	Maçã	218,25
Bergamota/ mexerica	84,19	Mamão	192,71
Caqui	74,72	Manga	893,33
Carambola	1,00	Melancia	383,52
Coco	8,64	Melão	100,43
Goiaba	134,45	Total	2.651,35

Fonte: ESPÍNDOLA e KELLER (2021)

Os 72,3% restante apresentado no gráfico 1, cerca de 12.325,12 kg, foram considerados impróprios para consumo e descartados. Este volume era composto, basicamente, por frutas e hortaliças. Entre os resíduos, as frutas (como banana, melancia, tomate e laranja) lideraram o descarte, seguidas pelas hortaliças (como cebola, batata inglesa, batata-doce e chuchu), (ESPÍNDOLA, KELLER, 2021).

Gráfico 1 - Destino dos Resíduos hortifrutigranjeiros - Caxias do Sul (RS)



Fonte: Autoria própria(2025)

O consumo de frutas e hortaliças ainda se mostra insatisfatório no cenário nacional. Pesquisas de orçamentos familiares indicam que a média de aquisição desses itens pelos brasileiros não atinge as recomendações nutricionais mínimas, refletindo um padrão alimentar carente em micronutrientes essenciais (IBGE, 2020). Esse consumo reduzido acaba ampliando o desperdício ao longo da cadeia de abastecimento especialmente em feiras e mercados varejistas, o desperdício se acentua devido às exigências comerciais por produtos visualmente perfeitos e com alta rotatividade nas prateleiras. Conforme aponta o relatório do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2022), frutas e hortaliças, por exemplo, são frequentemente descartadas por apresentarem pequenas imperfeições, mesmo que ainda estejam próprias para o consumo. Na cidade de São Paulo, por ano, são descartadas 18.400 toneladas de alimentos pelas feiras livres (BRASIL, 2022), o que resulta em grandes volumes de resíduos orgânicos que, muitas vezes, acabam destinados a aterros sanitários sem qualquer tipo de reaproveitamento, assim reduzindo a vida útil do aterro.

O Rio de Janeiro é segunda cidade mais populosa do Brasil, com mais de 13 milhões de habitantes em sua área metropolitana, e devido a essa densidade populacional, uma média diária de 4.800 toneladas de restos alimentares é gerada dentro das residências todos os dias (UNEP, 2023), foi realizado um estudo em 102 residências, nas quais os moradores tiveram que separar seus resíduos em três categorias principais: desperdício de alimentos (frutas, legumes, carnes, laticínios e produtos de panificação), materiais de embalagem e rejeitos. Ao final do estudo, verificou-se que a geração média per capita de desperdício de alimentos correspondia a 77 kg por habitante ao ano, o que equivale a aproximadamente 212 g por pessoa por dia. Os alimentos desperdiçados corresponderam a 62% da massa total dos resíduos domiciliares, onde frutas e legumes representam 62%, carnes 11%, laticínios 11%, pães e massas 16%. Superando expressivamente as quantidades de embalagens e outros resíduos (UNEP, 2023).

Quando consumidores e comerciantes compreendem os impactos do desperdício alimentar tornam-se mais sensíveis a adotar práticas conscientes, como a compra de produtos fora do padrão estético convencional ou o reaproveitamento de alimentos em casa. Sendo que em atualmente cerca de 1 bilhão de pessoas no mundo vivem uma insegurança alimentar (FAO, 2017).

Ações educativas podem ser desenvolvidas em escolas, feiras, supermercados e mídias sociais, ampliando o alcance da informação e sensibilizando diferentes públicos, campanhas que mostram o real impacto do desperdício tanto ambiental quanto

econômico ajudam a construir uma cultura de responsabilidade compartilhada. Estimular o pensamento crítico sobre os hábitos de consumo e descarte, favorece a adoção de práticas mais sustentáveis no dia a dia. A educação, nesse sentido, deixa de ser apenas informativa e passa a ser transformadora, pequenos gestos individuais se somam, promovendo um futuro mais justo e equilibrado (BRASIL, 2022).

A perda e o desperdício de alimentos não impactam apenas os aspectos econômicos e sociais, mas também geram sérias consequências ambientais. Além das emissões de gases de efeito estufa associadas ao ciclo produtivo, esse fenômeno contribui para a degradação de ecossistemas naturais, ocasionando pressões adicionais sobre o solo, a água e os recursos florestais (FAO, 2017). Nesse contexto, observa-se também uma significativa perda de biodiversidade, já que áreas produtivas são ocupadas sem que o alimento efetivamente cumpra sua função social de abastecimento (PNUMA, 2021).

3.2. Gases de Efeito Estufa (GEE)

Os gases de efeito estufa (GEE) são compostos atmosféricos que absorvem e reemitem a radiação infravermelha proveniente da superfície terrestre, retendo calor e contribuindo para o fenômeno natural conhecido como efeito estufa (TILIO NETO, 2010). Esse processo é essencial para a manutenção da temperatura do planeta em níveis adequados à vida. O aumento significativo das concentrações desses gases em função das atividades humanas intensifica o efeito estufa, causando o aquecimento global e alterações climáticas de grande escala (IPCC, 2021).

Entre os principais GEE destacam-se:

- Dióxido de carbono (CO_2): gerado principalmente pela queima de combustíveis fósseis, desmatamento e processos industriais.
- Metano (CH_4): resultante da decomposição anaeróbia da matéria orgânica em aterros sanitários e lixões, além de emissões da agropecuária e da exploração de combustíveis fósseis. Seu Potencial de Aquecimento Global (PAG) é cerca de 28 vezes maior que o do CO_2 em um horizonte de 100 anos.
- Óxido nitroso (N_2O): associado ao uso de fertilizantes nitrogenados e à queima de biomassa, com PAG aproximadamente 265 vezes superior ao do CO_2 .

- Gases fluorados (HFCs, PFCs, SF₆ e NF₃): de origem industrial, possuem elevado PAG e longa permanência na atmosfera.

3.3. Decomposição da matéria orgânica em aterros e geração de efluentes

Nos aterros sanitários, a fração orgânica dos resíduos sofre decomposição em condições predominantemente anaeróbias. Esse processo ocorre em diferentes fases: inicialmente há consumo de oxigênio (fase aeróbia), mas rapidamente o ambiente se torna anaeróbio, favorecendo a ação de bactérias metanogênicas. Como resultado, forma-se o biogás, composto majoritariamente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), principais GEE associados ao manejo inadequado de resíduos sólidos urbanos (GOMES *et al.*, 2015).

Além dos gases, a degradação da matéria orgânica gera o chorume, um efluente líquido altamente poluente, rico em matéria orgânica, nutrientes (nitrogênio e fósforo), metais pesados e microrganismos patogênicos (AIRES *et al.*, 2020). O chorume, quando não tratado adequadamente, pode infiltrar no solo e atingir lençóis freáticos, comprometendo a qualidade da água e aumentando riscos à saúde pública.

Portanto, os resíduos orgânicos em aterros sanitários representam dupla fonte de impactos ambientais:

1. Atmosféricos → emissões de GEE (principalmente metano e dióxido de carbono), que contribuem para o aquecimento global.
2. Hídricos → produção de chorume, que demanda sistemas de drenagem e tratamento para evitar contaminação de águas superficiais e subterrâneas.

