

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS - *CAMPUS* BAMBUÍ  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

**RHAYANE MOREIRA CARVALHO**

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR  
DESTINADA À PRODUÇÃO DE ETANOL EM INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

**BAMBUÍ-MG  
2025**

**RHAYANE MOREIRA CARVALHO**

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR  
DESTINADA À PRODUÇÃO DE ETANOL EM INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Alimentos do IFMG – *Campus Bambuí* como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Profa. Dra. Sônia de Oliveira  
Duque Paciulli

Coorientadora: Profa. Dra. Lairy Silva Coutinho

---

**Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - *Campus Bambuí***

---

C331c Carvalho, Rhayane Moreira.

Caracterização do processo de fermentação da cana-de-açúcar destinada à produção de etanol em indústria sucroalcooleira [manuscrito] / Rhayane Moreira Carvalho. – 2025.

56 f. ; il. : color

Orientadora: Sônia de Oliveira Duque Paciulli.

Coorientadora: Lairy Silva Coutinho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. *Campus Bambuí*, 2025.

1. Fermentação alcoólica. 2. *Saccharomyces cerevisiae*. 3. Rendimento alcoólico. 4. Cana-de-açúcar. 5. Etanol hidratado. I. Paciulli, Sônia de Oliveira Duque . II. Coutinho, Lairy Silva . III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus Bambuí*. IV. Título.

CDD. 661.812

---

**Catálogo: João Batista Rodrigues - CRB-6/2022**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**  
Campus Bambuí  
Diretoria de Ensino  
Departamento de Ciências Agrárias  
Faz. Virgínia - Rodovia Bambuí/Moatins - Km 05 - Caixa Postal 05 - CEP 30900-000 - Bambuí - MG  
[11.3431.4900](mailto:11.3431.4900) - [www.ifmg.edu.br](http://www.ifmg.edu.br)

## **RHAYANE MOREIRA CARVALHO**

### **CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO DA CANA DE AÇÚCAR DESTINADA A PRODUÇÃO DE ETANOL EM INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Alimentos do IFMG - Campus Bambuí como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientadora: Profa. Dra. Sônia de Oliveira Duque Paciulli

Co-orientadora: Profa. Dra. Lairy Silva Coutinho

Aprovado em: 05 / 11 / 2025 pelo bancado orientador

Prof. Dra. Sônia de Oliveira Duque Paciulli (Orientadora)

Prof. Dra. Lairy Silva Coutinho (Co-orientadora)

Prof. Dr. Rogerio Amaro Gonçalves (IFMG-Bambuí)

Prof. Ma. Alessandra Regina Vital (IFMG-Bambuí)

Bambuí, 13 de novembro de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Sônia de Oliveira Duque Paciulli, Professor**, em 13/11/2025, às 07:42, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Lairy Silva Coutinho, Professora EBT**, em 13/11/2025, às 08:46, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Rogerio Amaro Gonçalves, Professor**, em 13/11/2025, às 12:30, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Alessandra Regina Vital, Técnica de Laboratório / Área Alimentos**, em 14/11/2025, às 06:54, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2523975** e o código CRC **C76D948B**.

23209.003154/2022-36

2523975v1

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois, sem a Sua ajuda, a Sua direção e o Seu agir, eu não teria capacidade para estar aqui, por se fazer presente em todos os momentos, por ter me dotado de saúde, sabedoria e disposição para alcançar mais uma vitória em minha vida.

Aos meus pais, João e Aparecida, expresso minha profunda gratidão pelo amor, carinho, educação e orientação, essenciais em todas as decisões e escolhas que tomei até hoje. O apoio incondicional e a confiança que sempre me transmitiram me deram segurança para enfrentar desafios e perseverar diante das dificuldades da vida. Sou profundamente grata pelo exemplo de dedicação, responsabilidade e integridade que sempre demonstraram, inspirando-me a buscar o melhor em minha trajetória acadêmica e pessoal. Seu cuidado, sabedoria e incentivo ajudaram-me a desenvolver disciplina, resiliência e coragem, qualidades fundamentais para minha formação. Sinto-me privilegiada por contar com a presença constante de vocês e por todo amor e orientação que sempre me proporcionaram.

Ao meu irmão, Matheus, e à minha cunhada, Nayara, que sempre foram exemplos de caráter, sabedoria e carinho, trazendo apoio e inspiração em minha trajetória. Ao meu esposo, Thales, que esteve ao meu lado com dedicação, paciência e incentivo constantes, tornando cada desafio mais leve e cada conquista mais significativa. À minha sobrinha, Júlia, cuja presença alegre e contagiante iluminou momentos importantes e tornou a caminhada ainda mais especial.

Expresso minha gratidão à minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio, força e confiança. Agradeço, também, ao Gerente Industrial da “Bambuí Bioenergia”, Sr. Renato Nunes de Souza, pela motivação, pelo seu profissionalismo e pela valiosa chance de aprendizado. Quero reconhecer o Gerente de Qualidade, Sr. Fabrício Humberto Oliveira, cuja dedicação, responsabilidade e generosidade em disponibilizar seu tempo foram fundamentais para a reformulação deste TCC. Sua competência, atenção aos detalhes e apoio contínuo elevaram a qualidade do trabalho, criando uma contribuição significativa e memorável que gera respeito e admiração.

Aos amigos e colegas que não só tornaram a vida universitária mais divertida, mas também estiveram ao meu lado nos momentos mais desafiadores, compartilhando estudos, ensinamentos e conselhos.

Aos meus professores do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Bambuí, agradeço o incentivo, os ensinamentos e a inspiração que guiaram minha formação acadêmica.

Em especial, à minha professora orientadora, Sônia de Oliveira Duque Paciulli, cujo compromisso, dedicação e paciência traduzem um ensino excepcional, marcado pela clareza, profundidade e rigor intelectual. Sua orientação inspiradora e precisa foi essencial para a realização deste TCC, instigando-me a buscar excelência, disciplina e crescimento contínuo em cada etapa.

Agradeço, também, à coorientadora, Lairy Silva Coutinho, pelo apoio constante, clareza e orientação valiosa, que enriqueceram profundamente o desenvolvimento deste trabalho.

Muito obrigada!

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Instalação da empresa Bambuí Bioenergia S/A.....	20
Figura 2 - Fluxograma do processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar .....	21
Figura 3 - Dornas de fermentação. ....	31
Figura 4 - Evolução da concentração de leveduras e bactérias durante a fermentação (abril a novembro de 2024) .....	37
Figura 5 - Evolução Mensal de pH e Teor Alcoólico. ....	38
Figura 6 - Distribuição de acidez total por mês .....	37
Figura 7 - Distribuição de °Brix residual por mês .....	40
Figura 8 - Comparação mensal dos rendimentos das linhagens.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores que influenciam a qualidade da cana-de-açúcar .....	16
Tabela 2 - Parâmetros físico-químicos da cana-de-açúcar .....	16
Tabela 3 – Valores recomendados dos parâmetros mais importantes em relação à qualidade da cana-de-açúcar .....	17
Tabela 4 - Diferentes tipos de álcool.....	18
Tabela 5 - Metodologias e normas técnicas utilizadas para as análises físico-químicas .....	34
Tabela 6 –Mensais médios dos meses de abril a novembro de 2024 dos principais parâmetros do processo fermentativo .....	35
Tabela 7A - Especificações físico-químicas do etanol hidratado combustível .....	50

## RESUMO

CARVALHO, Rhayane Moreira. **Caracterização do processo de fermentação da cana-de-açúcar destinada à produção de etanol em indústria sucroalcooleira.** Bambuí: IFMG campus Bambuí, 2025.

O presente trabalho caracterizou o processo de fermentação alcoólica do caldo de cana-de-açúcar na Usina Bioenergia de Bambuí (MG) ao longo da safra de abril a novembro de 2024. Foram realizados acompanhamentos mensais das etapas de fermentação em dornas, centrifugação e destilação, coletando-se amostras para análise de pH, °Brix residual, teor alcoólico, acidez total, temperatura, concentração de levedura e contagem bacteriana. Adicionalmente, comparou-se o rendimento alcoólico de duas linhagens industriais de *Saccharomyces cerevisiae*. O fermento B apresentou rendimento médio de 73,5 L de etanol por tonelada de cana, superior ao da linhagem A ( $\approx 71$  L/t). Os parâmetros físico-químicos mantiveram-se dentro dos padrões industriais, com pH final em torno de 4,2–4,6 e teor alcoólico do etanol final de 93–94 % v/v, conforme normas da ANP/INMETRO. A hipótese de que variações operacionais e de linhagem influenciam o rendimento foi confirmada, indicando que o controle de pH e a escolha de levedura são cruciais para otimizar a eficiência fermentativa.

**Palavras-chave:** fermentação alcoólica. *Saccharomyces cerevisiae*. Rendimento alcoólico. Cana-de-açúcar. Etanol hidratado.

## ABSTRACT

CARVALHO, Rhayane Moreira. **Characterization of the sugar cane fermentation process for ethanol production in the sugar and alcohol industry.** Bambuí: IFMG *Campus* Bambuí, 2025.

This study characterized the industrial alcoholic fermentation of sugarcane juice at the Bioenergia de Bambuí mill (MG, Brazil) from April to November 2024. Monthly sampling of fermentation tanks, centrifugation, and distillation stages was carried out to measure pH, residual °Brix, alcohol content, total acidity, temperature, yeast viability, and bacterial counts. Two industrial *Saccharomyces cerevisiae* strains were compared, with strain B yielding an average of 73.5 L ethanol/t cane versus 71 L/t for strain A. All physicochemical parameters met regulatory standards, with final pH between 4.2–4.6 and final ethanol at 93–94 % v/v. The hypothesis that operational conditions and yeast strain selection significantly affect yield was confirmed, underscoring the importance of pH control and strain choice for maximizing fermentation efficiency.

**Keywords:** alcoholic fermentation. *Saccharomyces cerevisiae*. Alcoholic yield. Sugar cane. Hydrated ethanol.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	12
2.	OBJETIVOS.....	14
2.1.	Objetivo Geral .....	14
2.2.	Objetivos Específicos.....	14
3.	REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
3.1.	Cana-de-açúcar .....	15
3.2.	A produção de etanol no país.....	17
3.2.1.	<i>Usina Bambuí Bioenergia e sua produção</i> .....	19
3.3.	Descrição do Processo produtivo do etanol.....	21
3.3.1.	<i>Processo de Fermentação</i> .....	24
3.3.2.	<i>Microrganismos importantes destinados a produção de Etanol</i> .....	27
3.4.	Fatores que interferem no processo fermentativo .....	27
3.4.1.	<i>Concentração de Etanol</i> .....	28
3.4.2.	<i>pH</i> .....	28
3.4.3.	<i>Temperatura</i> .....	28
3.4.4.	<i>Substrato</i> .....	28
3.4.5.	<i>Outros</i> .....	29
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	31
4.1.	Caracterização do Local do Estudo .....	31
4.1.1.	<i>Preparo da matéria-prima e mosto</i> .....	31
4.1.2.	<i>Fermentação em Dornas e Cubas de Levedura</i> .....	32
4.1.3.	<i>Etapas Pós-Fermentativas: Centrifugação, Destilação e Estocagem</i> .....	33
4.2.	Metodologia de Análise Físico-Química.....	34
5.	RESULTADOS.....	35
5.1.	Resultados mensais médios .....	35
5.2.	Fermentação nas Dornas.....	39
5.3.	Rendimento alcoólico por linhagem de fermento .....	40
5.4.	Centrifugação do vinho.....	41
5.5.	Destilação alcoólica.....	43
5.6.	Estocagem do produto final.....	44
6.	CONCLUSÃO .....	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47
	ANEXO A.....	56

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar é uma das atividades industriais mais relevantes para o setor sucroenergético brasileiro, posicionando o país como líder mundial de produção. O etanol não apenas contribui significativamente para a matriz energética nacional, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa, como também desempenha papel estratégico no desenvolvimento regional, na geração de empregos e na sustentabilidade econômica de diversas regiões produtoras (FAO, 2012; USDA, 2020; CONAB, 2021).

O processo industrial de obtenção do etanol envolve diversas etapas integradas, desde o preparo da matéria-prima até a destilação final. Entre essas etapas, a fermentação alcoólica se destaca por sua complexidade e por ser determinante no desempenho do sistema. Trata-se de um processo biotecnológico no qual microrganismos, especialmente leveduras do gênero *Saccharomyces cerevisiae*, transformam os açúcares presentes no caldo da cana-de-açúcar em etanol e dióxido de carbono. A eficiência dessa conversão está diretamente relacionada a uma série de variáveis físico-químicas e microbiológicas, como o pH do meio, a concentração de açúcares (°Brix), a temperatura de operação, a acidez, a carga bacteriana e a viabilidade das células de fermento utilizadas (SILVA; LIMA, 2020; TEIXEIRA; SAMORA, 2021)

Durante a safra, de duração média entre abril e novembro, esses pontos apresentam variações significativas, influenciados por fatores sazonais, como a qualidade do caldo extraído da cana, as condições ambientais e o desgaste gradual do fermento reutilizado. A instabilidade dessas condições pode comprometer o rendimento alcoólico, provocar acúmulo de açúcares residuais, favorecer o crescimento de bactérias e causar perdas de produtividade. Embora muitos desses parâmetros sejam monitorados pelas usinas, sua análise de forma integrada, associando condições físico-químicas, desempenho microbiológico e rendimento, torna-se essencial em estudos sistemáticos de longa duração.

Nesse contexto, torna-se necessário compreender como as diferentes etapas do processo de fermentação se comportam ao longo de toda a safra, identificando os fatores que mais influenciam na eficiência da conversão do substrato em etanol. A partir dessa necessidade, o presente trabalho propôs-se a acompanhar mensalmente as etapas do processo fermentativo em uma indústria sucroalcooleira, por meio da coleta e análise de dados físico-químicos de rotina, como pH, acidez, °Brix residual, temperatura, além da concentração de leveduras e

bactérias. A partir desses dados, buscou-se compreender como o desempenho das diferentes linhagens de fermento utilizadas contribui para o rendimento alcoólico observado em cada mês, possibilitando uma caracterização detalhada do comportamento do sistema fermentativo industrial ao longo do tempo.

A realização deste trabalho justifica-se por sua relevância prática e científica, pois a análise integrada dos dados ao longo da safra permite identificar padrões de comportamento que relacionem condições específicas, como pH levemente ácido, baixa acidez volátil, concentração adequada de fermento e controle da contaminação, a maiores rendimentos e menor perda de substrato, contribuindo para otimizar o processo, reduzir desperdícios e apoiar a tomada de decisão quanto à escolha do fermento mais adequado à realidade operacional da usina.

