

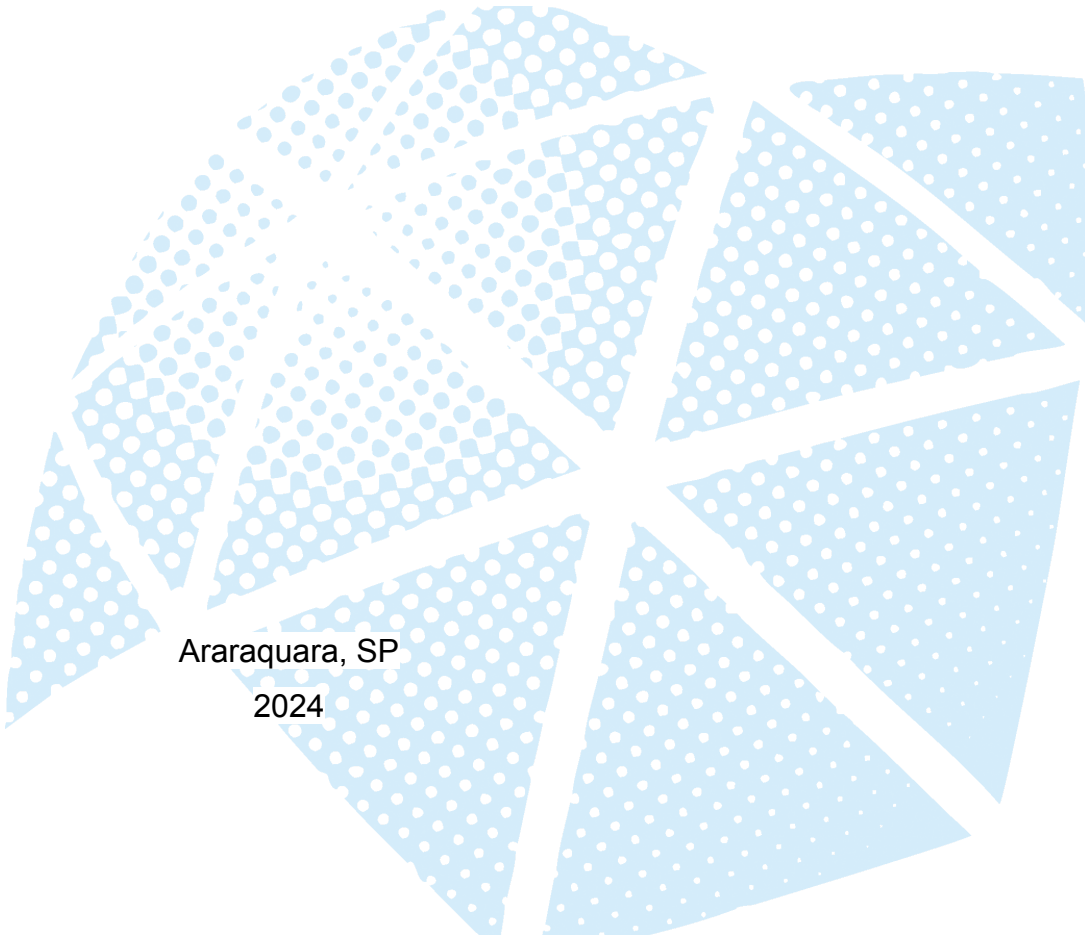
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**  
**Faculdade de Ciências Farmacêuticas - Campus de Araraquara**

**LUCAS ROCHA FELIX**

**PROCESSOS PRÉ FERMENTATIVOS NA PRODUÇÃO DE CERVEJA:  
POTENCIAIS FATORES QUE MODULAM ESSAS ETAPAS E A RELAÇÃO COM  
AS CARACTERÍSTICAS SENSORIAIS E FUNCIONAIS.**

Araraquara, SP

2024



**LUCAS ROCHA FELIX**

**PROCESSOS PRÉ FERMENTATIVOS NA PRODUÇÃO DE CERVEJA:  
POTENCIAIS FATORES QUE MODULAM ESSAS ETAPAS E A RELAÇÃO COM  
AS CARACTERÍSTICAS SENSORIAIS E FUNCIONAIS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Farmácia Bioquímica da  
Faculdade de Ciências Farmacêuticas de  
Araraquara, da Universidade Estadual Paulista  
“Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do grau  
de Farmacêutico(a) Bioquímico(a).