A redução da disposição de resíduos orgânicos em aterros é uma das estratégias mais eficazes para mitigar emissões de GEE e impactos ambientais associados. Alternativas como compostagem, biodigestão anaeróbia e reaproveitamento de excedentes agroindustriais (como o processamento da mexerica para produção de álcool) não apenas evitam a formação de metano e chorume, mas também geram produtos de valor agregado, alinhando-se aos princípios da economia circular (LINS, 2021).

Compreender a relação entre resíduos orgânicos, geração de GEE e produção de efluentes é essencial para fortalecer iniciativas de reaproveitamento e incentivar práticas produtivas mais sustentáveis, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e proteção dos recursos hídricos.

3.4. Importância da mitigação e alternativas de reaproveitamento de resíduos orgânicos

O reaproveitamento de resíduos orgânicos tem se consolidado como uma solução estratégica frente aos problemas do descarte inadequado de resíduos sólidos urbanos, pois evita passivos ambientais e, ao mesmo tempo, possibilita a geração de produtos de valor agregado. Entre os métodos mais utilizados destacam-se a compostagem, biodigestão e produção de biocombustíveis de segunda geração, como no caso do reaproveitamento de excedentes agroindustriais, que se alinham aos princípios da economia circular (LINS, 2021).

Esse conjunto de práticas e tecnologias visa transformar a matéria orgânica descartada em novos produtos, energia ou insumos agrícolas. Dessa forma, contribui-se diretamente para a mitigação das mudanças climáticas e para a proteção dos recursos naturais.

3.4.1. Compostagem

Diante do elevado percentual de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos, o qual corresponde a 50% do total (SNIS, 2019), a compostagem surge como uma alternativa viável e sustentável ao encaminhamento direto dessa fração para os aterros sanitários. Trata-se de um processo biológico aeróbio no qual microrganismos decompõem a matéria orgânica, transformando-a em um material estável e rico em nutrientes, conhecido como composto orgânico. Gomes *et al.* (2015) relata que esse produto apresenta características semelhantes às de um fertilizante, podendo adquirir alto valor agregado e até mesmo representar uma fonte complementar de renda para cooperativas e associações de catadores.

A compostagem pode ser aplicada em diferentes escalas, desde pequenas composteiras domésticas até plantas industriais de grande porte, o que amplia sua versatilidade (BRASIL, 2018). Além de reduzir o volume de resíduos enviados aos aterros, o composto obtido do processo contribui para a melhoria da qualidade do solo, promovendo o aumento da matéria orgânica, a retenção de água e o fornecimento de nutrientes. Segundo Vitoi *et al.* (2025) a implementação de projetos de compostagem em escolas, hortas comunitárias e zonas rurais têm demonstrado impactos positivos não apenas no aspecto ambiental, mas também na educação ambiental e na conscientização das comunidades locais.

A compostagem é uma estratégia eficaz de tratamento de resíduos orgânicos, resultando na minimização da carga de chorume e na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), reforçando seu papel como forma de tratamento.

3.4.2. Biodigestão

A biodigestão consiste na decomposição de compostos orgânicos por microrganismos em condições de ausência de oxigênio, resultando em dois subprodutos de elevado valor agregado: o biogás e o digestato (CETESB, 2025). O biogás é composto majoritariamente por metano (CH_4) e pode ser aproveitado como combustível para a geração de calor, eletricidade ou ainda como combustível veicular, contribuindo para a diversificação da matriz energética. Já o digestato, também denominado biofertilizante, é rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, podendo ser aplicado diretamente ao solo e favorecendo práticas de agricultura sustentável (EMBRAPA, 2022).

O uso de biodigestores mostra-se especialmente eficaz em propriedades rurais e agroindústrias, contextos nos quais há grande disponibilidade de resíduos orgânicos, como esterco animal, restos de alimentos e efluentes agroindustriais. No entanto, apesar do potencial reconhecido, essa tecnologia ainda é subutilizada no Brasil, sobretudo em pequena e média escala. Diante das demandas atuais por soluções sustentáveis, a biodigestão representa uma alternativa estratégica com grande potencial de expansão, especialmente no contexto da transição para uma matriz energética mais limpa, descentralizada e resiliente.

3.4.3. Fermentação

A produção de biocombustíveis, como o etanol, a partir da fermentação ou transformação de resíduos ricos em açúcares é um método promissor. No quadro 2 podemos observar as principais matérias primas utilizadas para a produção de etanol. A fermentação alcoólica, por exemplo, possibilita a conversão de resíduos em etanol, que pode ser empregado como combustível (IGOR, 2022) ou como base para a produção de tintas, perfumes e etc. Essa abordagem, além de agregar valor aos resíduos, contribui para a economia circular e para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Quadro 2 - Principais matérias-primas utilizadas na produção de etanol

Matéria-prima	Tipo de substrato	Contexto de uso
Cana-de-açúcar	Sacarose	Principal matéria-prima no Brasil
Milho	Amido	Predominante nos EUA
Aveia, arroz, cevada, trigo, sorgo	Amido/sacarose	Usadas globalmente em menor escala
Beterraba, mandioca	Açúcares ou amido	Alternativas regionais (ex: mandioca no Brasil)
Biomassa lignocelulósica (resíduos agrícolas)	Celulose	Etanol de segunda geração (mais sustentável)

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2021)

Processo este bastante versátil, e pode ser realizado em diferentes escalas. No nível residencial, por exemplo, ele pode ser feito em recipientes plásticos simples, como garrafas de refrigerante, para a produção de bebidas caseiras. Já na escala industrial, o processo utiliza dornas de inox de grande capacidade. Esses equipamentos são fundamentais nas usinas sucroalcooleiras e indústrias de bebidas para a produção em grande escala (APARECIDO; CÁSSIA; ZERBINATTI, 2020).

Apesar dos benefícios evidentes dessas tecnologias, ainda existem desafios relacionados à sua implementação em larga escala com o intuito de reaproveitamento de resíduos orgânicos(LINS, 2021). Questões como o alto custo inicial de instalação de sistemas de fermentação, a falta de incentivos governamentais, a escassez de mão de obra qualificada e a carência de políticas públicas consistentes dificultam a disseminação dessas práticas. Sendo necessário, promover políticas de fomento, ampliar o acesso a tecnologias e fortalecer programas de educação ambiental que sensibilizem a população sobre a importância do reaproveitamento.

A adoção de tecnologias como a compostagem, biodigestores e produção de biocombustíveis representa um caminho viável e eficaz para o manejo sustentável dos resíduos orgânicos(SNIS, 2019). Essas práticas não apenas reduzem a pressão sobre os sistemas de destinação final como em aterro sanitário, como também geram valor econômico, fortalecem a segurança alimentar e energética, e contribuem para a mitigação das mudanças climáticas. O incentivo ao desenvolvimento tecnológico e à inovação nessa

área é fundamental para que o Brasil possa avançar rumo a um modelo de gestão de resíduos mais eficiente e comprometido com os princípios da sustentabilidade.