## **1 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Caracterizar as diferentes etapas do processo de fermentação da cana-de-açúcar destinada à produção do etanol em indústria sucroalcooleira, com enfoque na Usina Bambuí Bioenergia S/A, em Minas Gerais.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar análises dos parâmetros físico-químicos das diferentes etapas do processo de produção do etanol;
- Avaliar o rendimento alcoólico de acordo com as linhagens de leveduras utilizadas no decorrer da safra.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, pertencente ao gênero *Saccharum*, foi descrita por Linnaeus em 1753 como *Saccharum officinarum* (NASCIMENTO *et al.*, 2024). Pertencente à família Poaceae, a cana-de-açúcar é uma planta monocotiledônea, alógama e perene, originária das regiões tropicais do sul da Ásia e Nova Guiné (SANTOS; BORÉM, 2016). Trata-se de uma planta de caule fino e cilíndrico que pode atingir até seis metros de altura, bastante adaptada ao clima tropical. De grande relevância econômica, é cultivada principalmente para a produção de açúcar e etanol, este último utilizado como combustível veicular (REAL, 2021).

Introduzida no Brasil no século XVI, a cana-de-açúcar rapidamente se consolidou como uma das principais culturas agrícolas do país, graças à sua alta adaptabilidade ao clima e solo tropicais (FAO, 2012; CONAB, 2021). Atualmente, o Brasil lidera a produção mundial, respondendo por cerca de 18% do açúcar global e 36% das exportações, seguido por Índia e China (USDA, 2020). Na safra 2023/2024, o país alcançou um recorde de 713,2 milhões de toneladas de cana (CONAB, 2024a). Para 2024/2025, a estimativa é de 676,96 milhões de toneladas, queda de 5,1% devido a estiagens e altas temperaturas, principalmente no Centro-Sul (CONAB, 2024b). Apesar disso, a produtividade média segue elevada, com 72.021 kg/ha em uma área de 9,4 milhões de hectares.

A cana possui grande potencial para acúmulo de sacarose, influenciado por manejo, adubação, clima e estágio de maturação (SANTOS *et al.*, 2010; MACHADO, 2012). O colmo maduro contém, em média, 70% de água, 15% de fibras, 13% de sacarose e 2% de outras substâncias (FAO, 2012), sendo a principal fonte do caldo para a produção de açúcar e etanol. Este caldo possui sólidos solúveis, como açúcares, minerais e compostos nitrogenados; as fibras são compostas por celulose, hemicelulose e lignina, segundo Mahmud *et al.* (2021), com valores típicos de 40-50% de celulose, 25-35% de hemicelulose, e o restante, lignina, ceras etc.

A produção de açúcar envolve as etapas de moagem, extração, clarificação, evaporação, cristalização e secagem; o etanol segue processos semelhantes, com preparo do mosto, fermentação e destilação (ALBARELLI, 2013). A colheita, influenciada por fatores como sistema de corte, relevo, clima e legislação, impacta diretamente a qualidade do produto final (GROFF, 2010; CONAB, 2024a).

A qualidade da cana e, conseqüentemente, do caldo, depende de fatores intrínsecos e extrínsecos, conforme Farinelli e Melo (2021), sintetizados na Tabela 1. E a avaliação físico-química da cana utiliza diversos parâmetros, reunidos na Tabela 2.

Tabela 1 - Fatores que influenciam a qualidade da cana-de-açúcar

Tipo de Fator	Descrição
Intrínsecos	Compostos presentes na planta: sacarose, açúcares redutores, fibras, compostos fenólicos, amido, ácido aconítico, minerais. Oscilam conforme a variedade, clima, solo, chuva e manejo.
Extrínsecos	Materiais estranhos: terra, pedras, restos culturais, ervas daninhas, compostos de microrganismos.

Fonte: FARINELLI e MELO (2021).

Tabela 2 - Parâmetros físico-químicos da cana-de-açúcar

Parâmetro	Descrição
POL	Teor de sacarose aparente; quanto maior, melhor.
Brix	Percentual de sólidos solúveis (sacarose, frutose, aminoácidos, gorduras, ceras, minerais).
Pureza	Razão entre POL e Brix; expressa a proporção de sacarose nos sólidos dissolvidos. Quanto maior, melhor.
Acidez Total	Quantidade de ácidos no caldo; influencia a fermentação e a qualidade do produto.
Açúcar Total Recuperável (ATR)	Soma de sacarose, glicose e frutose. Fórmula: $(Pol \times 9,36814 + AR \times 8,9)$ ; deve ser $> 119,0063 \text{ kg/T}$ .
Açúcares Redutores (AR)	Teores de glicose e frutose que afetam a pureza e recuperação da sacarose.
pH	Influencia a atividade enzimática e fermentação; valores inadequados afetam a qualidade.

Fonte: DA SILVA (2012).

O teor de fibra da cana-de-açúcar deve se situar entre 12% e 13%, sendo tecnologicamente relevante. Teores baixos facilitam a moagem e aumentam a extração de sacarose, mas reduzem a geração de bagaço, exigindo fontes energéticas complementares. Já teores elevados geram excedente de energia, porém dificultam a moagem e reduzem a eficiência de extração (LOPES, 2011). Assim, classifica-se a cana em:

- Precoce: teor máximo de sacarose no início da safra;
- Média: teor máximo no meio da safra;
- Tardia: teor máximo no final da safra.

Historicamente, a safra na região Centro-Sul do Brasil ocorria de maio a outubro. Atualmente, com o uso de variedades superprecoces, a colheita inicia em março ou abril e, em alguns casos, estende-se até dezembro, de acordo com Lopes (2011). Logo, diversos parâmetros são importantes (Tabela 3), principalmente, a pureza da cana, expressa pela fórmula:

$$\text{Pureza (\%)} = (\text{Polarização} / \text{Brix}) \times 100$$

A avaliação segue os critérios propostos por Lopes (2011):

- Pureza muito baixa: < 80%;
- Pureza baixa: 80% a 84%;
- Pureza média: 85% a 90%;
- Pureza alta: > 90%.

Tabela 3 - Valores Recomendados dos Parâmetros mais importantes em relação à qualidade da cana-de-açúcar

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores Recomendados</b>
POL	> 14
Pureza (POL/Brix)	>85%
ATR (Sacarose, Glicose, Frutose)	119,0063 kg/T
AR	< 0,80%
Brix	> 18% e < 25%
pH	> 5,20 e < 5,80
Acidez	< 0,80
Broca de Cana	< 1,0%
Fibras	11-13%

Fonte: DA SILVA (2024).

A correta análise desses indicadores é fundamental para o direcionamento adequado da matéria-prima, garantindo máxima eficiência industrial e qualidade nos produtos derivados.

### 3.2 A produção de etanol no país

No contexto da matriz energética brasileira, os derivados da cana-de-açúcar desempenham papel central na oferta de energia renovável. O destaque deve-se, sobretudo, ao aproveitamento de resíduos da agroindústria, como o bagaço da cana, que responde por quase 80% da produção nacional de energia proveniente de biomassa, colocando o Brasil como líder mundial nesse segmento (SILVA; LIMA, 2020).

A introdução da cana-de-açúcar no Brasil ocorreu por volta de 1520, logo após o

descobrimto. Com rápida adaptação ao clima tropical, o país se consolidou, ainda no período colonial, como um dos maiores produtores e exportadores mundiais de açúcar (SILVA; LIMA, 2020). Entretanto, o uso da cana para produção de etanol só ganhou destaque séculos depois. Durante a crise do petróleo da década de 1970, foi instituído o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em 1975, com o objetivo de reduzir a dependência do petróleo e dar destino alternativo à produção excedente de açúcar (LEITE; CORTEZ, 2016). O lançamento do carro a etanol, o Fiat 147, em 1979, impulsionou o uso do combustível no país (FRANCISCO, 2021).

Entre 1975 e 2000, cerca de 5,6 milhões de veículos movidos a etanol foram produzidos, e o álcool anidro passou a ser adicionado à gasolina em proporções variáveis, resultando na economia de bilhões de dólares em importações de petróleo e na redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub>. Esse processo culminou na expansão significativa do setor sucroalcooleiro, com destaque para a exportação de açúcar e o consumo interno de etanol (BIODIESELBR, 2012).

Atualmente, o Brasil é líder mundial na produção de cana-de-açúcar e figura entre os maiores produtores de etanol, com tecnologia consolidada e cadeias produtivas integradas (TEIXEIRA; SAMORA, 2021). Os diferentes tipos de etanol (Tabela 4) possuem características específicas, que definem seus usos industriais e energéticos (LOPES, 2011). Segundo a CONAB (2024a), a safra 2023/2024 registrou uma produção recorde de 29,69 bilhões de litros de etanol provenientes da cana-de-açúcar, sendo 17,64 bilhões de litros de etanol hidratado e 12,05 bilhões de etanol anidro, representando aumentos de 16% e 6,5% em relação à safra anterior, respectivamente.

Tabela 4 - Diferentes tipos de álcool

<b>Tipo de Álcool</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicações Principais</b>
<b>Álcool Hidratado</b>	Teor de umidade residual entre 4% e 6%	Utilizado como combustível em veículos a álcool ou flex. Também empregado na limpeza e como matéria-prima industrial.
<b>Álcool Anidro</b>	Teor alcoólico inferior a 1%	Misturado à gasolina em proporções próximas a 25%.
<b>Alcoóis Finos</b>	Presença reduzida de componentes secundários, que poderiam causar odores ou sabores indesejáveis.	Destinado às indústrias de bebidas, farmacêutica e de perfumes.

Esse desempenho foi favorecido por condições climáticas específicas. A estação chuvosa garantiu bom desenvolvimento vegetativo, enquanto a redução das chuvas a partir de abril permitiu a maturação adequada da cultura. A intensificação do fenômeno El Niño, com temperaturas elevadas e clima seco, também contribuiu positivamente, sem ocorrência de queimadas (CONAB, 2024a).

Além de seu papel econômico, a cana-de-açúcar se destaca pelo aproveitamento integral da biomassa, empregada na produção de etanol, açúcar, energia elétrica, fertilizantes e rações, contribuindo, ainda para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Em comparação com combustíveis fósseis, o etanol queima de forma mais limpa, reduzindo em até 80% as emissões de CO<sub>2</sub> em relação aos combustíveis fósseis (CARVALHO *et al.*, 2025). O setor também se configura como relevante gerador de empregos e renda (RAÍZEN, 2021).

Entretanto, por ser uma matéria-prima perecível e não armazenável *in natura*, a cana-de-açúcar exige que a lavoura esteja próxima da indústria processadora, o que evidencia a interdependência entre as etapas agrícola, industrial e logística do setor (DIAS, 2021).

### **3.2.1 Usina Bambuí Bioenergia e sua produção**

Nesse cenário promissor, destaca-se a atuação da Usina Bambuí Bioenergia S/A, instalada no município de Bambuí, Minas Gerais. Fundada em 3 de maio de 2006, sob o nome Total Agroindústria Canaveira S/A, teve sua razão social alterada em 27 de fevereiro de 2013, passando a se chamar Bambuí Bioenergia S/A (PEÇANHA *et al.*, 2019; BAMBUÍ BIOENERGIA, 2023a). Sua sede está localizada na Fazenda Ajudas, às margens da Rodovia MG-827 (Figura 1), com operações que abrangem diversos municípios da região Centro-Oeste mineira.

A empresa é uma sociedade anônima de capital fechado, voltada à produção de etanol e geração de energia elétrica. A totalidade do etanol hidratado é destinada à comercialização com distribuidoras, enquanto a energia excedente gerada é vendida para a CEMIG ou no mercado livre, via sistema SPOT (BAMBUÍ BIOENERGIA, 2023a).

A Bambuí Bioenergia cultiva sua própria cana-de-açúcar com enfoque em práticas sustentáveis e técnicas agrícolas de alta eficiência. A colheita é mecanizada em 99,9% das áreas

e não há utilização de mão de obra infantil (BAMBUÍ BIOENERGIA, 2023b). A unidade industrial, considerada uma das mais modernas do país, teve sua primeira safra entre os anos de 2010 e 2011 e conta com elevado grau de automação.

Figura 1 - Instalação da empresa Bambuí Bioenergia S/A



Fonte: GOOGLE. *Google Maps* (2024).

O parque fabril tem capacidade de moagem de 520 toneladas de cana por hora, processada com energia elétrica autogerada por meio da queima do próprio bagaço. As caldeiras geram 300 toneladas de vapor por hora, convertido em energia elétrica para uso interno e comercialização. A usina também dispõe de infraestrutura para produzir até 1.100.000 litros de etanol hidratado por dia, utilizando processos modernos de fermentação e destilação, com reaproveitamento dos subprodutos na cadeia produtiva (BAMBUÍ BIOENERGIA, 2023c).

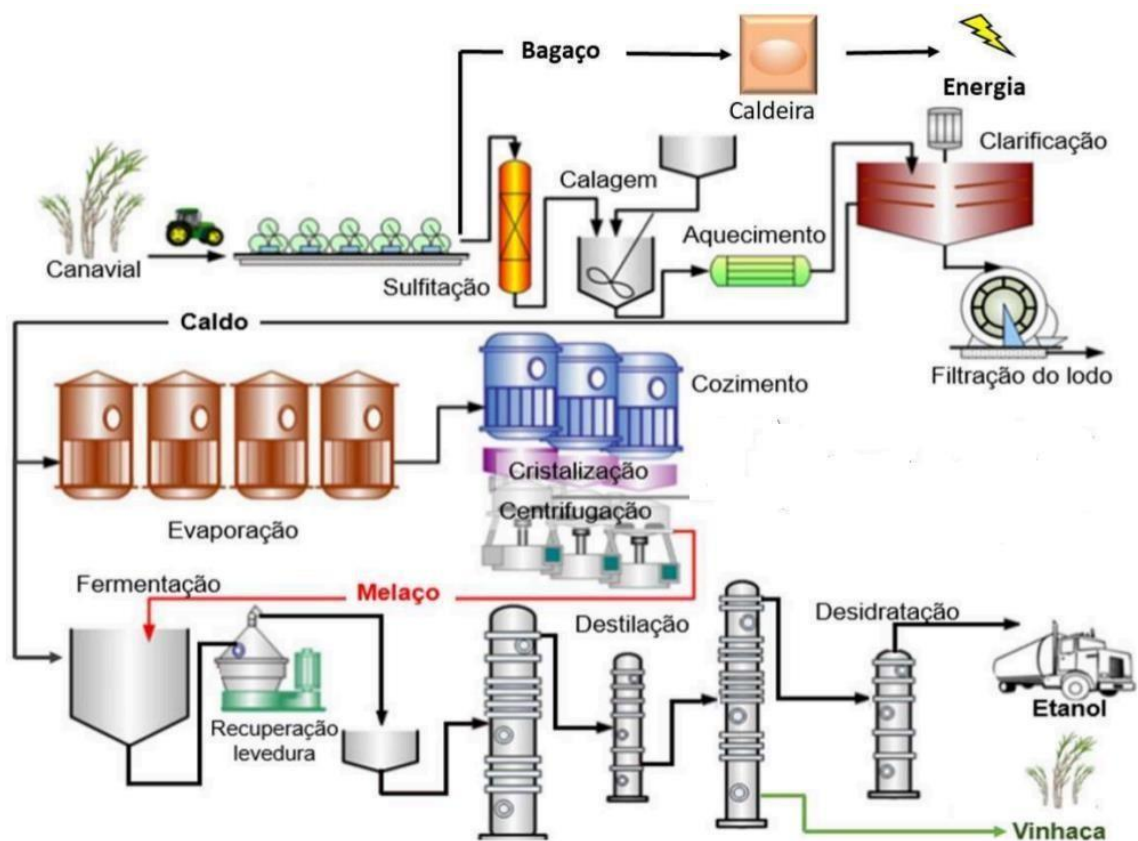
Além do etanol hidratado, a empresa investe na cogeração de energia por meio de sua central térmica (BAMBUÍ BIOENERGIA, 2023d). A missão da companhia é fornecer produtos sustentáveis e de alta qualidade, alinhados aos princípios ESG. Para isso, dispõe de laboratório moderno que avalia todas as bateladas de etanol antes da estocagem. A gestão da empresa é pautada na segurança do trabalho, saúde ocupacional e sustentabilidade (BAMBUÍ BIOENERGIA, 2023c).