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Miziara Barboza  
Ferreira

Araraquara, SP  
2024

---

**F316p** Felix, Lucas Rocha.  
Processos pré fermentativos na produção de cerveja: potenciais  
fatores que modulam essas etapas e a relação com as características  
sensoriais e funcionais / Lucas Rocha Felix. – Araraquara, 2024.  
83 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Farmácia  
Bioquímica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.  
Faculdade de Ciências Farmacêuticas.

Orientador: Leonardo Miziara Barboza Ferreira.

1. Produção de cerveja. 2. Enzimas. 3. Processos fermentativos. 4.  
Perfil sensorial. 5. Propriedades funcionais. 6. Levedura cervejeira. I.  
Ferreira, Leonardo Miziara Barboza, orient. II. Título.

---

Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação – Faculdade de Ciências  
Farmacêuticas UNESP Campus de Araraquara  
Kazumi Tomoyose - CRB 8/10904

**Esta ficha não pode ser modificada**

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Esta pesquisa contribui para o aprofundamento do conhecimento sobre os compostos bioativos da cerveja, ampliando a compreensão de seus efeitos sensoriais e funcionais. Seus achados podem auxiliar no desenvolvimento de novos produtos, impulsionando a inovação na indústria cervejeira e fortalecendo a competitividade do setor. Além disso, os resultados podem estimular práticas mais sustentáveis na produção e fomentar discussões sobre o consumo responsável. O estudo também agrega valor ao campo acadêmico, promovendo intercâmbio de conhecimento e abrindo espaço para colaborações nacionais e internacionais.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This research advances the understanding of bioactive compounds in beer, deepening knowledge of their sensory and functional effects. Its findings may support the development of new products, driving innovation in the brewing industry and enhancing market competitiveness. Additionally, the results can encourage more sustainable production practices and foster discussions on responsible consumption. The study also adds value to the academic field, promoting knowledge exchange and creating opportunities for national and international collaborations.

**LUCAS ROCHA FELIX**

**PROCESSOS PRÉ FERMENTATIVOS NA PRODUÇÃO DE CERVEJA:  
POTENCIAIS FATORES QUE MODULAM ESSAS ETAPAS E A RELAÇÃO  
COM AS CARACTERÍSTICAS SENSORIAIS E FUNCIONAIS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Araraquara, para obtenção do título de Bacharel em Farmácia-Bioquímica.

Data da defesa: 11/12/2024

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente  
**LEONARDO MIZIARA BARBOZA FERREIRA**  
Data: 04/02/2025 12:33:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Leonardo Miziara Barboza Ferreira  
UNESP - Faculdade de Ciências Farmacêuticas - Campus de Araraquara



Documento assinado digitalmente  
**ARIELA VELOSO DE PAULA**  
Data: 05/02/2025 15:29:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profa. Dra. Ariela Veloso de Paula  
UNESP - Faculdade de Ciências Farmacêuticas - Campus de Araraquara



Documento assinado digitalmente  
**BIANCA GONZALEZ MARTINS**  
Data: 04/02/2025 14:22:31-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profa. Dra. Bianca Gonzalez Martins  
UNESP - Faculdade de Ciências Farmacêuticas - Campus de Araraquara

Dedico este trabalho à minha querida avó, que sempre sonhou em ver um neto atuando como profissional da saúde. Onde quer que esteja, espero que se orgulhe e sinta que seu sonho vive em mim. Saudades eternas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço profundamente a minha mãe e ao meu pai, que estiveram ao meu lado em todos os momentos desta jornada, o apoio incondicional, amor e incentivo deles, foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui, sou eternamente grato por terem estado comigo em cada etapa.

Agradeço também ao professor Leonardo, que me acolheu em um momento crucial e ofereceu a orientação necessária para que este projeto pudesse ser concluído. Sua ajuda foi essencial para que eu encontrasse o caminho e alcançasse os objetivos traçados.