3.5. Fermentação alcoólica

A fermentação alcoólica é um dos processos biotecnológicos mais antigos utilizados pelo ser humano, sendo essencial tanto para a produção de bebidas, como vinho e cerveja, quanto, mais recentemente, para a fabricação de biocombustíveis. Segundo Alcântara *et al.* (2017) trata-se de um processo anaeróbio — realizado na ausência de oxigênio — no qual microrganismos, principalmente leveduras, convertem açúcares fermentáveis em etanol e dióxido de carbono .

O aproveitamento de resíduos orgânicos como matéria-prima fermentável tem ganhado destaque como uma estratégia sustentável e economicamente viável, contribuindo simultaneamente para a redução de resíduos urbanos e para a geração de produtos de valor agregado. Do ponto de vista bioquímico, a fermentação alcoólica compreende uma sequência de reações enzimáticas, iniciadas com a glicose, que percorre a via glicolítica (glicólise) até sua conversão final em etanol e dióxido de carbono (CO₂) (GUIDINI, 2013). Esse processo, além de viabilizar o reaproveitamento de substratos orgânicos descartados, apresenta elevada versatilidade, podendo ser aplicado em diferentes escalas — desde sistemas artesanais até processos industriais automatizados.

3.5.1. Tipos de fermentação

Existem diferentes modos de operação da fermentação alcoólica, definidos conforme a aplicação e a escala de produção. O modo batch (ou em batelada) é o mais comum em pequena escala e caracteriza-se por um ciclo fechado, no qual todos os ingredientes são adicionados no início do processo e nenhuma substância é introduzida ou removida até a finalização da fermentação (LIMA *et al.*, 2001). O sistema fed-batch, por sua vez, permite a adição gradual de substrato durante a fermentação, o que auxilia na prevenção do acúmulo de compostos inibidores e prolonga o tempo produtivo do microrganismo (LIMA *et al.*, 2001).

Em escala industrial, destaca-se a fermentação contínua, na qual substrato e microrganismos são continuamente adicionados ao reator, enquanto o produto (etanol) é retirado de forma constante. Essa configuração possibilita a operação por longos períodos, com maior produtividade e estabilidade do processo (ALCÂNTARA, 2022).

O principal microrganismo utilizado na fermentação alcoólica é a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, amplamente reconhecida por sua alta eficiência na conversão de açúcares em etanol, por sua tolerância a concentrações elevadas de álcool e pela capacidade de adaptação a diferentes substratos. É considerada uma levedura robusta, de fácil cultivo e largamente disponível, o que a consolida como a opção padrão nas indústrias alcooleiras (GUIDINI, 2013).

Em fermentações conduzidas a partir de resíduos hortifrutigranjeiros, contudo, é necessário considerar a diversidade de açúcares presentes e as possíveis interações com compostos inibidores, tais como ácidos orgânicos e fenóis liberados durante o pré-tratamento, que podem afetar a eficiência do processo.

3.5.2. Fatores que influenciam no processo da fermentação alcoólica

O sucesso da fermentação alcoólica depende de diversos fatores que influenciam diretamente o metabolismo microbiano e a eficiência da conversão de açúcares em etanol. Entre os principais parâmetros de controle, destacam-se o pH, a temperatura, o tempo de fermentação, a concentração de substrato e a presença de compostos inibidores (APARECIDO; CÁSSIA; ZERBINATTI, 2020).

O pH ideal para a fermentação com *Saccharomyces cerevisiae* situa-se entre 4,0 e 5,0, faixa em que a atividade enzimática é favorecida e o risco de contaminação por microrganismos indesejáveis é reduzido. Valores muito baixos ou elevados podem comprometer tanto o crescimento celular quanto a eficiência fermentativa. A temperatura também representa um parâmetro crítico: para a maioria das leveduras, a faixa ótima está entre 28 °C e 32 °C. Acima de 35 °C, observa-se inibição do crescimento e desnaturação de enzimas-chave; já temperaturas muito baixas reduzem a taxa metabólica, prolongando o processo (APARECIDO; CÁSSIA; ZERBINATTI, 2020).

O tempo de fermentação varia conforme o substrato e as condições operacionais, exigindo monitoramento constante da redução dos açúcares e do aumento da produção de etanol. A concentração inicial de substratos (glicose, frutose, sacarose, entre outros) deve ser equilibrada: valores excessivamente altos podem induzir estresse osmótico nas células, enquanto valores muito baixos reduzem o rendimento final.

Além disso, resíduos orgânicos, como os hortifrutigranjeiros, frequentemente contêm inibidores naturais, a exemplo de compostos fenólicos, que podem reduzir a eficiência da fermentação. Para Góes-Favoni *et al.* (2018) mitigar esses efeitos, tornam-se

necessários processos de pré-tratamentos, como a lavagem, trituração e ajuste do pH antes da inoculação das leveduras .

3.5.3. Destilação e obtenção de álcool

A destilação fundamenta-se em um princípio físico-químico simples, a diferença entre os pontos de ebulição dos componentes de uma mistura, conforme o quadro 2. O etanol, por exemplo, apresenta ponto de ebulição inferior ao da água (78,3 °C contra 100 °C), o que permite sua separação quando o mosto fermentado é aquecido (EMATER, 2023). Durante o aquecimento, o etanol evapora antes da água, podendo ser recuperado após a condensação do vapor. Esse processo possibilita a obtenção de etanol com diferentes graus de pureza, dependendo da técnica empregada e das condições operacionais (BOZA; HORII, 1998).

Quadro 3 - Compostos Voláteis no processo de destilação de vinho alcoólico

Composto	Nome Comum	Ponto de Ebulição (°C)	Análise (Resumida)
Aldeído acético	acetaldeído	20,4	Álcool volátil, subproduto da fermentação.
Dimetilsulfeto	DMS	37	Composto de enxofre com odor desagradável.
Metanol	álcool metílico	64,7	Álcool altamente tóxico.
Etanol	álcool etílico	78,3	Álcool principal de bebidas e combustíveis.
Acetato de etila	etanoato de etila	77	Éster com aroma de frutas e solvente.
n-Propanol	álcool propílico	97,2	Contribui para o corpo e o sabor da bebida.
sec-Butanol	butan-2-ol	99,5	Álcool superior que afeta o perfil de sabor.

Fonte: Adaptado de CETESB (2025)

Uma vez concluída a destilação e atingida a concentração adequada ($\geq 70\%$ v/v), o produto pode ser utilizado diretamente como álcool sanitizante (SEQUINEL *et al.*, 2020), em conformidade com as normas estabelecidas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. Tal abordagem integra os princípios de sustentabilidade, do reaproveitamento de resíduos e da biossegurança, configurando-se como uma alternativa promissora para comunidades, cooperativas e pequenos produtores que buscam agregar valor a materiais antes descartados.

A literatura destaca a cana-de-açúcar como uma das matérias-primas mais eficientes para a produção de etanol. Cardoso *et al.* (2020) verificaram rendimento médio

de 9,83% de etanol a partir da cana, valor consideravelmente superior ao obtido com batata inglesa (1,7%) e beterraba (1,24%), como apresentado na tabela 1. Em escala industrial, estima-se que uma tonelada de cana-de-açúcar possa gerar aproximadamente 86 litros de etanol hidratado (0,085 L/kg), o que evidencia o elevado potencial de conversão dessa cultura.