Como perspectiva futura, a Bambuí Bioenergia pretende alcançar a meta da “cana de três dígitos” (mais de 100 toneladas por hectare), expandir a produção para etanol anidro carburante (EAC) e açúcar, e consolidar-se como referência nacional em práticas ambientais, sociais e de governança (BAMBUÍ BIOENERGIA, 2023b).

### 3.3 Descrição do processo produtivo do etanol

Na fabricação do etanol, a cana-de-açúcar passa por várias etapas (Figura 2), desde a colheita até a produção industrial. Após atingir o ponto ideal de maturação, é colhida por colhedoras mecanizadas, tecnologia que elimina a necessidade da queima da palha, contribuindo para a redução da emissão de poluentes na etapa inicial do processo produtivo. Na usina Bambuí Bioenergia S/A, 99,9% da colheita é realizado de forma mecanizada, com mínima participação de operações manuais (PEÇANHA *et al.*, 2019; BAMBUÍ BIOENERGIA, 2023b).

Figura 2 - Fluxograma do processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar



Fonte: Niz (2019).

Concluída a colheita, a cana é transportada até a unidade industrial, onde é pesada em balança para determinação da produtividade. Essa etapa é essencial para o planejamento agrícola, permitindo a avaliação de tratos culturais, a previsão da produção e a programação da moagem durante a entressafra (BAMBUÍ BIOENERGIA, 2023b).

Uma parcela dos caminhões é submetida à amostragem por sonda oblíqua, que retira frações representativas do carregamento. As amostras são analisadas no Laboratório de Pagamento de Cana por Teor de Sacarose (PCTS), com o objetivo de quantificar o teor de açúcar

da matéria-prima, garantindo remuneração justa aos fornecedores (SOUZA *et al.*, 2018; PEÇANHA *et al.*, 2019).

A amostra é dividida em duas partes: uma para análise de impurezas vegetais e minerais, e outra para desintegração e homogeneização. Nesta última, a massa resultante, após desfibramento mecânico, é reduzida continuamente até formar subamostras representativas, das quais, parte é pesada para extração do caldo e separação da fibra. Estudos indicam que a preparação de subamostras defibradas melhora a representatividade e a precisão dos parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar (CORRÊDO *et al.*, 2021).

O caldo extraído é utilizado nas análises laboratoriais de rotina. O bolo úmido é pesado para determinação do teor de fibra, enquanto o pH é medido em pHmetro, e o °Brix, em refratômetro, indicando o percentual de sólidos solúveis totais. A partir dos valores de PBU (Peso do Bolo Úmido), PBS (Peso do Bolo Seco), °Brix e pH, calcula-se o teor de fibra da cana, conforme metodologia padronizada pelo sistema CONSECANA (2024).

Para clarificação, 200 mL de caldo são tratados com o agente clarificante OCTAPOL®, homogeneizados e filtrados, seguindo as Boas Práticas de Laboratório (RUDOLPH RESEARCH ANALYTICAL, 2020). O caldo clarificado é analisado em sacarímetro, permitindo a quantificação da sacarose aparente (%POL). Essa leitura é essencial para a estimativa do Açúcar Total Recuperável (ATR), parâmetro central na remuneração da cana (FERNANDES, 2011; AFOCAPI, 2010; ALCOFORADO, 2019).

A análise de impurezas também é realizada, separando-se as impurezas vegetais manualmente, em amostras de aproximadamente 10 kg, enquanto as impurezas minerais são quantificadas após incineração de cerca de 30 g de material em forno mufla, seguida de secagem e dessecação (MACIEL *et al.*, 2008; FIGUERUT; PAES, 2014; UDOP, 2014).

Na indústria, as principais etapas envolvem recepção, preparo, moagem, tratamento do caldo, produção de açúcar, destilação, utilidades, disposição de efluentes e estocagem (BAMBUÍ BIOENERGIA, 2023a). Atualmente, a cana-de-açúcar não é submetida a lavagem, exceto em casos específicos de elevada contaminação por impurezas minerais. O preparo inicia-se com a picotagem por facas rotativas, visto que o uso de picadores foi descontinuado na Bambuí Bioenergia, seguida da desfibrção do material. Na sequência, um eletroímã é empregado para a remoção de possíveis resíduos (GUEDES *et al.*, 2018; NOVACANA, 2023).

A extração do caldo ocorre em moendas compostas por ternos de rolos que

comprimem a cana, gerando caldo e bagaço. A embebição com água ou caldo diluído é aplicada para maximizar a extração de sacarose. O bagaço, com umidade residual de cerca de 50%, é utilizado como combustível nas caldeiras para geração de vapor, que aciona as moendas (GUEDES *et al.*, 2018; ALCARDE, 2022a). O vapor gerado alimenta turbogeradores que produzem até 55 MW de energia elétrica, tornando a planta autossuficiente (BAMBUÍ BIOENERGIA, 2023d). Durante a moagem, análises físico-químicas são realizadas em diferentes pontos do processo, com verificação de pH, °Brix, POL e umidade do bagaço (LOPES, 2011; ALCARDE, 2022b). O caldo misto é tratado por peneiramento, calagem com leite de cal e aquecimento (103-105 °C), seguido de decantação. O lodo resultante é filtrado e convertido em torta, reaproveitada como fertilizante. O caldo clarificado é evaporado e, posteriormente, resfriado para ser enviado para fermentação (ALCARDE, 2022b).

A fermentação é conduzida em dornas, onde o caldo é inoculado com leveduras do gênero *Saccharomyces cerevisiae*, que convertem os açúcares em etanol e gás carbônico (CO<sub>2</sub>). O processo ocorre em regime de batelada alimentada ou contínua, com duração média de 6 a 12 horas (ALCARDE, 2022b). Ao final, forma-se o vinho, uma mistura de etanol, células de levedura e subprodutos. O vinho é centrifugado para recuperação das leveduras, que são tratadas com ácido sulfúrico e reutilizadas (PEÇANHA *et al.*, 2019).

O vinho centrifugado segue para a destilação fracionada, na qual o etanol é separado da água em colunas aquecidas por vapor. O vapor alcoólico é, então, condensado, resultando em etanol hidratado com teor alcoólico em torno de 96°GL, conforme regulamentação da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (SOUZA *et al.*, 2018; ALCARDE, 2022b).

Por fim, os resíduos da destilação, como a vinhaça, são aproveitados na fertirrigação dos canaviais, por serem ricos em potássio e matéria orgânica, contribuindo para a sustentabilidade do sistema produtivo (SOUZA *et al.*, 2018).

Assim, o processo industrial de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar integra diversas etapas, da colheita e análise laboratorial à fermentação e destilação, com o objetivo de maximizar o aproveitamento da biomassa vegetal e garantir a sustentabilidade do processo produtivo. A eficiência energética é ampliada com a cogeração de eletricidade a partir do bagaço, e a sustentabilidade ambiental é reforçada com o reaproveitamento dos resíduos industriais como insumos agrícolas.

### 3.3.1 Processo de Fermentação

A fermentação alcoólica é um processo anaeróbico conduzido principalmente por leveduras que convertem açúcares em etanol ( $C_2H_6O$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Esse processo ocorre no citoplasma celular e tem como finalidade principal a produção de energia (ATP) para as funções fisiológicas, crescimento e reprodução dos microorganismos. O etanol produzido atua como subproduto de excreção, com função inibitória sobre microorganismos concorrentes (GÓES-FAVONI *et al.*, 2018; ARAVÉCHIA, 2013).

Segundo Lima *et al.* (2001), a fermentação divide-se em três fases: preliminar, tumultuosa e complementar. Na fase preliminar, o substrato é adicionado às células, promovendo intensa multiplicação celular e consumo de açúcar para a reprodução. É marcada por leve aumento de temperatura e baixo desprendimento de  $CO_2$ . A duração varia de acordo com o sistema de fermentação, podendo ser reduzida com alta concentração celular ou por adição de células em meio mais nutritivo.

Na sequência, ocorre a fase tumultuosa, caracterizada pelo vigoroso desprendimento de  $CO_2$ , que agita o mosto como se estivesse em ebulição, formando espuma. Essa fase também apresenta aumento de temperatura, controlado por trocadores de calor. Sua duração pode ser identificada pela queda na liberação de  $CO_2$  (VENTURINI FILHO, 2010).

Por fim, a fase complementar apresenta redução acentuada na liberação de gás carbônico, queda na temperatura e esgotamento dos açúcares do meio, com duração aproximada de oito horas durante a safra (PASCHOALINI *et al.*, 2009; BRAZ, 2016).

Conforme Góes-Favoni (2018), os processos fermentativos classificam-se quanto à forma de adição do substrato e retirada do produto: processo em batelada (descontínuo), batelada alimentada e processo contínuo. O método mais comum nas destilarias brasileiras é o processo em batelada alimentada com reciclo de células, conhecido como método Melle-Boinot. Nesse sistema, o mosto é adicionado gradualmente ao fermento, o que reduz o risco de inativação das leveduras por repressão catabólica (PACHECO, 2010).

O processo Melle-Boinot reutiliza cerca de 90% das leveduras de uma fermentação anterior. As células são separadas do vinho por centrifugação, gerando duas frações: o leite de levedura e o vinho delevedurado. Em seguida, as leveduras são submetidas a um tratamento ácido com ácido sulfúrico comercial, até atingir pH entre 2,5 e 3,0, durante aproximadamente três horas, com o objetivo de controlar a contaminação bacteriana (GÓES-FAVONI *et al.*, 2018). Após o tratamento, adiciona-se água, para reduzir o teor alcoólico, e nutrientes como sulfato de

amônio, magnésio, potássio, zinco e fósforo para suprir as exigências metabólicas das células. A homogeneização é feita com agitação em dornas menores, chamadas dornas de tratamento. O inóculo tratado é, então, reaproveitado na fermentação seguinte (VENTURINI FILHO, 2010).

A multiplicação das leveduras ocorre principalmente no início da safra, até se atingir a concentração ideal para condução do processo. Essa etapa aeróbia é realizada em caldo de cana com sólidos solúveis entre 6 e 10 °Brix, sob agitação e fornecimento de ar comprimido (GÓES- FAVONI *et al.*, 2018). Durante toda a safra, o monitoramento da viabilidade celular é essencial, sendo necessária a multiplicação de células quando ocorrem perdas por envelhecimento ou outras causas (CHIEPPE JÚNIOR, 2012).

Pacheco (2010) relata que a concentração inicial do inóculo varia de  $10^6$  a  $10^7$  células/mL de mosto, podendo ultrapassar  $10^8$  células/mL ao final da fermentação. Essa concentração inicial é um parâmetro crítico para a produtividade do processo.

Diversas vantagens fazem com que o método Melle-Boinot seja amplamente adotado nas usinas brasileiras: maior rendimento em etanol, fermentações mais rápidas, menor volume de dornas (reduzindo o custo de instalação), alta pureza e menor risco de contaminações, comuns nos processos contínuos ou semicontínuos (VENTURINI FILHO, 2010).

De acordo com Aravéchia (2013), a fermentação alcoólica é impulsionada pela necessidade de energia das leveduras, que consomem matéria orgânica com ou sem presença de oxigênio. O processo pode ser descrito em três etapas: pré-fermentação, fermentação principal e pós-fermentação. A pré-fermentação inicia com a adição das leveduras ao mosto, e, após cinco a seis horas, a fermentação principal se caracteriza pela elevação da temperatura, redução da densidade do mosto e aumento da acidez, resultando na formação de espuma. A fermentação termina quando há redução da espuma, e a pós-fermentação ocorre com a diminuição gradual da temperatura e do desprendimento de  $\text{CO}_2$ , sem formação de espuma, com duração entre seis e oito horas (PEREIRA *et al.*, 2020).

Segundo Aravéchia (2013), as principais características para selecionar uma boa levedura são: dominância, alto rendimento alcoólico, baixa floculação, pouca formação de espuma, baixo açúcar residual e tolerância ao estresse fermentativo.

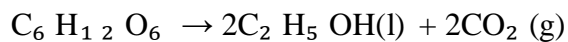
Durante o processo de fermentação, além de etanol e  $\text{CO}_2$ , são produzidos outros metabólitos, como biomassa, a partir do crescimento celular. Com base em estudos, é possível estimar a proporção de produtos formados por cada 100 g de glicose metabolizada (PEREIRA *et al.*, 2020).

A condução eficiente da fermentação, com maior velocidade, aumenta a conversão

de açúcares em etanol, otimizando o processo em menor tempo e reduzindo os riscos de infecção por contaminantes (ARAVÉCHIA, 2013).

### 3.3.2 *Microrganismos importantes destinados à produção de etanol*

A produção de etanol por via fermentativa baseia-se na ação de microorganismos, principalmente leveduras do gênero *Saccharomyces*, sendo a espécie *Saccharomyces cerevisiae* a mais utilizada pelas usinas sucroalcooleiras no Brasil (VENTURINI FILHO, 2010). Segundo Braz (2016), trata-se de um microorganismo unicelular que se reproduz por brotamento e atua enzimaticamente sobre glicídios, como a glicose ( $C_6 H_{12} O_6$ ), convertendo-os em etanol ( $C_2 H_5 OH$ ) e gás carbônico ( $CO_2$ ), conforme representado na equação:



A levedura é um aeróbio facultativo, capaz de adaptar seu metabolismo de acordo com a disponibilidade de oxigênio. Na ausência deste, o metabolismo anaeróbio predomina, com a conversão do piruvato, oriundo da glicólise, em acetaldeído pela ação da piruvato descarboxilase. O acetaldeído, por sua vez, é convertido em etanol pela enzima álcool desidrogenase (MADIGAN *et al.*, 2010). Em condições aeróbias, após exaustão da glicose, o etanol acumulado é respirado pelas leveduras, sendo oxidado e canalizado ao ciclo do ácido tricarboxílico para produção adicional de ATP; essa transição é a fase diáuxica (MOLINET *et al.*, 2022; RIDDER *et al.*, 2023).