## RESUMO

A produção de cerveja é um dos processos alimentares mais antigos conhecidos pela humanidade. Hoje, a indústria cervejeira é um dos principais setores da economia global e a cerveja é a terceira bebida mais consumida no mundo. Compreender os fatores que modulam as etapas de produção dessa bebida, é potencialmente vantajoso, tornando o processo produtivo mais competitivo, o produto mais acessível e com menor desperdício, trazendo benefícios significativos tanto para o processo quanto para o produto final. Este trabalho aborda o processo de produção de cerveja, destacando as etapas fundamentais que precedem a fermentação e a influência de variáveis críticas na qualidade final da bebida. O objetivo é compreender como fatores como temperatura, pH, utilização de microorganismos, composição dos ingredientes e fatores enzimáticos regulam as etapas de maltagem, mosturação e de fervura do mosto, assegurando a eficiência das transformações necessárias e a preparação ideal para a fermentação. A pesquisa demonstra a importância da modulação das etapas anteriores aos processos fermentativos da produção de cerveja, mostrando que elas desempenham um papel fundamental não só na regulação e modulação do processo, mas também no desenvolvimento de aromas, sabores e propriedades funcionais que contribuem para a qualidade e variedade dos estilos de cerveja. Em cada etapa da produção, desde a malteação até a fermentação, esses fatores influenciam a transformação de compostos, impactando diretamente no perfil sensorial e funcional da bebida. A metodologia adotada foi a revisão da literatura científica sobre o uso de enzimas em processos cervejeiros, baseada na consulta a diversas bases de dados, principalmente online. Conclui-se que o controle das variáveis nas etapas que antecedem a fermentação é essencial para a produção de cervejas com alta qualidade e diversidade sensorial. Além disso, o ajuste preciso de fatores como temperatura, pH e composição dos ingredientes não apenas otimiza os processos químicos necessários, mas também contribui para a criação de estilos únicos, atendendo às demandas de um mercado cada vez mais exigente e diversificado.

**Palavras-chave:** produção de cerveja; enzimas; processos fermentativos; perfil sensorial; propriedades funcionais; levedura cervejeira.



## ABSTRACT

Beer production is one of the oldest food processes known to humanity. Today, the brewing industry is one of the main sectors of the global economy, and beer is the third most consumed beverage in the world. Understanding the factors that modulate the production stages of this beverage is potentially advantageous, making the production process more competitive, the product more affordable, and minimizing waste, bringing significant benefits to both the process and the final product. This work addresses the beer production process, highlighting the fundamental stages preceding fermentation and the influence of critical variables on the final quality of the beverage. The objective is to understand how factors such as temperature, pH, microorganism use, ingredient composition, and enzymatic factors regulate the stages of malting, mashing, and wort boiling, ensuring the efficiency of the necessary transformations and optimal preparation for fermentation.

The research demonstrates the importance of modulating the stages prior to the fermentation processes in beer production, showing that they play a fundamental role not only in the regulation and modulation of the process but also in the development of aromas, flavors, and functional properties that contribute to the quality and variety of beer styles. At each stage of production, from malting to fermentation, these factors influence the transformation of compounds, directly impacting the sensory and functional profile of the beverage. The methodology adopted was a review of scientific literature on the use of enzymes in brewing processes, based on consultations from various databases, primarily online. It is concluded that controlling the variables in the stages preceding fermentation is essential for the production of high-quality beers with diverse sensory profiles. Moreover, the precise adjustment of factors such as temperature, pH, and ingredient composition not only optimizes the necessary chemical processes but also contributes to the creation of unique styles, meeting the demands of an increasingly demanding and diversified market.

**Keywords:** beer production; enzymes; fermentation processes; sensory profile; functional properties; brewing yeast.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição da cerveja

16

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Modulação da atividade enzimática                                                                                  | 19 |
| Figura 1 - Etapas do processo de produção de cerveja                                                                          | 23 |
| Quadro 2 - Artigos levantados nas bases de dados sobre características sensoriais.                                            | 48 |
| Quadro 3 - Artigos levantados nas bases de dados sobre características funcionais.                                            | 55 |
| Gráfico 1 - Quantidade de publicações relacionadas a fatores de modulação de características sensoriais durante a fermentação | 59 |
| Gráfico 2 - Quantidade de publicações relacionadas a fatores de modulação de características funcionais durante a fermentação | 60 |
| Gráfico 3 - Quantidade de publicações relacionadas influência do pH na fermentação                                            | 62 |
| Gráfico 4 - Quantidade de publicações relacionadas à influência da composição do mosto na fermentação.                        | 63 |
| Gráfico 5 - Quantidade de publicações relacionadas à influência da faixa de temperatura na fermentação.                       | 64 |
| Gráfico 6 - Quantidade de publicações relacionadas à influência na utilização de microorganismos na fermentação.              | 65 |