Tabela 1 - Parâmetros finais do processo de fermentação a partir de diferentes matérias-primas

Posterior a fermentação	Volume de substrato	Temperatura Final	Média da densidade final	Média do rendimento de etanol
Cana-de-açúcar	500 ml	24 °C	1020,9	9,83 %
Batata inglesa	500 ml	24 °C	1018,4	1,7 %
Beterraba	500 ml	24 °C	1000,9	1,24 %

Fonte: Adaptado de Cardoso(2020)

Há várias formas de destilação, sendo os mais comuns a destilação simples e a destilação fracionada. A destilação simples é aplicada quando os componentes da mistura apresentam pontos de ebulição bastante distintos (RECHE; FRANCO, 2009). No caso do etanol, cuja separação da água requer maior precisão, a destilação fracionada é preferível, pois proporciona uma separação mais eficiente por meio da utilização de uma coluna de fracionamento. Esse equipamento aumenta o percurso do vapor, promovendo maior contato entre as fases líquida e gasosa e, conseqüentemente, facilitando a remoção de impurezas (LEAL, 2015).

Em laboratório, a destilação costuma ser realizada em pequena escala, utilizando equipamentos relativamente simples, mas que exigem atenção ao manuseio e ao controle da temperatura (LEAL, 2015). Entre os componentes básicos estão: o balão de destilação (onde a mistura é aquecida), o condensador (responsável pelo resfriamento do vapor e sua transformação em líquido), o termômetro (para controle da temperatura), além de suporte universal com garras, mangueiras de entrada e saída de água e frascos para coleta do destilado. Em alguns casos, acopla-se uma coluna de fracionamento entre o balão e o condensador, o que eleva significativamente a pureza do álcool obtido (LEAL, 2015).

A taxa de aquecimento é um fator importante, quando muito rápida, pode ocasionar o arraste de impurezas juntamente com o etanol, reduzindo a qualidade do destilado. Outro aspecto crucial é a taxa de condensação, a água deve estar suficientemente fria para garantir a condensação eficiente do vapor de etanol, o ideal é manter o processo entre 78 °C e 80 °C, faixa em que ocorre a maior evaporação do etanol (MORAES, 2006).

Em escala industrial, os princípios da destilação permanecem os mesmos, mas os equipamentos são adaptados para lidar com maiores volumes e assegurar maior eficiência. Segundo Moraes (2006), na indústria utilizam-se colunas de destilação em aço inox, sistemas de aquecimento por vapor, dispositivos automáticos de controle de temperatura e pressão.

Outro aspecto relevante refere-se ao destino dos resíduos pós-destilação. O bagaço e o líquido remanescente após a retirada do etanol ainda contêm matéria orgânica e podem ser encaminhados a processos de compostagem ou biodigestão anaeróbia, fortalecendo o conceito de economia circular e de aproveitamento integral dos recursos (EMBRAPA, 2022). Essa abordagem integrada reforça os pilares da sustentabilidade e da responsabilidade socioambiental.

Conforme destaca Lins (2021), a destilação representa uma etapa-chave na cadeia de produção do álcool a partir de resíduos orgânicos. Seu domínio técnico é indispensável para garantir a pureza e a qualidade do produto final, seja para uso como sanitizante ou como biocombustível. A simplicidade conceitual, aliada à complexidade prática, faz desse processo uma verdadeira ponte entre a ciência e a aplicação cotidiana, capaz de transformar resíduos em soluções úteis e sustentáveis.

3.6. Aplicações e utilizações do álcool

O álcool etílico, ou etanol, ocupa um papel central em diferentes setores industriais e científicos. Sua relevância decorre das propriedades físico-químicas que o caracterizam, elevada volatilidade, boa miscibilidade em água, capacidade de solubilizar compostos orgânicos e reconhecida ação antisséptica (SEQUINEL *et al.*, 2020). Essas características fazem do álcool um insumo versátil, empregado tanto em processos industriais, como produção de tintas, perfumes, medicamentos e solventes, quanto no cotidiano doméstico, sendo utilizado na limpeza de superfícies.

É uma substância essencial para áreas como saúde pública, química, biotecnologia, energia e higiene. É uma das principais substâncias utilizadas na

higienização de superfícies e na prevenção da transmissão de microrganismos patogênicos. Segundo Sequinel *et al.* (2020), seu uso se intensificou significativamente durante a pandemia de COVID-19, mas seu papel na saúde pública já era consolidado há décadas.

No mercado, o mais comum é o álcool etílico hidratado a 70% (INPM) nas formas líquida ou em gel. A concentração de 70% é considerada ideal porque permite a penetração do álcool nas membranas celulares dos microrganismos, garantindo sua desnaturação e morte. Concentrações superiores, evaporam rapidamente e não têm tempo suficiente para agir de forma eficaz sobre os microrganismos (ANVISA, 2020).

Uma das utilizações mais expressivas do álcool no Brasil é sua aplicação como biocombustível. O etanol se consolidou como alternativa renovável diante dos desafios ambientais atuais. Produzido a partir da cana-de-açúcar (MOREIRA, 2022), o etanol apresenta vantagens significativas, reduz emissões de dióxido de carbono e movimentava uma cadeia produtiva como a sucroalcooleira. No primeiro trimestre de 2024, foram produzidos 2,576 milhões de m³ de etanol hidratado, conforme divulgado em boletim trimestral do setor (ANP, 2024).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Processo de obtenção da matéria-prima

Para a realização do estudo, foi utilizado suco de mexericas Ponkan (*Citrus reticulata Blanco*) como os da figura 1, provenientes de uma propriedade rural localizada no município de Rio Bonito do Iguçu – PR, a coleta se deu no mês de junho de 2025. Os volumes de descarte na propriedade se assemelham com os de supermercados, sendo que o consumo do agricultor é inferior à produção. A seleção dos frutos foi realizada manualmente, de modo a eliminar aqueles que apresentavam sinais de deterioração, podridão, presença de fungos ou estágio de maturação inadequado (excessivamente verdes).

Figura 1 - Fruto da Mexerica Ponkan (*Citrus reticulata Blanco*)



Fonte: Autoria própria(2025)

Antes do processamento, as frutas foram submetidas à lavagem em água corrente, visando à remoção de sujidades, poeira, resíduos de campo e microrganismos superficiais, assegurando melhores condições higiênico-sanitárias do material.

O peso líquido total bruto processado foi de 86,64 kg de frutos. As mexericas foram cortadas e processadas em um extrator de suco doméstico, obtendo-se 36 litros de suco.

4.2. Processo de preparo do mosto

O suco extraído foi filtrado com peneira para a remoção de partículas maiores, garantindo um mosto mais limpo e adequado à fermentação. O volume total de 36 litros foi dividido em três galões (devidamente sanitizados com álcool 70°(v/v)), cada um contendo 12 litros de suco.

Com o auxílio de um refratômetro digital portátil, foi constatado o valor inicial de sólidos solúveis totais (*Brix*) de 8,33 °Bx, sendo necessária a adição de 400g (pesado em balança de bancada semianalítica) de açúcar refinado em cada galão, até atingir 12,0 °Bx, valor considerado ideal para maximizar o processo de fermentação.