A sacarose da cana-de-açúcar, principal substrato utilizado, precisa ser previamente hidrolisada em glicose e frutose pela enzima sacarase ou invertase (SALVATO, 2010), que se apresenta nas formas periplasmática e intracelular. A invertase periplasmática é uma glicoproteína rica em carboidratos, responsável pela maior parte da hidrólise da sacarose no meio extracelular.

Para a eficiência fermentativa, é essencial selecionar linhagens de levedura que apresentem características como alta velocidade de fermentação, tolerância ao etanol acima de 10% (p/v), resistência a contaminantes e estabilidade fisiológica frente a oscilações do processo industrial (DEL RIO, 2004; ARAVÉCHIA, 2013). Essas qualidades favorecem a produtividade e reduzem custos e riscos de contaminação. Entre as linhagens industriais de *S. cerevisiae* utilizadas nas usinas brasileiras, destacam-se *BG-1*, *CR-1*, *AS-1*, *CAT-1*, *PE-2* e *CL*, isoladas de

diferentes unidades produtoras e amplamente adotadas como culturas iniciadoras de fermentação (SOUZA, 2009).

Pereira (2020) e Aravéchia (2013) destacam que a disponibilidade e o equilíbrio de nutrientes no mosto são determinantes para a multiplicação celular e eficiência do processo. A ausência ou o excesso de determinados nutrientes compromete o metabolismo celular e, por consequência, a fermentação.

Do ponto de vista produtivo, Martins (2009) afirma que, considerando a sacarose como equivalente à glicose, 100 kg de açúcar produzem 51,1 kg de etanol e 48,9 kg de CO<sub>2</sub>. Contudo, reações paralelas, como a formação de glicerol e ácidos orgânicos, diminuem a eficiência real, resultando em rendimentos industriais próximos a 90%, com cerca de 46,12 kg de etanol por 100 kg de glicose (CANHA, 2009).

Monteiro (2016) descreve o efeito Crabtree, em que altas concentrações de glicose (> 0,3%) inibem a respiração celular ao reprimirem genes mitocondriais, favorecendo a fermentação mesmo em presença de oxigênio. Esse efeito reduz a eficiência na captação de açúcares e, conseqüentemente, a produtividade.

Por fim, os processos fermentativos podem ser classificados como batelada, contínuo e batelada alimentada (Melle-Boinot). No Brasil, prevalece o processo em batelada, em que a dorna recebe o fermento (10-15% do volume), seguido do mosto, com adição de dispersante ou antiespumante, conforme necessário (CARVALHO; SATO, 2001; FERREIRA, 2005). A usina Bambuí Bioenergia S/A segue esse modelo tradicional, adotando a fermentação em batelada. Segundo Facciotti (2001), este processo é considerado mais seguro quanto à assepsia, pois permite esterilização do reator e renovação do inóculo a cada ciclo, assegurando a predominância do microorganismo desejado.

As leveduras industriais derivam de linhagens selvagens selecionadas por apresentarem tolerância a elevadas temperaturas, altas concentrações de açúcar e etanol, além de manterem alta produtividade, mesmo em condições adversas (ARAVÉCHIA, 2013).

### **3.4 Fatores que interferem no processo fermentativo**

A eficiência do processo fermentativo depende diretamente das condições oferecidas à levedura. Segundo Molinet *et al.* (2022) e Ridder *et al.* (2023), o etanol é apenas um subproduto da fermentação, sendo a produção de ATP o verdadeiro objetivo metabólico da levedura. Assim, cabe ao produtor fornecer as condições ideais para maximizar o desempenho

microbiano.

A temperatura, o pH, a concentração de etanol, o tipo e a qualidade do substrato, além da concentração de inóculo, são fatores críticos (REIS; RIBEIRO, 2009). O controle adequado desses parâmetros garante maior rendimento e produtividade.

#### **3.4.1 Concentração de Etanol**

A levedura *S. cerevisiae* possui tolerância limitada ao etanol, que, em concentrações acima de 10% (p/v), pode prejudicar seu crescimento (DORTA, 2006). A toxicidade aumenta com a temperatura, sendo a faixa ideal de 13 °C a 27 °C. O etanol altera a fluidez da membrana celular, inserindo-se na bicamada fosfolipídica, afetando a captação de glicose e comprometendo a viabilidade celular (BANAT *et al.*, 1998; MONTEIRO, 2016).

#### **3.4.2 pH**

A faixa ideal de pH para crescimento da levedura está entre 4,0 e 5,0. Contudo, industrialmente, a fermentação é conduzida com pH inicial de 2,0–3,0, finalizando entre 3,5–4,0 (LIMA *et al.*, 2001; SOUSA; MONTEIRO, 2011). Valores mais ácidos favorecem o rendimento alcoólico e reduzem contaminações. No entanto, pH abaixo de 2,0 pode causar inibição da levedura e seleção de contaminantes (DORTA, 2006). A perda de nutrientes essenciais também é agravada pela acidez extrema (AMARAL, 2009).

#### **3.4.3 Temperatura**

A levedura apresenta desempenho ideal entre 25 °C e 35 °C, variando conforme o objetivo (biomassa ou etanol) (LIMA *et al.*, 2001; CARDOSO, 2006). Temperaturas acima de 35 °C, comuns nas destilarias, aumentam a fermentação, mas favorecem contaminações e reduzem a viabilidade celular (SILVA-FILHO *et al.*, 2005). Já temperaturas abaixo de 25 °C diminuem a atividade fermentativa (CHIEPPE JÚNIOR, 2012). O controle térmico é feito por trocadores de calor (SOUSA *et al.*, 2011).

#### **3.4.4 Substrato**

A cana-de-açúcar é rica em nutrientes, mas também suscetível à contaminação por

bactérias como *Lactobacillus* e *Bacillus* (NAVES *et al.*, 2010; VIÉGAS, 2011). Contaminações acima de  $10^5$  células/mL comprometem a produção e causam formação de gomas, floculação de leveduras e entupimentos (NOBRE, 2005; CHIEPPE JÚNIOR, 2012). O tratamento ácido com  $H_2SO_4$  é amplamente empregado, embora prejudique a levedura. Antibióticos e biocidas naturais como própolis, jambolão e lúpulo estão sendo estudados como alternativas (GOMES, 2009).

As leveduras usadas como substrato na fermentação da cana-de-açúcar são, em sua grande maioria, *Saccharomyces cerevisiae*, cepas industriais selecionadas por alta produtividade alcoólica e resistência ao estresse, assim como por fatores relacionados à temperatura, alta osmolaridade, pH baixo e presença de contaminantes bacterianos. Ademais, destacam-se por possuírem boa capacidade de implantação em sistemas com reciclo celular, ou seja, fermentação em bateladas com reaproveitamento de biomassa. Programas de seleção de leveduras, no Brasil, consolidaram linhagens industriais que, hoje, são referência na indústria, por exemplo, as *PE-2*, *CAT-1*, *SA-1*, *BG-1*, *FT-858*, *JP-1*, *VR-1*, as quais apresentam desempenho superior em rendimento de etanol, manutenção de viabilidade durante reciclagem e tolerância às condições industriais. Essas cepas, historicamente, surgiram tanto de isolamento de “intrusas” que se adaptaram ao ambiente industrial quanto de programas de seleção/seleção adaptativa conduzidos por centros de pesquisa.

Além disso, estudos genômicos demonstram que as leveduras do grupo bioetanol/cachaça compartilham características genéticas de domesticação, ou seja, de ampliações de genes relacionados a vitaminas, resposta ao estresse, etc., o que explica sua adaptação às fermentações de caldo de cana. Embora *S. cerevisiae* seja dominante, leveduras não convencionais podem estar presentes na microbiota do mosto; elas têm sido estudadas por seu potencial em controle biológico, modulação de metabolismo e características fenotípicas, mas, na prática industrial de etanol de cana, são raramente utilizadas como culturas puras em larga escala, devido à menor tolerância alcoólica e menor robustez comparadas às cepas industriais de *S. cerevisiae* (BASSO, 2008; ALMEIDA *et al.*, 2022; JACOBUS *et al.*, 2021; EMBRAPA, 2025).

### **3.4.5 Outros**

A concentração do inóculo deve ser compatível à carga de açúcares no mosto; desequilíbrios reduzem a velocidade de fermentação, favorecem a formação de subprodutos e comprometem a viabilidade celular. A adequação da dosagem garante rendimento e

estabilidade do sistema fermentativo à escala industrial (LADINO-GARZÓN *et al.*, 2024)0.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização do local do estudo

O presente trabalho foi realizado na Usina Bioenergia de Bambuí, localizada no município de Bambuí, estado de Minas Gerais. Trata-se de uma unidade industrial de médio a grande porte voltada à produção de etanol e bioenergia, com capacidade de processamento de aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra.

Durante o período de safra, de abril a novembro de 2024, foi conduzido o monitoramento de rotina das diferentes etapas do processo de fermentação alcoólica industrial, desde o preparo da matéria-prima até o armazenamento do etanol hidratado. A usina opera com sistemas de fermentação do tipo batelada, com cerca de 9 dornas em operação simultânea (Figura 3), além de 6 centrífugas, 2 colunas (equipamentos) principais de destilação e diversos tanques de estocagem e medição. As coletas ocorreram de forma contínua ao longo do turno de operação da usina, de domingo a domingo, com frequência diária ou alternada, dependendo da etapa do processo analisado.

As análises aqui descritas foram integradas à rotina operacional do laboratório de controle de qualidade da unidade, respeitando os critérios técnicos de boas práticas laboratoriais (BPL) e as normas da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). As análises e observações compreenderam todo o fluxo produtivo, desde o recebimento da matéria-prima (cana-de-açúcar) até a obtenção do etanol hidratado, com foco especial nas etapas de fermentação e destilação.

Figura 3 - Dornas de Fermentação



Fonte: Autora (2024)

#### **4.1.1 Preparo da matéria-prima e mosto**

A matéria-prima utilizada foi exclusivamente cana-de-açúcar fresca, moída logo após o recebimento, para minimizar perdas fermentescíveis. O caldo obtido passou por:

- Peneiramento e decantação;
- Suplementação com nutrientes essenciais, como ureia, fosfato, magnésio e zinco, realizada preferencialmente no início da safra, durante a fase de multiplicação da levedura, ou sempre que a viabilidade celular apresentar queda abaixo de 60%. Ao longo do processo, observam-se variações naturais na viabilidade celular. No meio da safra, a levedura FT858 geralmente mantém uma viabilidade entre 85% e 90%.

Em situações de redução da viabilidade, são adotadas medidas corretivas, incluindo:

- Adição de nutrientes na forma líquida;
- Diluição com água nas cubas;
- Controle da concentração do mosto, mantendo-a em, no máximo, 20°Brix.

Essas ações resultam em melhora da viabilidade aproximadamente 24 horas após sua implementação, contribuindo para a manutenção da performance fermentativa ao longo da safra. Além disso, é feito o ajuste de sólidos solúveis (°Brix), mantendo-se entre 18–20°Brix, para garantir rendimento alcoólico satisfatório.

Amostras do mosto foram coletadas duas vezes por turno, totalizando até 6 coletas diárias. Os parâmetros analisados incluíram pH, acidez e impurezas.

#### **4.1.2 Fermentação em Dornas e Cubas de Levedura**

O processo fermentativo foi conduzido em dornas de aço carbono, cada uma com capacidade média de 800 m<sup>3</sup>, operando em regime de batelada. O inóculo foi preparado em cubas de ativação (pé-de-cuba) com levedura reciclada do processo anterior, do gênero *Saccharomyces cerevisiae*, conhecida por sua alta tolerância ao etanol e rápida capacidade fermentativa.

Parâmetros operacionais das dornas:

- pH inicial médio: 4,3;
- Temperatura média de fermentação: 30°C a 33 °C;
- Tempo de fermentação por batelada: 8 a 12 horas;

- Faixa de álcool produzido no vinho bruto: 6,5 a 10,5 % v/v;
- Rendimento médio por dorna: entre 89% e 91% da eficiência teórica;

As coletas nas dornas e nas cubas foram realizadas conforme a dinâmica da produção, em que, quanto maior o número de centrífugas em operação, maior a frequência das coletas. Cada amostra foi processada para análises de:

- pH;
- Teor alcoólico (vinho bruto e centrifugado);
- °Brix;
- Temperatura;
- Levedura (% v/v por volume decantado).

O teor alcoólico foi obtido por destilação em microdestilador adaptado tipo Kjeldahl. Os valores de água de lavagem de CO<sub>2</sub> e do vinho de levedurado foram multiplicados por 2 após a leitura, conforme padronização da unidade.

As análises de levedura foram feitas utilizando-se tubos de centrífugas graduadas de 15 mL, centrífuga Excelsa Baby Fanen e cálculo por decantação volumétrica.

#### ***4.1.3 Etapas Pós-Fermentativas: Centrifugação, Destilação e Estocagem***

Após a fermentação, o vinho foi enviado à etapa de centrifugação, onde a biomassa de levedura foi separada, lavada e reciclada para novas bateladas durante todo o período de safra.

O vinho centrifugado passou para as colunas de destilação fracionada, compostas por:

- Coluna de degaseificação;
- Coluna de retificação;
- Coluna de esgotamento.

O produto final obtido foi o etanol hidratado a 96°GL, posteriormente armazenado em tanques apropriados com controle de temperatura e pressão.

As amostras analisadas nessa etapa incluíram:

- Vinho centrifugado;
- Vinho volante ou de levedurado;

- Flegmaça;
- Vinhaça;
- Provetas de medição;
- Tanques de estocagem.

Os principais parâmetros monitorados foram:

- Teor alcoólico (% v/v);
- pH;
- Acidez total e alcalinidade;
- Massa específica (g/mL).

A acidez das amostras finais foi determinada por titulação com NaOH 0,02 N e uso do indicador alfa-naftolftaleína, observando-se viragem da cor (azul/incolor) como indicativo da alcalinidade ou acidez.

#### 4.2 Metodologia de Análise Físico-Química

As metodologias e normas técnicas utilizadas estão previstas na Tabela 5, referente aos parâmetros físicos e químicos do processamento da cana-de-açúcar.

Tabela 5 - Metodologias e normas técnicas utilizadas para as análises físico-químicas

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>	<b>Referência</b>
Teor alcoólico	Destilação com densímetro digital PAAR	INMETRO (2018); Embrapa (2000)
pH	pHmetro digital com calibração tampão 4,0 e 7,0	AOAC (2005); IAL (2008)
°Brix	Refratômetro digital (automático)	IAL (2008)
Acidez sulfúrica	Titulação com NaOH 0,1 N até pH 8,5	AOAC (2005)
% Levedura e impurezas	Centrifugação de tubos de 15 mL a 3000 rpm	IAL (2008)

Fonte: Autora (2025)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Resultados Mensais Médios

A Tabela 6 apresenta os resultados mensais médios dos principais parâmetros monitorados do vinho bruto durante a fermentação alcoólica, entre abril e novembro de 2024, na Usina Bambuí Bioenergia. Os valores representam a média de três coletas independentes por mês, com seus respectivos desvios-padrão. Os dados contemplam o acompanhamento de pH do vinho bruto, °Brix residual (Sólidos Solúveis Totais), teor alcoólico do vinho bruto, acidez total do mosto, temperatura média das dornas de fermentação, concentração de leveduras viáveis do vinho bruto e contaminação bacteriana das dornas de fermentação.