## SUMÁRIO

|                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                  | <b>14</b> |
| <b>2 DESENVOLVIMENTO.....</b>                                                                             | <b>16</b> |
| 2.1 Fundamentação teórica.....                                                                            | 16        |
| 2.1.1 Origem, composição e propriedades da cerveja.....                                                   | 16        |
| 2.1.2 Fundamentos das enzimas na produção de cerveja.....                                                 | 18        |
| 2.1.3 Fatores que afetam a produção de enzimas através de diferentes cepas de levedura.....               | 20        |
| 2.2 Influência das etapas da produção de cerveja nos processos fermentativos e a relação das enzimas..... | 22        |
| 2.2.1 Etapa de malteação.....                                                                             | 23        |
| 2.2.2 Etapa de mosturação.....                                                                            | 24        |
| 2.2.3 Fervura do mosto.....                                                                               | 26        |
| 2.3 Processos fermentativos e a influência da enzimas.....                                                | 27        |
| 2.3.1 Fases dos processos fermentativos.....                                                              | 28        |
| 2.3.2 Tipos de fermentação.....                                                                           | 29        |
| 2.3.3 Reações enzimáticas.....                                                                            | 29        |
| 2.4 Características sensoriais da cerveja.....                                                            | 31        |
| 2.4.1 Sabor Doce.....                                                                                     | 31        |
| 2.4.2 Sabor Amargo.....                                                                                   | 32        |
| 2.4.3 Sabor Ácido.....                                                                                    | 33        |
| 2.4.4 Sabor Umami.....                                                                                    | 34        |
| 2.4.5 Aroma dos Ésteres e Álcoois superiores.....                                                         | 34        |
| 2.4.6 Aroma dos Terpenos.....                                                                             | 35        |
| 2.4.7 Aroma das Lactonas e Furanonas e Tióis Polifuncionais.....                                          | 36        |
| 2.4.8 Textura.....                                                                                        | 37        |
| 2.4.9 Espuma.....                                                                                         | 38        |
| 2.4.10 Coloração.....                                                                                     | 38        |
| 2.5 Características funcionais da cerveja.....                                                            | 39        |
| 2.5.1 Principais vitaminas.....                                                                           | 39        |
| 2.5.3 Resveratrol.....                                                                                    | 40        |
| 2.5.4 Flavonóides.....                                                                                    | 40        |
| 2.5.5 Ácidos Fenólicos.....                                                                               | 42        |
| 2.5.6 Ácidos Amargos.....                                                                                 | 43        |
| <b>3 METODOLOGIA.....</b>                                                                                 | <b>46</b> |
| <b>4 RESULTADOS.....</b>                                                                                  | <b>48</b> |
| 4.1 Características Sensoriais.....                                                                       | 48        |
| 4.2 Características Funcionais.....                                                                       | 56        |
| <b>5 DISCUSSÃO.....</b>                                                                                   | <b>59</b> |
| 5.1 Influência dos moduladores dos processos fermentativos.....                                           | 61        |

|                                              |           |
|----------------------------------------------|-----------|
| 5.1.1 Influência enzimática.....             | 61        |
| 5.1.2 Influência do pH.....                  | 62        |
| 5.1.3 Influência da composição do mosto..... | 63        |
| 5.1.4 Influência da Temperatura.....         | 64        |
| 5.1.5 Influência de microorganismos.....     | 65        |
| <b>6 CONCLUSÃO.....</b>                      | <b>67</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                      | <b>69</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a cerveja lidera o consumo de bebidas alcoólicas, com o país se destacando como um dos maiores produtores no mundo, ficando atrás apenas da China e dos Estados Unidos. Atualmente, o Brasil produz mais de 435 mil toneladas de cerveja por ano, com ênfase na região Sul, principalmente no Paraná, responsável por mais de 70% da produção nacional, conforme dados do Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja.

A definição da cerveja, conforme a Instrução Normativa nº 65 de 10 de dezembro de 2019, a descreve como uma bebida proveniente da fermentação do mosto de cevada malteada ou de extrato de malte, com a adição de levedura cervejeira e submetida a um processo de cocção com lúpulo ou extrato de lúpulo. Neste processo, parte da cevada malteada ou do extrato de malte pode ser parcialmente substituída por adjunto cervejeiro (Brasil, 2019).