Com o auxílio de um pHmetro de bancada, o pH inicial medido foi de 4,14, dentro da faixa recomendada para fermentação alcoólica com *Saccharomyces cerevisiae*, condição que favorece a atividade enzimática das leveduras e reduz o risco de contaminação por microrganismos indesejáveis.

4.3. Processo de inoculação

Foi utilizado fermento biológico seco instantâneo da marca Fleischmann, por conter *Saccharomyces cerevisiae*, amplamente empregada para fermentações e reconhecida pela eficiência na conversão de açúcares em etanol.

A proporção adotada foi de 6 g de fermento para os 12 L de mosto, o que corresponde a cerca de 0,5 g/L — um valor coerente com recomendações de fermentação caseira, onde se sugere aproximadamente 0,5 a 0,8 g/L para lotes com densidade alcoólica comum.

A levedura foi incorporada ao mosto por meio de agitação manual vigorosa, assegurando homogeneidade e distribuição uniforme das células no meio fermentativo, favorecendo o início eficaz da fermentação.

4.4. Processo de fermentação

A fermentação foi conduzida em galões de água mineral com capacidade nominal de 20 litros, como apresentado na Figura 2, porém contendo apenas 12 litros de mosto em cada unidade, de modo a permitir espaço livre para a formação de espuma e liberação

de gases. Para permitir a saída de CO₂ e, simultaneamente, impedir a entrada de ar e de contaminantes, utilizou-se *airlock* do tipo “S” contendo solução sanitizante — especificamente álcool 70% (v/v).

Como o processo de fermentação ocorreu no mês de junho, período de inverno, foi necessário adotar medidas para garantir que a temperatura se mantivesse dentro da faixa adequada ao desempenho da *Saccharomyces cerevisiae*. Para esse fim, os galões foram posicionados em banho-maria dentro de uma caixa térmica de isopor conforme a Figura 3, minimizando perdas térmicas e proporcionando estabilidade ao processo. A temperatura da água foi controlada por meio de ebulidor elétrico acoplado a um controlador digital de temperatura, que acionava o aquecimento sempre que o valor se aproximava do limite inferior da faixa desejada.

Figura 2 - Mosto Pronto para o Processo de Fermentação



Fonte: Autoria própria(2025)

Com esse sistema, foi possível manter a água entre 26 °C e 28 °C, intervalo que favorece o metabolismo da levedura e a eficiência da fermentação, além de evitar estresse térmico ou queda brusca de temperatura. O controle automatizado também garantiu uniformidade nas condições dos diferentes galões, contribuindo para a homogeneidade do processo fermentativo.

Figura 3 - Sistema De Controle De Temperatura

Fonte: Aatoria própria(2025)

4.5. Processo de Destilação

Após o término da fermentação alcoólica, obteve-se um volume inicial de 36 litros de vinho de mexerica (*Citrus reticulata Blanco*). Antes da destilação, o vinho passou pelas etapas de trasfega e decantação, realizadas com o objetivo de separar a fração líquida do sedimento formado por leveduras mortas, restos celulares e partículas sólidas provenientes da polpa da fruta. Essa operação, embora fundamental para evitar que resíduos sólidos se carbonizem durante o aquecimento e prejudiquem o aroma do destilado, resultou em perdas volumétricas. Assim, apenas 25 litros de mosto clarificado foram conduzidos ao destilador.

A destilação foi realizada em um alambique de cobre equipado com deflegmador, tecnologia tradicionalmente empregada por apresentar alta eficiência na condução térmica e permitir uma separação mais seletiva dos vapores. O deflegmador atua promovendo a condensação parcial de compostos menos voláteis, retornando-os ao caldeirão e enriquecendo o destilado em etanol.

O processo iniciou-se com o aquecimento gradual do mosto, aplicando-se chama direta sob o alambique como demonstrado na Figura 4. A partir desse ponto, diferentes frações foram coletadas de acordo com a faixa de temperatura e com as características físico-químicas do destilado.

Figura 4 - Aquecimento do mosto, aplicando-se chama direta sob o alambique



Fonte: Autoria própria(2025)

4.5.1. Fração Cabeça (65–78 °C)

A primeira fração destilada, denominada cabeça, começou a ser coletada quando a temperatura no topo do alambique atingiu cerca de 65 °C e se estendeu até aproximadamente 78 °C. Essa fração concentra compostos de menor peso molecular e maior volatilidade, como metanol, aldeídos e ésteres leves. Por apresentarem odor forte e características tóxicas, foram descartados (EMATER-MG, 2023).

4.5.2. Fração Coração (78–92 °C)

Com a temperatura estabilizada na faixa de 78 a 92 °C, ocorreu a destilação principal, denominada coração. Nessa etapa, predominou a vaporização do etanol (ponto de ebulição: 78,3 °C) (EMATER-MG, 2023), resultando em um destilado límpido, com teor alcoólico médio de 38% v/v, aroma preservado da fruta e ausência de compostos indesejáveis em concentrações relevantes. Essa fração constitui o produto nobre do processo, sendo a mais valorizada tanto em aplicações alimentícias quanto industriais.

4.5.3. Fração Cauda (92–98 °C)

À medida que a temperatura ultrapassou 92 °C, iniciou-se a coleta da fração cauda, caracterizada pela maior presença de compostos de alto peso molecular, como

fuselóis, álcoois superiores e ácidos orgânicos. Essa fração apresenta coloração ligeiramente mais turva, aroma desagradável e teor alcoólico em queda progressiva, chegando a valores próximos de 10–15% v/v.

4.5.4. Ponto de parada (~98 °C)

O processo foi interrompido quando a temperatura atingiu cerca de 98 °C, momento em que a liberação de etanol tornou-se mínima e o destilado passou a apresentar baixa concentração alcoólica e qualidade sensorial reduzida. A continuidade da operação, nesse ponto, tornaria o processo energeticamente ineficiente e comprometeria a qualidade final do produto.

4.5.5. Aferição da graduação alcoólica

A graduação alcoólica das frações coletadas foi determinada com o uso de um densímetro para álcool (alcoholímetro), instrumento específico para soluções hidroalcoólicas. O procedimento consistiu em:

1. Transferência do destilado para uma proveta de vidro transparente.
2. Inserção cuidadosa do densímetro, evitando bolhas de ar.
3. Leitura do valor indicado na escala graduada.

Esse método permitiu avaliar a variação do teor alcoólico ao longo da destilação e confirmar que a fração principal (coração) manteve-se em torno de 38% v/v, valor compatível com processos artesanais e dentro da faixa esperada para destilados obtidos a partir de frutas cítricas(EMATER-MG, 2023).