Tabela 6 - Mensais médios dos meses de Abril a Novembro de 2024 dos principais parâmetros do processo fermentativo

Mês	pH <sup>1</sup>	SST (°Brix) <sup>2</sup>	Teor alcoólico <sup>3</sup> (%)	Acidez total <sup>4</sup> (g/L)	Temperatura (°C) <sup>5</sup>	Levedura (10 <sup>6</sup> cels/mL) <sup>6</sup>	Bactérias (10 <sup>5</sup> cels/mL) <sup>7</sup>
Abr	4,20 ± 0,0 5	1,5 ± 0,2	8,5 ± 0,4	3,0 ± 0,3	33,2 ± 0,5	80 ± 8	5,0 ± 0,5
Mai	4,30 ± 0,0 7	1,3 ± 0,2	9,0 ± 0,5	3,5 ± 0,4	33,0 ± 0,4	75 ± 7	6,0 ± 0,6
Jun	4,10 ± 0,0 6	1,0 ± 0,2	9,2 ± 0,6	4,0 ± 0,5	32,8 ± 0,4	70 ± 7	7,0 ± 0,7
Jul	4,40 ± 0,0 5	0,8 ± 0,1	10,0 ± 0,5	4,5 ± 0,4	32,5 ± 0,3	65 ± 6	8,0 ± 0,8
Ago	4,50 ± 0,0 4	0,5 ± 0,1	9,8 ± 0,5	5,0 ± 0,5	32,3 ± 0,3	60 ± 6	9,0 ± 0,9
Set	4,50 ± 0,0 4	0,6 ± 0,1	9,5 ± 0,4	4,8 ± 0,5	32,4 ± 0,3	55 ± 5	9,5 ± 0,9
Out	4,60 ± 0,0 5	0,7 ± 0,1	9,7 ± 0,5	5,2 ± 0,5	32,6 ± 0,4	50 ± 5	10,0 ± 1,0
Nov	4,40 ± 0,0 5	0,8 ± 0,1	9,0 ± 0,4	5,5 ± 0,5	32,5 ± 0,3	45 ± 4	12,0 ± 1,2

Fonte: Autora (2025)

<sup>1</sup>pH do vinho bruto; <sup>2</sup>SST (°Brix) do vinho bruto; <sup>3</sup>Teor alcoólico do vinho bruto; <sup>4</sup> Acidez total do mosto;

<sup>5</sup> Temperatura média das dornas de fermentação; <sup>6</sup> Concentração de leveduras viáveis do vinho bruto;

<sup>7</sup> Contaminação bacteriana das dornas de fermentação.

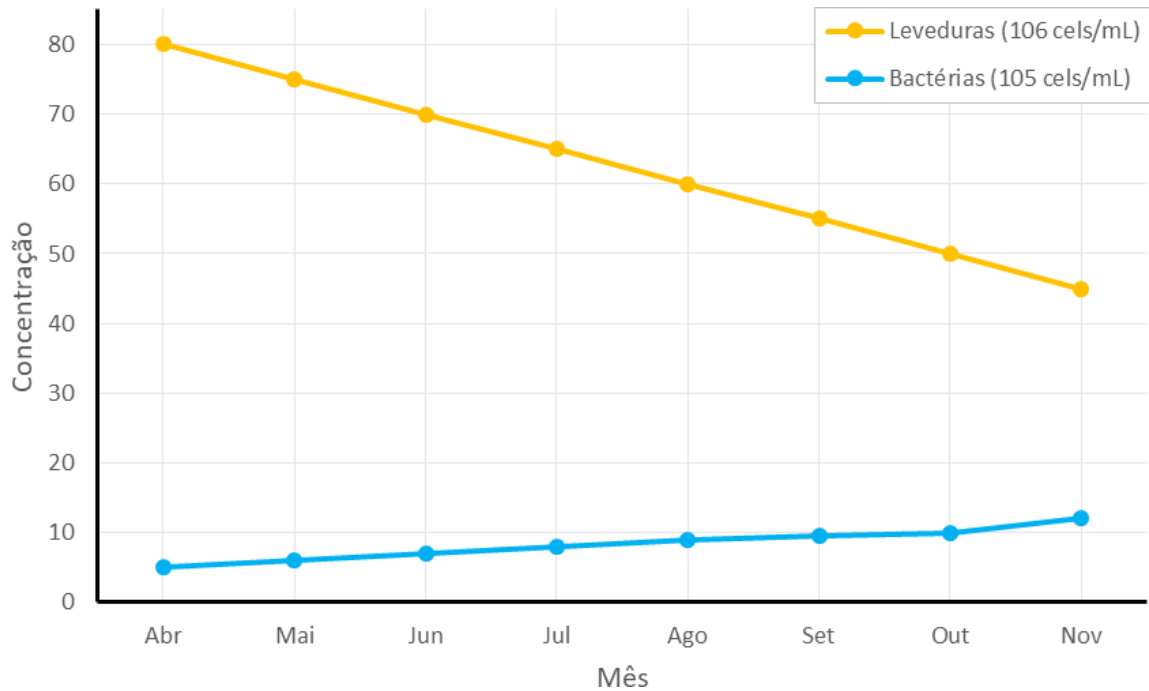
Os resultados obtidos evidenciam alterações consistentes nos parâmetros físico-químicos e microbiológicos ao longo do período analisado. O pH apresentou aumento gradual

de abril a outubro, seguido de ligeira redução em novembro, indicando uma estabilização do ambiente fermentativo, possivelmente associada à diminuição da atividade de leveduras e à maior predominância de bactérias acidogênicas. Esse comportamento é compatível com estudos que relatam variação do pH durante fermentações de matriz açucarada, na qual o consumo de açúcares e a produção de ácidos orgânicos influenciam diretamente a acidez final do produto (OLIVEIRA *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2022).

O teor de sólidos solúveis (°Brix) apresentou declínio contínuo até agosto (0,5 °Brix), refletindo o consumo de açúcares pelas leveduras e a subsequente produção de etanol, cujo teor alcoólico máximo foi observado em julho (10,0 %). A diminuição subsequente no teor alcoólico pode estar relacionada à oxidação parcial do etanol ou à metabolização secundária por bactérias, fenômeno relatado em fermentações espontâneas prolongadas (OLIVEIRA *et al.*, 2018; BALCÁZAR-ZUMAETA *et al.*, 2023).

A acidez total aumentou progressivamente de 3,0 g/L, em abril, para 5,5 g/L em novembro, sugerindo intensa produção de ácidos orgânicos, especialmente ácido lático e acético, provenientes tanto da atividade fermentativa das leveduras quanto da ação de bactérias lácticas e acéticas. A sucessão microbiana (Figura 4) foi evidenciada pelo decréscimo na população de leveduras de  $80 \times 10^6$  cels/mL, em abril, para  $45 \times 10^6$  cels/mL em novembro, concomitante ao aumento das bactérias de  $5,0 \times 10^5$  cels/mL para  $12,0 \times 10^5$  cels/mL. Esse padrão confirma a dinâmica típica de fermentações naturais, na qual a diminuição de açúcares e o aumento de produtos metabólicos favorecem o crescimento bacteriano (XU *et al.*, 2022; BAI *et al.*, 2025).

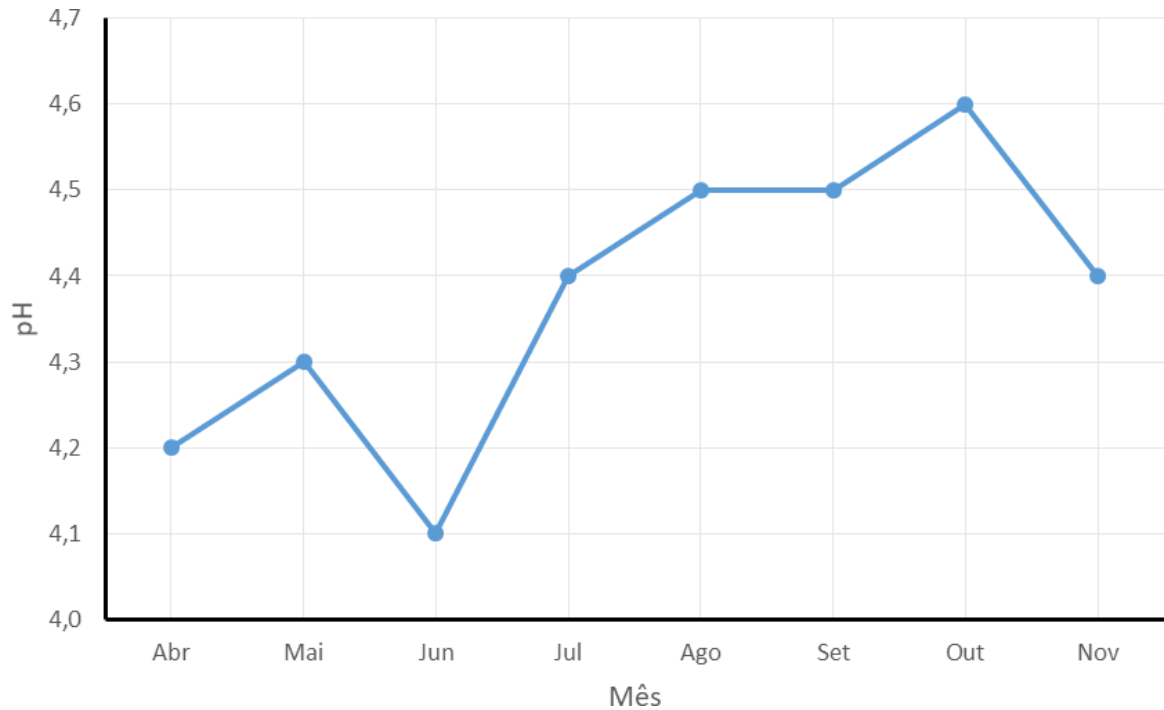
Figura 4 - Evolução da concentração de leveduras e bactérias durante a fermentação (abril a novembro de 2024)



Fonte: Autora (2025)

A temperatura manteve-se relativamente estável (32,3–33,2 °C), indicando condições ideais para a atividade enzimática das leveduras e para o metabolismo bacteriano subsequente. Estudos da indústria sucroalcooleira apontam que a faixa entre 32 e 34 °C favorece o desempenho da levedura, reduz riscos de contaminação e melhora o rendimento (EMBRAPA, 2025). Em síntese, os dados indicam uma fermentação gradual, com conversão eficiente de açúcares em etanol, aumento da acidez e sucessão microbiana característica, aspectos que impactam diretamente a estabilidade, segurança e perfil sensorial do produto final.

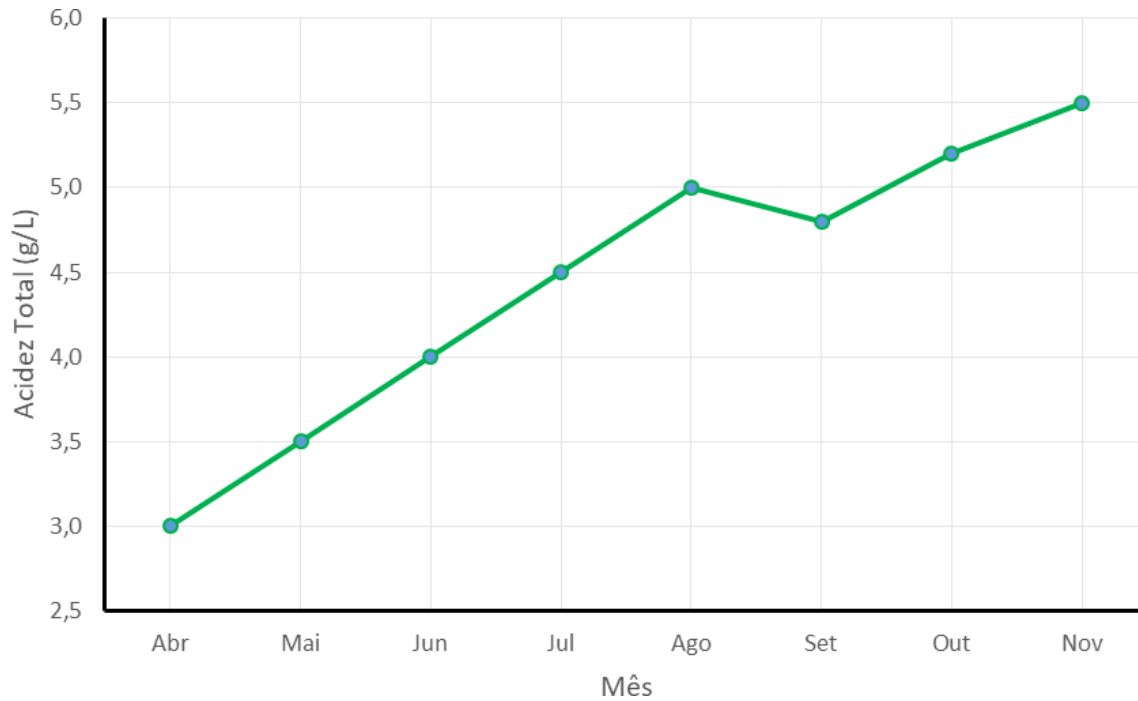
Figura 5 - Evolução mensal de pH e teor alcoólico



Autora (2025).

De acordo Figura 5, o pH mostra uma leve tendência de aumento de abril a outubro, chegando a 4,50–4,60, indicando menor acidez no caldo. Entretanto, em novembro, observa-se uma queda para 4,40, sugerindo intensificação da atividade microbiana e consequente aumento da acidez total do meio. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, ao longo da fermentação, o acúmulo de metabólitos orgânicos, sobretudo ácidos produzidos por bactérias ácido-láticas, contribui para a diminuição do pH. Conforme descrito por Bonatelli *et al.* (2017), em estudos realizados em destilarias brasileiras, a sucessão microbiana ao longo do processo fermentativo resulta em maior produção de ácidos orgânicos, fenômeno diretamente associado à redução dos valores de pH, especialmente em etapas mais avançadas da safra.