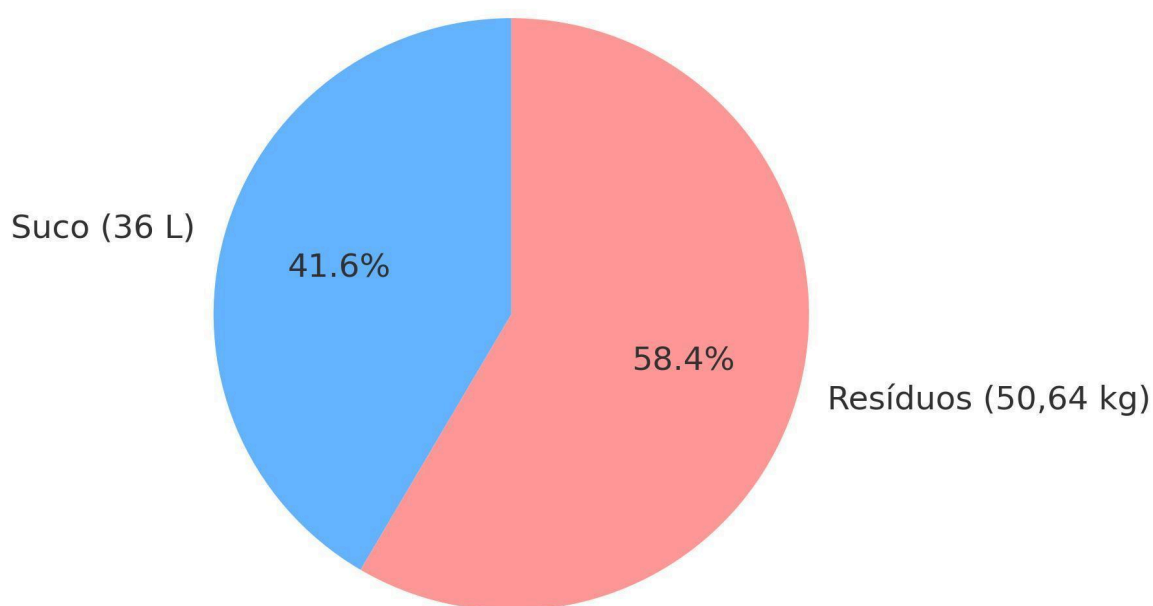
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Rendimento de extração e caracterização do mosto

O processamento de 86,64 kg de mexericas resultou em 36 L de suco fresco e 50,64 kg de resíduos sólidos (casca, bagaço e sementes) conforme demonstrado no gráfico 3. O rendimento em suco foi, portanto, de aproximadamente 41,6% em volume em relação ao peso bruto da fruta.

O suco apresentou Brix inicial de 8,33° e pH médio de 4,13, o qual foi necessário a correção dos sólidos solúveis, para a fermentação alcoólica com *Saccharomyces cerevisiae*, elevando o °Brix para 11,8.

Gráfico 2 - Rendimento Volume/Massa de matéria-prima



Fonte: Aatoria própria(2025)

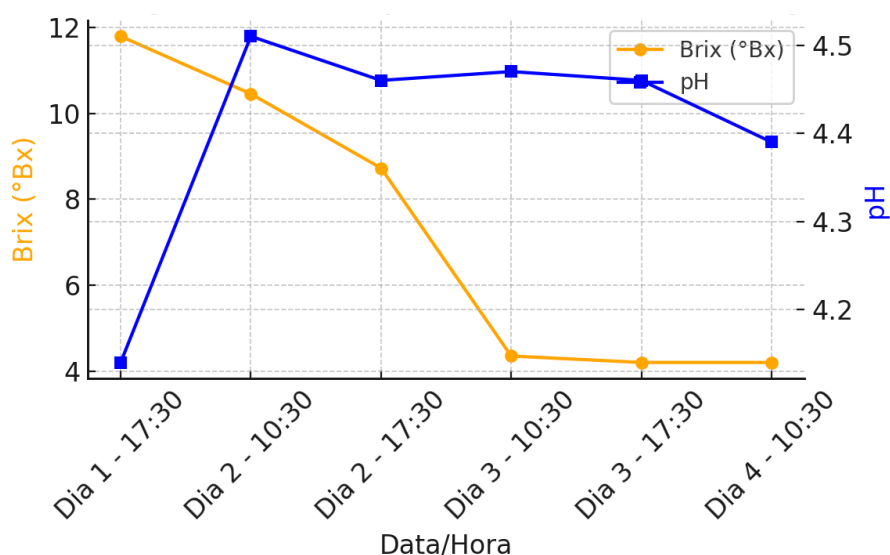
5.2. Desempenho da fermentação

O acompanhamento diário de pH e Brix evidenciou consumo rápido dos açúcares nos primeiros dois dias, o qual pode ser observado no gráfico 3, com redução de 11,8° para cerca de 4,2 °Brix, havendo um consumo de 7,6 °Brix. O pH apresentou leve aumento inicial (provavelmente devido à liberação de compostos nitrogenados e à

tamponamento natural do meio), estabilizando-se próximo a 4,4.

A estabilização do Brix em 4,2 por mais de 24 horas indicou o término da fermentação, mesmo com liberação residual de CO₂ no airlock. Esse perfil é consistente com fermentações frutíferas de alta taxa inicial de conversão, nas quais a maior parte dos açúcares é metabolizada nos primeiros 48–72 h. A manutenção de pH ácido ao longo do processo é benéfica, pois reduz a proliferação de microrganismos contaminantes.

Gráfico 3 - Acompanhamento de pH e sólidos solúveis

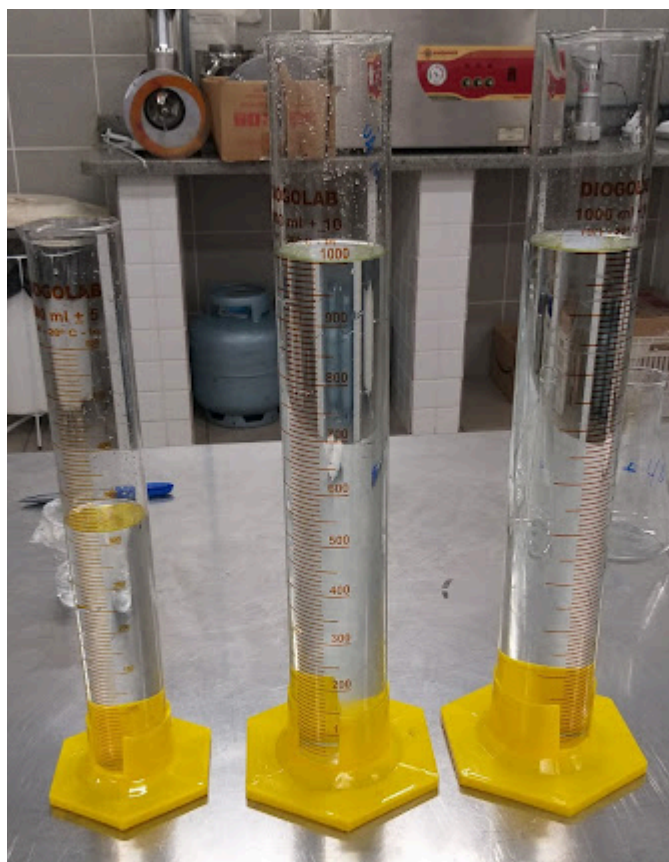


Fonte: Autoria própria(2025)

5.3. Destilação e rendimento alcoólico

Para a destilação, foram utilizados 25 L de suco fermentado (dos 32 L inicialmente destinados à fermentação, havendo perda de 7 L na trasfega e decantação). O processo de destilação em alambique de cobre com deflegmador permitiu separar as frações cabeça, coração e cauda. O rendimento do coração foi de 2,53 L de destilado conforme a Figura 4, a 38% v/v de etanol, o que corresponde a um total de 0,96 L de álcool presente nos 2,53 L de destilado, correspondendo a 0,011 L de álcool por quilograma de fruta. Esse valor encontra-se dentro da faixa esperada para processos fermentativos, sobretudo quando comparado ao estudo de Cardoso *et al.* (2020), no qual a análise de 500 mL de mosto de cana-de-açúcar apresentou rendimento médio de 0,098 L/L de etanol, enquanto a batata inglesa e a beterraba resultaram em 0,017 L/L e 0,012 L/L, respectivamente.