Figura 6 - Distribuição de acidez total por mês

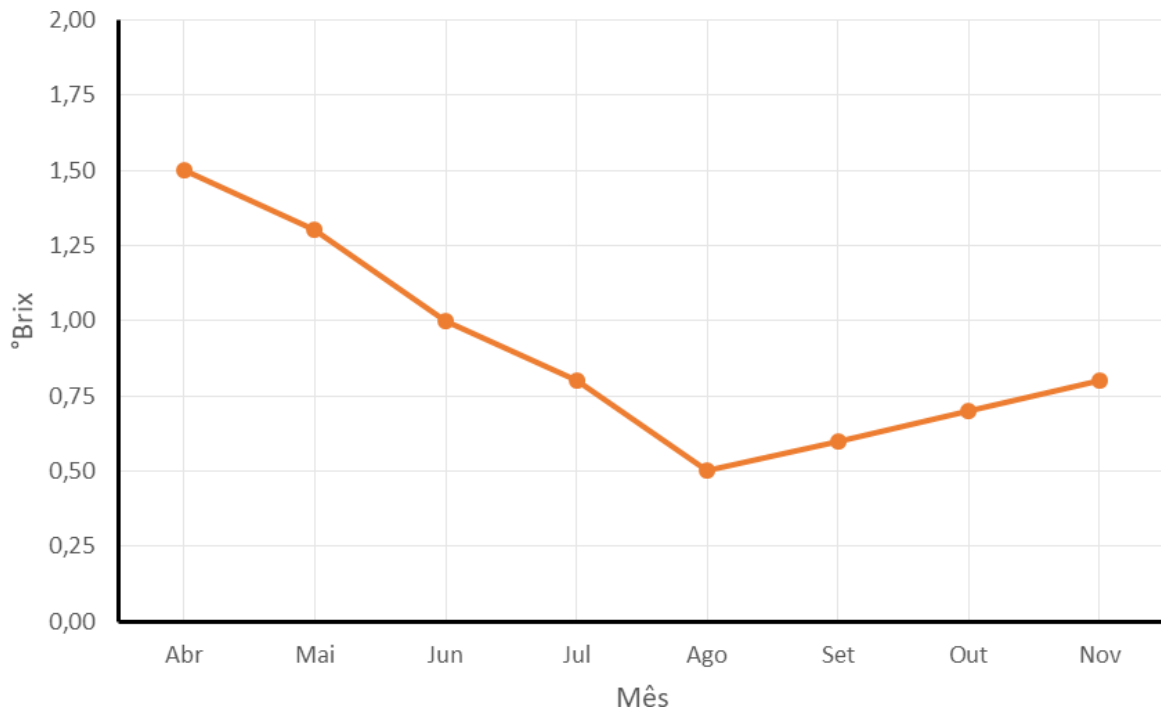


Autora (2025)

De acordo com a Figura 6, a acidez total apresenta um aumento contínuo ao longo do processo fermentativo, saindo de cerca de 3,0 g/L, em abril, até se aproximar de 5,5 g/L em novembro. Esse crescimento reflete o amadurecimento da cana, com maior liberação de ácidos orgânicos e intensificação da atividade microbiana, sobretudo de bactérias ácido-láticas, o que pode afetar negativamente o sabor e o perfil da fermentação. Estudo conduzido por Rego-Costa *et al.* (2023) com produção de bioetanol brasileira mostrou que, conforme se prolonga a fermentação, há acúmulo de ácidos orgânicos e aumento da acidez total, resultando em pH mais baixo e comprometimento da eficiência fermentativa.

## 5.2 Fermentação nas dornas

Figura 7 - Distribuição de °Brix residual por mês



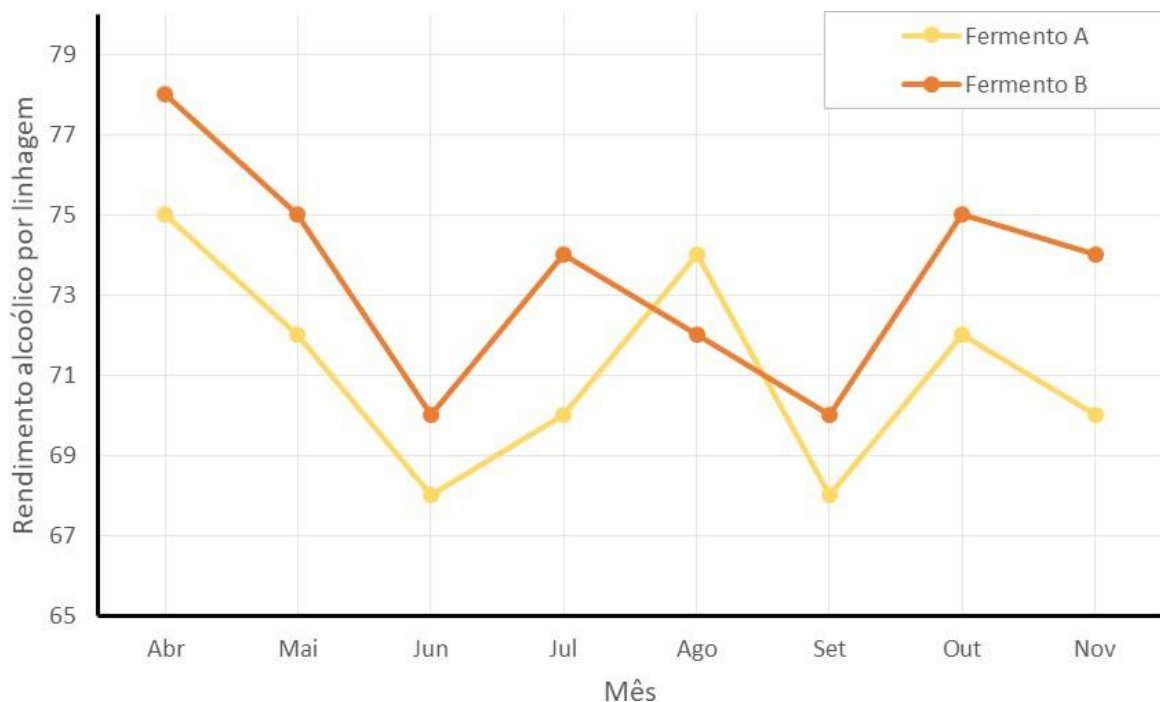
Fonte: Autora (2025).

De acordo com a Figura 7, observa-se também que o °Brix residual diminui de abril (1,5 °Brix) até agosto (0,5 °Brix), indicando que a maior parte dos açúcares solúveis está sendo consumida pelas leveduras. Em setembro e outubro, há uma leve elevação no °Brix residual, possivelmente em razão da queda da atividade fermentativa, seja por estresse celular, esgotamento de nutrientes ou por competição com bactérias contaminantes. Esse padrão de queda seguida de estabilização ou leve aumento do residual açucarado foi documentado em fermentação industrial de bioetanol, em que a eficiência da levedura diminui em estágios finais, permitindo que açúcares remanescentes acumulem (REGO-COSTA *et al.*, 2023).

### 5.3 Rendimento alcoólico por linhagem de fermento

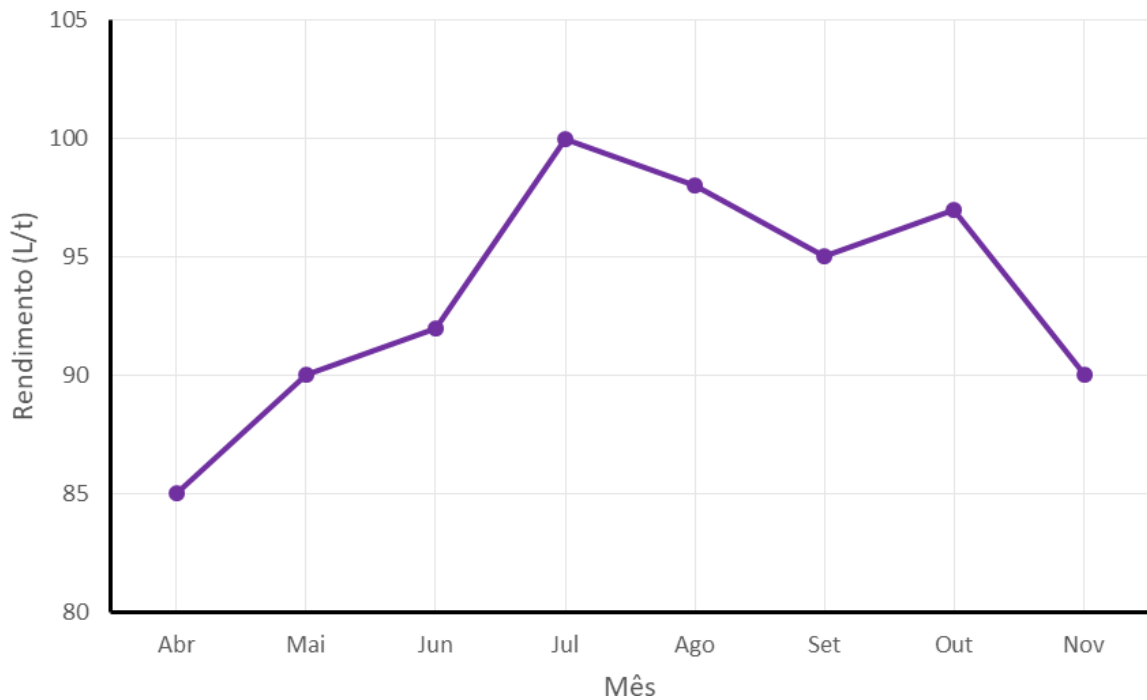
Foram comparadas duas linhagens industriais de levedura (Figura 6). O rendimento alcoólico médio (L de etanol por tonelada de cana) apresentado por cada linhagem está dado na Tabela 7. Observou-se que a linhagem B teve produção ligeiramente maior que a da linhagem A em todos os meses, com exceção de agosto. Por exemplo, em julho, o rendimento do fermento A foi de 74 L/t, enquanto o do fermento B foi de 70 L/t. Isso indica que pequenas diferenças de eficiência metabólica ou tolerância à acidez podem afetar o rendimento final. Em geral, ambos os fermentos alcançaram rendimento elevado, conforme esperado para leveduras industriais (DEL RIO, 2004; SOUZA, 2009; ARAVÉCHIA, 2013).

Figura 8 - Comparação mensal dos rendimentos das linhagens



Fonte: Autora (2025).

Tabela 7 - Rendimento alcoólico médio (L de etanol por tonelada de cana) apresentado por cada linhagem.



Fonte: Autora (2025).

O rendimento alcoólico, estimado a partir do teor alcoólico, é maior entre junho e agosto (aproximadamente 92–100 L/t), acompanhando a maior eficiência da fermentação. Já a queda observada em setembro e novembro sugere redução da atividade fermentativa das leveduras e intensificação da competição com bactérias contaminantes, como *Lactobacillus*. Estudos experimentais demonstraram que essas interações podem reduzir em até 26% a eficiência da produção de etanol, devido à competição por nutrientes e à formação de metabólitos inibidores que comprometem o desempenho da levedura (LINO *et al.*, 2021).

#### 5.4 Centrifugação do vinho

Após a fermentação, o vinho foi submetido à centrifugação para remoção das leveduras. Observou-se que os teores de etanol (variando entre 8,5 e 10,0 %) e °Brix (0,5–1,5) permaneceram essencialmente inalterados, indicando alta eficiência na separação das células. De forma semelhante, Vasconcelos (2007) descreve que, em processos industriais, a centrifugação é utilizada para separar as leveduras do mosto fermentado, seguida de tratamento ácido-térmico, permitindo sua recirculação como “corte de fermento” e garantindo elevada

biomassa ativa no processo. No presente monitoramento, mesmo com a redução gradual da população de leveduras ( $80 \times 10^6$  para  $45 \times 10^6$  cels/mL) e o aumento da contagem bacteriana ( $05 \times 10^5$  para  $12 \times 10^5$  cels/mL), a centrifugação não provocou aumento de contaminação, em função do pré-tratamento ácido-térmico. Resultados semelhantes foram relatados por Gutiérrez *et al.* (2023), que observaram menor desenvolvimento de bactérias lácticas e acéticas em fermentações inoculadas e controladas, preservando parâmetros como acidez e pH. No presente estudo, a acidez total aumentou de 3,0 g/L, em abril, para 5,5 g/L em novembro, enquanto o pH se manteve estável entre 4,1 e 4,6, confirmando que a qualidade do vinho foi preservada.

É importante destacar que os valores de etanol obtidos (8,5 a 10,0 % v/v) encontram-se dentro da faixa esperada para o vinho bruto em processos industriais (6,5 a 10,5 % v/v), conforme os parâmetros operacionais das dornas descritos na literatura. Isso reforça que as condições de fermentação monitoradas neste estudo foram adequadas, garantindo rendimento compatível com o padrão industrial e estabilidade do processo. Em resumo, a centrifugação foi eficiente em remover biomassa sem perdas significativas de produto, mantendo baixos os níveis bacterianos e permitindo a reciclagem de leveduras, otimizando o processo de fermentação contínua (VASCONCELOS, 2007; GUTIÉRREZ *et al.*, 2023).

## 5.5 Destilação alcoólica

Durante o período de armazenagem, não foram registradas alterações sensoriais ou físico-químicas significativas no etanol, com teor alcoólico e acidez total mantidos, indicando que as condições de temperatura e vedação nos tanques de aço carbono foram adequadas, conforme recomendado na literatura (CASTRO, 2013).

O etanol hidratado final foi armazenado em tanques de aço carbono com controle de temperatura. As análises das amostras indicaram teor alcoólico médio de aproximadamente 93- 94 % v/v e massa específica entre 0,825 e 0,830 kg/L, atendendo aos requisitos legais para etanol hidratado combustível, definidos pela Resolução nº 907 da ANP, que exige teor mínimo de 92,6 % v/v e massa específica na faixa de 805,2 a 811,2 kg/m<sup>3</sup> para esse tipo de produto (ANP, 2022). A massa específica do etanol é inversamente proporcional ao teor alcoólico, de modo que valores menores de massa específica correspondem a concentrações mais elevadas de álcool.

Por exemplo, na faixa de 92 a 94 % v/v de etanol, cada variação de aproximadamente

0,001 kg/L na massa específica pode corresponder a variações de cerca de 0,1 % v/v no teor alcoólico, permitindo um monitoramento rápido e confiável da concentração do produto sem necessidade de titulação imediata. A acidez total permaneceu abaixo de 0,03 g/L como ácido acético (níveis típicos < 30 mg/L), evidenciando excelente purificação do produto. Não foram observadas alterações sensoriais ou físico-químicas relevantes durante todo o período de armazenagem. Dessa forma, o etanol hidratado final apresentou qualidade comercial satisfatória, em conformidade com os padrões da indústria sucroalcooleira e com parâmetros físico-químicos consistentes com a faixa esperada para etanol hidratado de alto grau de pureza (ABNT NBR 15639, ANP, 2022).

Após a etapa de destilação, o etanol segue para a estocagem, fase estratégica do processo industrial que garante tanto a preservação da qualidade do biocombustível quanto a segurança da operação. O produto é armazenado em tanques metálicos projetados de acordo com normas específicas de segurança e engenharia, equipados com sistemas de vedação, ventilação e contenção secundária para evitar perdas por evaporação e riscos de contaminação ou derramamentos (DOE/NREL, 2016; NFPA, 2021). Por ser higroscópico, o etanol exige monitoramento constante para evitar aumento indesejado do teor de água, o que poderia comprometer sua eficiência energética e a conformidade com os padrões de comercialização (ANP, 2022). Além disso, práticas adequadas de manutenção e inspeção dos tanques, aliadas ao uso de materiais compatíveis, são essenciais para prevenir corrosão e prolongar a vida útil dos equipamentos (API, 2007). Dessa forma, a estocagem não é apenas uma etapa logística, mas parte integrante do controle de qualidade e da sustentabilidade do processo produtivo.