Figura 5 - Volume total do “coração” do destilado



Fonte: Autoria própria(2025)

O processo de fermentação foi influenciado pelo Brix inicial relativamente baixo (11,8°), o que limitou o potencial alcoólico e resultou em um rendimento inferior às fermentações conduzidas com substratos mais concentrados em açúcares, como o melaço ou o caldo de cana. Ainda assim, o desempenho alcançado mostrou-se coerente com resultados obtidos em fermentações de frutas cítricas, conforme o estudo realizado por Alcântara *et al.* (2017) com suco de laranja fermentado por diferentes linhagens de *Saccharomyces cerevisiae*. A destilação da mexerica preservou compostos aromáticos cítricos, capazes de agregar valor ao produto final.

A destilação em alambique proporcionou a separação das frações (cabeça, coração e cauda), resultando em destilado de 38% v/v e aroma característico da fruta, sendo que o processo de bidestilação poderia aumentar a graduação alcoólica, conforme demonstrado por Silva *et al.* (2020), que obtiveram aguardente bidestilada com teor alcoólico superior a 60% v/v.

A análise da viabilidade do ponto de vista ambiental envolve a consideração de fatores não monetários, exercem influência direta sobre a sustentabilidade. Tal tratamento é importante em iniciativas ambientais, como o aproveitamento de resíduos ricos em açúcares para a produção de álcool, nas quais os benefícios sociais e ambientais assumem papel relevante.

O elemento qualitativo mais significativo, é a disponibilidade de matéria-prima, os resíduos hortifrutigranjeiros especialmente os provenientes da mexerica (*Citrus reticulata* Blanco), são abundantes em feiras e mercados locais, onde com frequência os frutos são descartados por não atenderem aos padrões estéticos exigidos para o consumo *in natura*. Essa oferta garante baixo custo de aquisição e do ponto de vista ambiental, a reutilização contribui para a mitigação de passivos resultantes da decomposição da matéria orgânica em aterros.

Uma forma de agregar valor seria a transformação de excedentes de frutas em bebida alcoólica, alternativa viável para pequenos produtores e comunidades locais, especialmente no aproveitamento de safras não comercializadas. A aceitação é um fator positivo, já que projetos voltados à redução de desperdícios e ao reaproveitamento de resíduos costumam receber apoio da sociedade, alinhando-se a políticas ambientais. Mesmo sem a análise numérica detalhada de custos, os indicadores qualitativos demonstram que o projeto é viável, uma vez que reúne fatores como abundância de insumos, relevância ambiental e aceitação social.

Algumas limitações foram observadas no processo de fermentação e merecem atenção, como a falta de suplementação nutricional do mosto e as perdas ocorridas em determinadas etapas do processo. Dessa forma, recomenda-se que futuras pesquisas explorem o uso de aditivos nutricionais para otimizar o metabolismo das leveduras, a aplicação de metodologias de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para mensurar os impactos ambientais de maneira mais abrangente. Também se sugere o emprego de sistemas de destilação fracionada, capazes de proporcionar um destilado com maior teor alcoólico e maior pureza, o qual poderia possibilitar a produção de etanol combustível.

Essas melhorias podem elevar a eficiência de conversão, padronizar a qualidade do produto e aumentar o teor alcoólico final, fortalecendo o potencial do processo como uma alternativa sustentável, ambientalmente vantajosa para o aproveitamento de resíduos de hortifrutigranjeiros.

6. CONCLUSÃO

O processamento da mexerica ponkan “citrus reticulata blanco”, mostrou viabilidade técnica para a produção de álcool, ao final dos processos de fermentação e destilação foi obtido um destilado com teor alcoólico de 38% v/v, totalizando 2,530L. O monitoramento e controle dos parâmetros de pH e Brix permitiu acompanhar a conversão dos açúcares, assegurando o término do processo e reduzindo contaminações.

REFERÊNCIAS

- AIRES, K. O. *et al.*. Diversidade bacteriana associada à biodegradação de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 5, p. 715–726, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180141>. Acesso em: 28 nov. 2025.
- ALCÂNTARA, V. C. de Castro *et al.* Vinho de laranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck): um estudo com diferentes linhagens de *Saccharomyces cerevisiae*. **Journal of Engineering and Exact Sciences (JCEC)**, Viçosa, v. 3, n. 6, p. 780–785, 2017. DOI: 10.18540/jcecvl3iss6pp0780-0785. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/335a0d75-061d-4238-988a-74f85e7de0bb>. Acesso em: 17 maio 2025.
- ALCÂNTARA, L. C. **Fermentação alcoólica extrativa**: técnicas, aplicação e perspectivas. 2022. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2022. Disponível em: https://sip.prg.ufla.br/arquivos/php/bibliotecas/repositorio/download_documento/baixar_por_anosemestre_matricula.php?arquivo=20212_201521024. Acesso em: 16 set. 2025.
- APARECIDO, D. P.; CÁSSIA, R. M. V.; ZERBINATTI, A. G. Fatores que afetam a fermentação alcoólica. **Ciência & Tecnologia**, Jaboticabal, v. 12, n. 1, p. 44–55, 2020. DOI: 10.52138/citec.v12i1.113. Disponível em: <https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/citec/article/view/113>. Acesso em: 07 maio 2025.
- BOZA, Y.; HORII, J. Influência da destilação sobre a composição e a qualidade sensorial da aguardente de cana-de-açúcar. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 18, n. 4, p. 391–396, out. 1998. DOI: 10.1590/S0101-20611998000400006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/XhfCVrXKwG6TGGC9phbYSSK/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 24 ago. 2025.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos**: manual de orientação. Brasília, DF: MMA, 2018. 68 p. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80058/Compostagem_Manual_2018_11_26_digital_figuras_c_titulo.pdf. Acesso em: 24 ago. 2025.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis (ANP). Superintendência de Defesa da Concorrência. **Boletim trimestral de preços e volumes de combustíveis**. Edição nº 21. 1º Trimestre de 2024. Brasília, DF:ANP, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/btpvc-1/2024/boletim-trim-precos-21-1t24.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2025.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 350, de 19 de março de 2020**. Define os critérios e os procedimentos extraordinários e temporários para a fabricação e comercialização de preparações antissépticas ou sanitizantes. Brasília, DF: Anvisa, 2020. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/portaria/res/resolucao%20n%C2%BA%20350-anvisa.htm. Acesso em: 07 maio 2025.

BRASIL. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER) **Produção de cachaça de alambique**. Belo Horizonte: Emater-MG, 2023. (Série Ciências Agrárias). Disponível em: <https://www.emater.mg.gov.br/download.do?id=87537>. Acesso em: 29 nov. 2025.