## **5.6 Estocagem do produto final**

Durante o período de armazenagem, não foram observadas variações sensoriais ou físico-químicas significativas do etanol, tais como teor alcoólico e acidez mantidos, o que indica condições adequadas de temperatura e vedação nos tanques de aço carbono, em conformidade com as boas práticas recomendadas pela literatura. O etanol hidratado final foi armazenado em tanques de aço carbono com temperatura controlada. As análises realizadas nas amostras dos tanques revelaram teor alcoólico médio de aproximadamente 94,5% (v/v) e massa específica média em torno de 0,825 a 0,830 kg/L, valores estes que atendem aos requisitos legais brasileiros para etanol hidratado combustível comum, conforme especificado pela Resolução ANP n.º 907/2022 (ANP, 2022) (Tabela 8A, Anexo A).

A acidez total no produto final permaneceu abaixo de 30 mg/L como ácido acético, valor máximo permitido, indicando excelente purificação. Não foram detectadas alterações sensoriais ou físico-químicas relevantes durante o armazenamento. Portanto, o etanol hidratado final apresentou qualidade comercial satisfatória, em conformidade com os padrões legais estabelecidos pelo sistema regulatório brasileiro para biocombustíveis. Além disso, estudos destacam que, mantidas condições adequadas de vedação, material do tanque compatível e controle de contaminação, as propriedades físico-químicas do etanol hidratado (como teor alcoólico, densidade e acidez) permanecem estáveis durante longos períodos de armazenagem, sem prejuízo sensorial significativo, o que corrobora os resultados aqui observados (DORETTO; SARTORI; VENTURINI FILHO, 2016).

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o processo de produção de etanol na Usina Bioenergia de Bambuí, conduzido entre os meses de abril e novembro, foi executado de forma eficiente em todas as suas etapas: fermentação, centrifugação e destilação. Os dados analisados indicam que houve controle técnico satisfatório, com valores de pH, teor alcoólico, acidez e açúcares residuais compatíveis com os padrões industriais para a produção de etanol combustível.

Conforme a hipótese inicialmente proposta, verificou-se que a variação nos parâmetros físico-químicos, como pH e acidez, bem como a escolha da linhagem de levedura empregada, influenciaram significativamente o rendimento alcoólico ao longo da safra. A fermentação resultou em vinhos com pH moderado (entre 4,1 e 4,6), teor alcoólico elevado (entre 8,5 e 10% v/v) e baixos açúcares residuais (°Brix entre 0,5 e 1,6), evidenciando elevada eficiência de conversão de açúcares em etanol. Observou-se, ainda, que a linhagem de fermento B apresentou desempenho ligeiramente superior ao da linhagem A em todos os meses, o que indica uma maior robustez fermentativa frente às condições operacionais da usina. As etapas posteriores também confirmaram a eficiência do processo, com obtenção de etanol hidratado final entre 93% e 94% v/v e acidez volátil inferior a 0,03 g/L, plenamente em conformidade com as normas técnicas da ANP.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que o estudo atingiu seu objetivo de caracterizar as diferentes etapas do processo de fermentação da cana-de-açúcar destinada à produção de etanol na Usina Bambuí Bioenergia S/A. Todos os parâmetros físico-químicos monitorados permaneceram dentro dos limites esperados, confirmando a estabilidade do processo, o elevado rendimento e o controle de qualidade adequado. Observou-se influência direta das variações de pH, acidez e linhagem de levedura sobre o desempenho fermentativo, refletindo na eficiência da conversão de açúcares em etanol.

Entretanto, reconhecem-se limitações do estudo, como a ausência de análises estatísticas inferenciais, que poderiam fortalecer a comprovação das diferenças observadas entre as linhagens avaliadas. Além disso, variações na composição do caldo de cana, não controladas ao longo da safra, podem ter afetado o rendimento em determinadas etapas.

Recomenda-se que futuras pesquisas incluam modelagens estatísticas e microbiológicas mais detalhadas, bem como a avaliação de linhagens com maior tolerância à acidez e ao teor alcoólico. Dessa forma, os resultados obtidos contribuem de maneira prática para o aprimoramento do controle e da eficiência da fermentação alcoólica em escala industrial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFOCAPI. *Laboratório para análise da sacarose da cana-de-açúcar*. Centro CANAGRO “José Coral”, 2010. Disponível em: [http://www.cana.com.br/afocapi/lab\\_sacarose.pdf](http://www.cana.com.br/afocapi/lab_sacarose.pdf). Acesso em: 12 jun. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Resolução nº 907, de 22 de junho de 2022**. Dispõe sobre as especificações do etanol combustível e suas regras de comercialização em todo o território nacional. *Diário Oficial da União: Seção 1*, Brasília, DF, 22 jun. 2022.
- ALBARELLI, J. Q. *Produção de açúcar e etanol de primeira e segunda geração: simulação, integração energética e análise econômica*. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
- ALCARDE, A. R. *Processamento de cana-de-açúcar: extração*. In: **EMBRAPA. Cultivos: cana-de-açúcar – pós-produção**. Agência de Informação Tecnológica, 2022a. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/extracao>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- ALCARDE, A. R. *Processamento de cana-de-açúcar: tratamento do caldo*. In: **EMBRAPA. Cultivos: cana-de-açúcar – pós-produção**. Agência de Informação Tecnológica, 2022b. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/tratamento-do-caldo>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- ALCARDE, A. R.; SILVA, F. C.; BAPTISTA, A. S. **Cana-de-açúcar: fermentação**. Brasília: EMBRAPA, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/tratamento-do-caldo/fermentacao>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- ALCOFORADO, C. L. G. *Avaliação dos dados de recebimento da cana-de-açúcar de uma usina da Paraíba*. 2019. Monografia (Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- ALMEIDA, I. C.; BASSO, L. C. **Complex yeast–bacteria interactions affect the yield of industrial ethanol fermentation**. *Nature Communications*, v. 12, art. 1498, 2021.
- ALMEIDA, I. C.; PACHECO, T. F.; MACHADO, F.; GONÇALVES, S. B. **Evaluation of different strains of *Saccharomyces cerevisiae* for ethanol production from high-amylopectin BRS AG rice (*Oryza sativa* L.)**. *Scientific Reports*, v. 12, art. 2122, 2022.
- AMARAL, F. S. *Influência conjunta do pH, temperatura e concentração de sulfito na fermentação alcoólica de mostos de sacarose*. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API Standard 650: welded tanks for oil storage**. Washington, DC: API Publishing Services, 2007.

AMORIM, H. V.; BASSO, L. C.; ALVES, D. M. G. **Processo de produção de álcool – controle e monitoramento**. 2. ed. Piracicaba: Fermentec/FEALQ/ESALQ-USP, 1996. 103 p.

ANGELIS, D. F. de. Agentes físicos, químicos e microbiológicos que afetam a fermentação alcoólica. In: MUTTON, M. J. R.; MUTTON, M. A. (org.). *Aguardente de cana – produção e qualidade*. Jaboticabal: FUNEP, 1992. p. 49–66.

ARAVÉCHIA, P. R. **Estudo da influência da pureza do xarope e mel final resultante de produção de açúcar na contaminação doprocessamento fermentativo e seletividade do meio**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Matão, Matão, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15639: etanol combustível — determinação da massa específica e do teor alcoólico por densímetro digital de bancada**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 21. ed. Gaithersburg, MD: AOAC International, 2005.

BAI, C.; FAN, B.; HAO, J.; YAO, Y.; RAN, S.; WANG, H.; LI, H.; WEI, R. **Changes in microbial community diversity and the formation mechanism of flavor metabolites in industrial-scale spontaneous fermentation of Cabernet Sauvignon wines**. *Foods*, v. 14, e235, 2025.

BALCÁZAR-ZUMAETA, C. R.; CASTRO-ALAYO, E. M.; CAYO-COLCA, I. S.; IDROGO-VÁSQUEZ, G.; MUÑOZ-ASTECKER, L. D. **Metabolomics during the spontaneous fermentation in cocoa (*Theobroma cacao* L.): an exploratory review**. *Food Research International*, v. 163, e112190, 2023.

BAMBUÍ BIOENERGIA S/A. **Agroindústria canavieira**. 2023b. Disponível em: <https://bambuioenergia.com.br/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

BAMBUÍ BIOENERGIA S/A. **Produção de energia elétrica**. 2023d. Disponível em: <https://bambuioenergia.com.br/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

BAMBUI BIOENERGIA S/A. **Produção de Etanol**. 2023c. Disponível em: <https://bambuioenergia.com.br/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

BAMBUÍ BIOENERGIA S/A. **Um pouco de nossa empresa**. 2023a. Disponível em: <https://bambuioenergia.com.br/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

BANAT, I. M.; NIGAM, P.; SINGH, P.; MARCHANT, R.; McHALE, A. P. Review: ethanol production at elevated temperatures and alcohol concentration: part I – yeast in general. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 14, n. 6, p. 809–821, 1998.

BASSO, L. C.; DE AMORIM, H. V.; DE OLIVEIRA, A. J.; LOPES, M. L. **Yeast selection for fuel ethanol production in Brazil.** *FEMS Yeast Research*, v. 8, n. 7, p. 1155-1163, nov. 2008.

BIODIESELBR. *PróÁlcool – Programa Brasileiro de Álcool*. 2012. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool/programa-etanol#:~:texto%20PRO%C3%81LCOOL%20foi%20um%20programa,de%20ve%C3%ADculos%20a%20%C3%A1lcool%20hidratado>. Acesso em: 10 mai. 2025.

BONATELLI, M. L.; LUTZ IENCZAK, J.; LABATE, C. A. **Characterization of the contaminant bacterial communities in Brazilian distilleries operating different fermentation modes throughout sugarcane harvest.** *FEMS Microbiology Letters*, v. 364, n. 17, art. fnx159, p. 1-8, ago. 2017.

BRAZ, A. C. S. *Estudo da fermentação do bagaço de cana para obtenção de etanol de segunda geração*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

CANHA, M. A. *Rendimento de fermentação*. 2009. Monografia (Tecnologia) – Universidade Estadual de Maringá, Umuarama, 2009.

CARDOSO, M. G. *Produção de aguardente de cana*. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 445 p.

CARVALHO, L. B. S. *et al.* Sistema independente de injeção de etanol em motores de ignição por compressão: revisão sistemática. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar**, v. 6, n. 5, p. e656417-e656417, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/recima21.v6i5.6417>. Acesso em: 11 nov. 2025.

CARVALHO, J. C. M.; SATO, S. Fermentação descontínua. In: SCHMIDELL, W.; LIMA, U. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. (org.). *Biotecnologia industrial – engenharia bioquímica*. v. 2. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2001. cap. 9, p. 193–204.

CHIEPPE JÚNIOR, J. B. *Tecnologia e fabricação do álcool: Rede e-Tec Brasil*. In: IFG – Instituto Federal de Goiás; Universidade Federal de Santa Maria (org.). Inhumas: IFG; Santa Maria: UFSM, 2012.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. *Acompanhamento da safra brasileira de grãos*. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 14 jun. 2025.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série histórica. Brasília: CONAB, 2024a. Disponível em: <https://antigo.conab.gov.br/ultimas-noticias/5489-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2023-24-chega-a-713-2-milhoes-de-toneladas-a-maior-da-serie-historica>. Acesso em: 13 maio 2025.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. *Produção de cana-de-açúcar na safra 2024/25 sofre redução devido a condições climáticas adversas*. Brasília: CONAB, 2024b.

Disponível em: <https://antigo.conab.gov.br/ultimas-noticias/5841-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2024-25-sofre-reducao-devido-a-condicoes-climaticas-adversas>. Acesso em: 13 maio 2025.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CONSECANA. **Manual de Instruções**: Anexo I - Normas Operacionais de Determinação da Qualidade da Cana-de-Açúcar. 5. ed. Piracicaba: CONSECANA-SP, 2024. Disponível em: [https://www.aprocana.com.br/manual\\_consecana.pdf](https://www.aprocana.com.br/manual_consecana.pdf). Acesso em: 11 nov. 2025.

CORRÊDO, L. P. *et al.* Evaluation of Minimum Preparation Sampling Strategies for Sugarcane Quality Prediction by vis-NIR Spectroscopy. **Sensors**, v. 21, n. 6, p. 2195, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s21062195>. Acesso em: 11 nov. 2025.

DA SILVA, João Paulo Nunes; DA SILVA, Maria Regina Nunes. *Noções da cultura da cana-de-açúcar*. 1. ed. Inhumas: IFG, 2012.

DA SILVA, R. R. *Comparação dos parâmetros físico-químicos nos diferentes estágios de infecção da cana-de-açúcar*. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024.

DEL RIO, D. T. *Biossorção de cádmio por leveduras Saccharomyces cerevisiae*. 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

DIAS, F. F. *Alguns elementos sobre a cadeia produtiva da cana-de-açúcar no Brasil*. *Revista Geosul*, Florianópolis, v. 36, n. 79, p. 116–142, mai./ago. 2021.

DORETTO, D. A.; SARTORI, M. M. P.; VENTURINI FILHO, W. G. **Análise físico-química do etanol hidratado combustível na cidade de São Paulo**. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v. 31, n. 4, p. 356-360, 2016.

DORTA, C.; OLIVA-NETO, P.; ABREU-NETO, M. S.; NICOLAU JUNIOR, N.; NAGASHIMA, A. I. *Synergism among lactic acid, sulfite, pH and ethanol in alcoholic fermentation of Saccharomyces cerevisiae (PE-2 and M-26)*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 22, p. 177–182, 2006.

EMBRAPA. **Fermentação**. Portal Embrapa — Agência de Informação Tecnológica. Cultivos: cana-de-açúcar / pósprodução / processamento da cana-de-açúcar / tratamento do caldo / fermentação, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/tratamento-do-caldo/fermentacao>. Acesso em: 25 set. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Manual de métodos físico-químicos para análise de álcool etílico*. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2000.

FACCIOTTI, M. C. R. *Biotecnologia Industrial – Engenharia Bioquímica*. In: SCHMIDELL, W.; LIMA, U. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. (org.). *Biotecnologia industrial – engenharia bioquímica*, vol. 2, cap. 12: Fermentação contínua, p. 223–225. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

- FAO. *Crop Yield Response to Water*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.
- FARINELLI, M. M. R.; TOMAS MELO, C. M. **Avaliação da qualidade físico-química de três marcas de açúcar do tipo cristal**. *Revista Inova Ciência & Tecnologia*, v. 7, e0211143, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.46921/rict2021-1143>. Acesso em: 13 mai. 2025.
- FERNANDES, A. C. *Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar*. 3. ed. Piracicaba: STAB, 2011.
- FERREIRA, E. *Contribuição para o estudo da otimização da fermentação alcoólica operando em batelada-alimentada*. 2005. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 2005.
- FIGUERUT, J.; PAES, L. A. D. *Impurezas e qualidade da cana-de-açúcar*. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira; STAB, 2014.
- FRANCISCO, W. C. *Proálcool*. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/brasil/proalcool.htm>. Acesso em: 08 mar. 2025.
- GÓES-FAVONI, S. P. de; 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*, v. 9, n. 4, p. 285–296, 2018. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2018.004.0023.
- GOMES, F. S. *Antagonismo entre leveduras e bactérias lácticas na fermentação alcoólica*. 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.
- GOOGLE. *Google Maps*, 2024. Disponível em: <https://www.google.com/maps>. Acesso em: 20 set. 2024.
- GROFF, A. M. *Fatores de produção agropecuária: apostila, transparências e notas de aula*. Campo Mourão: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, FECILCAM, 2010.
- GUEDES, F.; FARIA, G.; RESENDE, N.; PALOMA, J. *Terno de moagem de cana-de-açúcar*. Relatório de Estágio Obrigatório (Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Arcos, Arcos, 2018.
- GUTIÉRREZ, A. R.; SANTAMARÍA, P.; GONZÁLEZ-ARENZANA, L.; GARIJO, P.; OLARTE, C.; SANZ, S. **Yeasts inoculation effect on bacterial development in carbonic maceration wines elaboration**. *Foods*, Basel, v. 12, n. 14, p. 2755, 2023.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). *Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos físico-químicos para análise de alimentos*. 4. ed. São Paulo: IAL, 2008.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). *Métodos oficiais de determinação de teor alcoólico e densidade para fins de controle de etanol combustível*. Rio de Janeiro: Inmetro, 2018. (Documento técnico interno).

JACOBUS, A. P.; STEPHENS, T. G.; MACKAY, J. P.; TORRES-GARCÍA, Á.; SMITH, M. L.; BÁRZOLA, M. C.; SUMMERS, D. K.; SANTOS, L. P.; BASSO, L. C.; GONÇALVES, S. B.; MALCATA, F. X.; PRADO, P. G.; GODDARD, M. R.; ALVES, N.; NOGUEIRA, M.M. **Comparative genomics supports that Brazilian bioethanol *Saccharomyces cerevisiae* comprise a unified group of domesticated strains related to cachaça spirit yeasts.** *Frontiers in Microbiology*, v. 12, art. 644089, 2021.

LADINO-GARZÓN, W. L. *et al.* Inoculation of *Saccharomyces cerevisiae* with sugar cane juice as a starter culture in coffee (*Coffea arabica*) fermentation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 1, p. e20230010, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n1e272094>. Acesso em: 11 nov. 2025.

LEITE, R. C. C.; CORTEZ, L. A. B. **Proálcool: 40 anos – universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro.** São Paulo: Blucher, 2016.

LIMA, U. A.; BASSO, L. C.; AMORIM, H. V. *Biotecnologia industrial – processos fermentativos e enzimáticos.* In: SCHMIDELL, W.; LIMA, U. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. (org.). *Biotecnologia industrial – engenharia bioquímica*, vol. 1, cap. 1: Produção de Etanol, p. 1–43. São Paulo: Blucher, 2001.

LINO, F. S. O.; BAJIC, D.; VILA, J. C. C.; SÁNCHEZ, A.; SOMMER, M. O. A. **Complex yeast–bacteria interactions affect the yield of industrial ethanol fermentation.** *Nature Communications*, v. 12, art. 1498, 2021.

LOPES, C. H. **Tecnologia de produção de açúcar de cana.** São Carlos: EDUFSCAR, 2011.

MACHADO, P. S. S. **Tecnologia da fabricação do açúcar.** Inhumas: IFG; Santa Maria: UFSM, 2012.

MACIEL, B. F.; FIGUEIREDO, I. C.; MARQUES, O. M. **A qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de álcool.** *Nucleus*, Ituverava, p. 82–92, 2008.

MADIGAN, M. T.; MARTINHO, J.; DUNLAP, P. V.; CLARK, D. P. **Microbiologia de Brock.** 12. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

MAHMUD, M. A.; ANANNYA, F. R. SUGARCANE BAGASSE. **A source of cellulosic fiber for diverse applications.** *Heliyon*, v. 7, n. 8, p. e07771, 13 ago. 2021.

MARTINS, C. A. P. **Avaliação do efeito do inóculo e do perfil de alimentação do mosto na produção em escala piloto e industrial de etanol.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

MOLINET, J. *et al.* Natural variation in diauxic shift between patagonian *saccharomyces eubayanus* strains. **ASM Journals**, v. 7, n. 6, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/msystems.00640-22>. Acesso em: 11 nov. 2025.

MONTEIRO, B. M. D. S. **Produção de etanol combustível: efeito da suplementação nitrogenada na fermentação de mosto decalado de cana com alta concentração de açúcar.** 2016. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, 2016.

NACIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION – NFPA. **NFPA 30: flammable and combustible liquids code**. Quincy: NFPA, 2021.

NAVES, R. F.; FERNANDES, F. S.; PINTO, O. G.; NAVES, P. L. F. *Contaminação microbiana nas etapas do processamento e sua influência no rendimento fermentativo em usinas alcooleiras*. Enciclopédia Biosfera, Goiânia, v. 6, n. 11, p. 1–16, 2010.

NASCIMENTO, A. D. L. *et al.* A evolução genética do gênero sorghum e a importância do cereal para a economia mundial e a promoção da segurança alimentar a nível global: uma revisão integrativa. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 2, p. e3552-e3552, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i2.3552>. Acesso em: 11 nov. 2025.

NIZ, M. Y. K. *Produção biológica de hidrogênio e metano a partir de vinhaça de cana-de-açúcar em termofilia extrema*. 2019. 140 f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

NOBRE, T. P. *Viabilidade celular de Saccharomyces cerevisiae em associação com bactérias contaminantes da fermentação alcoólica*. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

NOVACANA. *Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas*. Curitiba: Paraná, 2023. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>. Acesso em: 12 jun. 2025.

OLIVEIRA, É. R.; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M. S.; OLIVEIRA, A. R.; DUARTE, R. C. M.; VILAS BOAS, E. V. de B. **Assessment of chemical and sensory quality of sugarcane alcoholic fermented beverage**. *Journal of Food Science and Technology*, v. 55, n. 1, p. 72-81, 2018.

OLIVEIRA, L. S.; SANTOS, H. M.; BASSO, L. C. **Dynamics of microbial contaminants is driven by selection during ethanol production**. *Scientific Reports*, v. 10, art. 17362, 2020.

PACHECO, T. F. *Fermentação alcoólica com leveduras de características floculantes em reator tipo torre com escoamento ascendente*. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

PASCHOALINI, G.; ALCARDE, V. **Estudo do processo fermentativo de usina sucroalcooleira e proposta para sua otimização**. *Revista de Ciência & Tecnologia*, v. 16, n. 32, p. 59–68, 2009.

PEÇANHA, T.; SILVA, I. A.; MACEDO, M. M. S.; NETO, R. I. M.; ROCHA SOUTO, H. E. G. F.; LIMA, R. S.; GARIBALDI, M. D.; OLIVEIRA, J. B. *Cogeração de energia elétrica a partir da biomassa agroindustrial e florestal em uma usina do Centro-Oeste Mineiro*. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 10, p. 20954–20976, 2019.

PEREIRA, D. A.; VIEIRA, R. C. M.; GIMENEZ, A. Z. **Fatores que afetam a fermentação alcoólica**. *Ciência & Tecnologia*, v. 12, n. 1, p. 44–55, 2020. DOI: 10.52138/citec.v12i1.113.

RIDER, M. *et al.* Proteome dynamics during transition from exponential to stationary phase under aerobic and anaerobic conditions in yeast. **Molecular & Cellular Proteomics**, v. 22, n. 6, p. 100522, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mcpro.2023.100552>. Acesso em: 11 nov. 2025.

RAÍZEN – Times de Sustentabilidade e Comunicação Corporativa da Raízen. **Cana-de-açúcar: tudo sobre sua importância e versatilidade**. 2021. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/cana-de-acucar>. Acesso em: 13 mai. 2025.

REAL, J. H. F. *Avaliação da fermentação conjunta de melaço de soja e cana-de-açúcar para produção de etanol*. 2021. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

REGO-COSTA, A.; HUANG, K.; DESAI, S.; GOMBERT, A. K.; KÄSTNER, M.; CHEN, F.; YANG, F.; ZHANG, B.; BASSO, L. C.; SILVA, M. C. da; ROUBACH, R. **Yeast population dynamics in Brazilian bioethanol production**. *NPJ Biofilms and Microbiomes*, v. 9, art. 10, 2023.

REIS, H. B.; RIBEIRO, E. J. *Influência conjunta do pH, temperatura e concentração de sulfito em fermentação alcoólica de mostos de sacarose*. Anais do IX Encontro e XIII Seminário de Iniciação Científica, 2009.

RUDOLPH RESEARCH ANALYTICAL. **Octapol: clarificação para polarimetria – vídeo em português**. 2020. Disponível em: <https://rudolphresearch.com/videos/octapol-portuguese/>. Acesso em: 14 maio 2025.

SALVATO, F. *Fermentação de mosto industrial por linhagens de Saccharomyces cerevisiae com transportador de sacarose sobre expressão de invertase interna: estudo comparativo com linhagens com alta e baixa atividade de invertase externa*. 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, 2010.

SANTOS, F.; BORÉM, A. **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita**. 1. ed. Viçosa, MG: UFV, 2016. 290 p.

SANTOS, H. M. C.; OLIVEIRA, M. A.; OLIVEIRA, A. F.; OLIVEIRA, G. B. A. **Composição centesimal das cultivares de soja BRS 232, BRS 257 e BRS 258 cultivadas em sistema orgânico**. Revista Brasileira de Pesquisa em Alimentos, Campo Mourão (PR), v. 1, n. 2, p. 117–119, jul./dez. 2010.

SILVA, R. N.; LIMA, F. E. **Estudo do impacto do teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar em sistemas de cogeração**. Revista Geama, Usina JB, Pernambuco, Brasil, 2020.

SILVA-FILHO, E. A.; MEOL, H. F.; ANTUNES, D. F.; SANTOS, S. K. B.; RESENDE, A. M.; SIMÕES, D. A.; MORAIS JR, M. A. **Isolation by genetic and physiological characteristics of fuel-ethanol fermentative Saccharomyces cerevisiae strain with potential for genetic manipulation**. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, Hampshire, v. 32, p. 481–486, 2005.

SOUSA, J. L. U.; MONTEIRO, R. A. B. **Fatores interferentes na fermentação alcoólica para produção de etanol**. FAZU em Revista, Uberaba, n. 8, p. 100–107, 2011.

- SOUZA, C. S. *Avaliação da produção de etanol em temperaturas elevadas por uma linhagem de S. cerevisiae*. 2009. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Butantan, São Paulo, 2009.
- SOUZA, S. O.; DALPIM, V. A. S. L.; HERCULANI, R. *Ergonomia aplicada ao setor de PCTS em uma usina de cana-de-açúcar e álcool localizada no interior do estado de São Paulo*. Revista Produção em Destaque, Bebedouro, SP, v. 2, n. 1, p. 196–219, 2018.
- STUPIELLO, J. P.; HORII, J. *Condução da fermentação alcoólica*. Saccharum, v. 17, p. 43–46, 1981.
- TEIXEIRA, M.; SAMORA, R. *Datagro vê melhora na safra 22/23 de cana do CS, mas volume ainda abaixo de 20/21*. Reuters, 26 out. 2021.
- UDOP – União Nacional da Bioenergia. *Legislação-Arquivos: determinação das impurezas vegetais e totais em carregamentos de cana-de-açúcar pelo método delimitação manual à seco*. Araçatuba, SP: UDOP, 2014.
- UNITED STATES. Department of Energy (DOE); National Renewable Energy Laboratory (NREL). **Ethanol storage and handling guidelines**. Golden, CO: NREL, 2016.
- USDA – United States Department of Agriculture; Foreign Agricultural Service. *Sugar: World Markets and Trade*, mai. 2020.
- VASCONCELOS, Y. **Advantageous fermentation**. Revista Pesquisa FAPESP, São Paulo, n. 135, maio 2007.
- VENTURINI FILHO, W. G. *Bebidas alcoólicas: ciência e tecnologia*. São Paulo: Blucher, 2010.
- VIÉGAS, E. K. D. *Propriedade antibacteriana da própolis verde sobre bactérias contaminantes da fermentação etanólica*. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia em Alimentos) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- XU, X.; MIAO, Y.; WANG, H.; YE, P.; LI, T.; LI, C.; ZHAO, R.; WANG, B.; SHI, X. **A snapshot of microbial succession and volatile compound dynamics in flat peach wine during spontaneous fermentation**. *Frontiers in Microbiology*, v. 13, e919047, 2022.

## ANEXO A

Tabela 7A - Especificações físico-químicas do etanol hidratado combustível

<b>Característica</b>	<b>Unidade</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Método de Ensaio</b>
Aspecto	-	LIMP	Limp	Visual
Cor	kg/m <sup>3</sup>	Incolor	Limp	NBR 5992 / NBR 15639 / ASTM D4052
Massa específica a 20 °C	% m	805,2	811,2	NBR 5992 / NBR 15639
Teor alcoólico	µS/m	92,5	94,6	NBR 10547 / ISO 17308
Condutividade elétrica	mg/L	30	80	NBR 9866 / ISO 17315
Índice de acidez (mg de ácido acético/L)	mg/L	60	500	ISO 1388-4
Teor de aldeídos (como acetaldeído)	mg/L	50	500	EN 15721
Teor de álcoois superiores	mg/L	50	100	ASTM D1617
Teor de ésteres (como acetato de etila)	mg/L	5	4	NBR 8644
Resíduo por evaporação	mg/100 mL	2	0,5	NBR 10894
Teor de sulfato	% v/v	4	0,5	NBR 10422
Teor de sódio	% v/v	0,5	0,5	NBR 16041
Teor de hidrocarbonetos	% v/v	0,5	0,5	NBR 15531
Teor de metanol	% m/m	86	7,5	NBR 15531 / NBR 15888

Fonte: (ANP, 2022).

Legenda: A tabela apresenta os parâmetros de qualidade exigidos pela legislação brasileira para o etanol hidratado combustível, incluindo limites mínimos e máximos de propriedades físico-químicas (como teor alcoólico, massa específica, acidez, condutividade elétrica, teor de aldeídos, ésteres, álcoois superiores, entre outros). Também estão descritos os métodos normatizados de análise, baseados em normas nacionais (ABNT/NBR) e internacionais (ASTM, ISO e EN), que garantem a padronização dos ensaios laboratoriais.