BRASIL. Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **Biogás e suas contribuições para os objetivos de desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1149613/1/DOC-49-final-1.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos - 2019**. 18. ed. Brasília, DF: SNIS, 2020. 244 p. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/residuos-solidos-1/2019/Diagnostico_RS2019.pdf. Acesso em: 07 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Comissão para o Desenvolvimento Sustentável do Agronegócio (CDSA). **Enfrentamento a perdas e desperdício de alimentos: relatório final**. Brasília, DF: MAPA, 2022. 17 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/perdas-e-desperdicio-de-alimentos/publicacoes-em-destaque/relatorio-final-perdas-e-desperdicio>. Acesso em: 07 maio 2025.

CARDOSO, L. F.; OLIVEIRA, D.; OLIVEIRA, F. F.; GULLO-LUZENTE, F. P. Produção comparativa de etanol da cana-de-açúcar, batata inglesa e beterraba por fermentação. **Revista Saúde & Diversidade**, Boa Vista, v. 4, n. 1, p. 45–49, 2020. DOI: 10.18227/hd.v4i1.7530. Disponível em: <https://revista.ufrr.br/hd/article/view/7530>. Acesso em: 17 ago. 2025.

Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo (CETESB). **Ficha de informações de produto químico: acetaldeído**. São Paulo, [s.d.]. Disponível em: https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=ACETALDE%C3%84. Acesso em: 22 set. 2025.

Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo (CETESB). **Informações técnicas adicionais: Licença Prévia: biodigestão anaeróbica**. São Paulo, [s.d.]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/licenciamentoambiental/informacoes-tecnicas-adicionais-licenca-previa>. Acesso em: 24 ago. 2025.

ESPÍNDOLA, Â.; KELLER, A. M. Resíduos orgânicos desperdiçados do setor de hortifrutigranjeiros em um supermercado de Caxias do Sul. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**. Campo Grande, v. 24, n. 5-esp., p. 560–565, 2021. DOI: 10.17921/1415-6938.2020v24n5-esp.p560-565. Disponível em: <https://ensaioseciencia.pgsscogna.com.br/ensaioseciencia/article/view/8996>. Acesso em: 25 maio 2025.

Fundo de População das Nações Unidas (UNFPA). **A verdadeira crise de fecundidade**: a busca pela autonomia reprodutiva em um mundo em transformação. Nova York: UNFPA, 2025. ISBN 9789211542837. Disponível em: https://brazil.unfpa.org/sites/default/files/pub-pdf/2025-07/SWOP2025_0.pdf. Acesso em: 28 nov. 2025.

GÓES-FAVONI, S. P.; MONTEIRO, A. C. C.; DORTA, C.; CRIPPA, M. G.; SHIGEMATSU, E. Fermentação alcoólica na produção de etanol e os fatores determinantes do rendimento. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 9, n. 4, p. 285–296, 2018. DOI: 10.6008/SPC2179-6858.2018.004.0021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/335214046_Fermentacao_alcoolica_na_producao_de_etanol_e_os_fatores_determinantes_do_rendimento. Acesso em: 22 ago. 2025.

GOMES, L. P. *et al.* Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p. 449–462, jul. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000120751>. Acesso em: 18 set. 2025.

GUIDINI, C. Z. **Fermentação alcoólica em batelada alimentada empregando *Saccharomyces cerevisiae* de características floculantes**. 2013. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. DOI: 10.14393/ufu.te.2013.43. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15069>. Acesso em: 24 ago. 2025.

Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística (IBGE). **Pesquisa de orçamentos familiares 2017-2018**: análise do consumo alimentar pessoal no Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101742.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2025.

LEAL, J. P. Destilação. **Revista de Ciência Elementar**, Porto, v. 3, n. 1, p. 083, 2015. DOI: 10.24927/rce2015.083. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2015/083/>. Acesso em: 15 ago. 2025.

LINS, G. K. Z. N. **Análise da viabilidade da produção de etanol a partir dos resíduos orgânicos alimentícios da cidade de Foz do Iguaçu/PR para aplicação como combustível automotivo**. 2021. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/bitstreams/d2bfcdbf-cbfb-4adb-ae5f-e6193d104a08/download>. Acesso em: 22 ago. 2025.

MOREIRA, J. I. A. **Cana-de-açúcar e a produção de etanol**. 2022. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico de Nível Médio Integrado em Açúcar e Álcool) – Instituto Federal de Alagoas, Penedo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifal.edu.br/server/api/core/bitstreams/8bd3e171-37b0-4fcd-95cc-6c082277a676/content>. Acesso em: 10 mar. 2025.

MORAES, M. J. de. **Estudo comparativo da eficiência de separação entre colunas de destilação convencional e de para destilação**. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=476159>. Acesso em: 25 ago. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). **Desperdício de alimentos**. São Paulo, 2017. 28 slides. Apresentação realizada na Convenção ABRAS em 12 set. 2017. Disponível em: https://www.abras.com.br/pdf/Apresent_FAO.pdf. Acesso em: 30 nov. 2025.

Organização Das Nações Unidas Para A Alimentação E Agricultura (FAO). **Global food losses and food waste: extent, causes and prevention**. Roma: FAO, 2011. Disponível em: <https://www.fao.org/4/mb060e/mb060e00.htm>. Acesso em: 22 ago. 2025.

Programa Das Nações Unidas Para O Meio Ambiente (PNUMA). **Índice de desperdício de alimentos em 2021**. Nairóbi: PNUMA, 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/resources/relatorios/indice-de-desperdicio-de-alimentos-2021>. Acesso em: 15 ago. 2025.

RECHE, R. V.; FRANCO, D. W.. Distinção entre cachaças destiladas em alambiques e em colunas usando quimiometria. **Química Nova**, v. 32, n. 2, p. 332–336, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000200012>. Acesso em: 15 ago. 2025.

SEQUINEL, R. *et al.* Soluções a base de álcool para higienização das mãos e superfícies na prevenção da covid-19: compêndio informativo sob o ponto de vista da química envolvida. **Química Nova**, v. 43, n. 5, p. 679–684, maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170553>. Acesso em: 28 nov. 2025.

SILVA, A. P. *et al.* Composição química de aguardente de cana obtida por diferentes métodos de destilação. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 23, p. e2018308, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjft/a/g8ZJyQW8gW4TFkgRjYdDTz/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 17 out. 2025.

TILIO NETO, P. As mudanças climáticas na ordem ambiental internacional. *In*: TILIO NETO, P. **Ecopolítica das mudanças climáticas: o IPCC e o ecologismo dos pobres**. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 2010. p. 37-81. Disponível em: <https://books.scielo.org/id/x9z8z/pdf/tilio-9788579820496-06.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2025.

United Nations Environment Programme (UNEP). **Food Waste Index Report 2024: Think Eat Save – Tracking progress to halve global food waste**. Nairóbi: UNEP, 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/resources/publicacoes/relatorio-do-indice-de-desperdicio-de-alimentos-2024>. Acesso em: 24 abr. 2025.

VITOI, R. T.; ARAUJO, J. B.; GOMES, R. Z.; CLEMENTE, A. C. S. O. Projeto de educação

ambiental: compostagem como ferramenta pedagógica. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 8, n. 1, p. e76997, 2025. DOI: 10.34188/bjaerv8n1-043. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/76997>. Acesso em: 24 ago. 2025.