A produção de cerveja requer o uso de enzimas. As enzimas presentes na cevada maltada desempenham um papel fundamental na quebra de lipídios, proteínas, amido e paredes celulares do endosperma durante a etapa de maceração (Larroque et al., 2020).

Historicamente, a cevada maltada tem sido a principal fonte dessas enzimas para a fermentação cervejeira. No entanto, é comum que os cervejeiros tenham que lidar com maltes de qualidade inferior, o que pode trazer desafios como baixo rendimento de extrato, problemas na separação do mosto, fermentação lenta ou incompleta, filtração complicada e resultar em uma cerveja de qualidade inferior em termos de sabor e estabilidade (Zhang, 2023).

Uma maneira de reduzir custos e aumentar a produção em larga escala é por meio da utilização de adjuntos. Estes são carboidratos empregados como fonte extra de substrato durante a fermentação. Alguns exemplos comuns de adjuntos na indústria cervejeira incluem cevada não maltada, trigo, milho, sorgo, arroz, açúcares e xaropes (Larroque et al., 2020).

Uma outra estratégia para melhorar o desempenho e eficiência da cervejaria é complementar as enzimas naturais do malte com enzimas exógenas. Essas enzimas adicionais não só compensam deficiências do malte, mas também podem fornecer atividades enzimáticas complementares que não estão presentes de forma significativa na cevada maltada (Shopska, 2019).

A cerveja, apreciada por sua complexa gama de sabores e aromas, é fruto de um processo bioquímico intrincado, a produção de componentes chaves que promovem características únicas a ela. compreender e controlar esses aspectos é essencial para otimizar o processo cervejeiro, assegurando que a bebida resultante apresente as características sensoriais e funcionais desejadas e atender às demandas de um mercado cada vez mais exigente e ávido por inovações.

Assim sendo, a presente pesquisa tem o objetivo de investigar como as etapas antes e durante o processo de fermentação na produção de cerveja estão relacionadas às suas características funcionais e sensoriais. Além disso, busca-se compreender como fatores como enzimas, temperatura, pH, composição do mosto e a utilização de diferentes tipos de microorganismos podem influenciar essas etapas, ampliando o entendimento sobre um produto tão consolidado e que existe há tanto tempo na história da humanidade, a fim de buscar um produto diversificado.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 Fundamentação teórica**

#### **2.1.1 Origem, composição e propriedades da cerveja**

A cerveja é tão antiga quanto a civilização. As origens da cerveja perderam-se algures nas brumas do tempo, mas, como uma das bebidas mais antigas do mundo, desempenhou um papel importante em muitas das principais culturas do passado. Há muito que se sabe que o Médio Oriente e o Egito foram o berço da cerveja e que esta pode ter um importante papel e contributo para a dieta alimentar (Buiatti, 2009).

Antigamente a produção de cerveja estava estritamente relacionada com a cozedura do pão, uma vez que ambos eram feitos com cereais, água e fermento. Durante 6.000 a.C., nas antigas cidades da Mesopotâmia (a área hoje coberta pelo Iraque), a fabricação de cerveja era bem conhecida. Embora a grande civilização primitiva do Oriente Médio tenha desenvolvido a fabricação de cerveja como uma arte, ninguém entendia como funcionava o processo de fermentação. Essas cervejas deviam ser muito diferentes daquelas que usamos hoje; provavelmente eram mais espessos, mais doces, com menos álcool e mais proteínas (Shopska, 2019).

Fatores socioculturais também influenciaram as demandas e preferências por cerveja ao longo dos séculos. Hoje em dia, a popularidade das cervejas artesanais e especiais, juntamente com uma sociedade mais preocupada com a saúde, definiram novas tendências no setor cervejeiro. Novos sabores e variedades, mas também cervejas de baixas calorias e sem álcool são os principais impulsionadores para a diversificação de produtos (Basso; Alcarde; Portugal, 2016). Nesse contexto, destaca-se a preocupação com o consumo responsável de álcool. A dose padrão de álcool corresponde a 14g de álcool puro, o que equivale a aproximadamente 350 mL de cerveja (5% de álcool) (Kerr, W. C.; Stockwell, T., 2011). A partir disso, o uso de leveduras não domesticadas *S. cerevisiae* e não *Saccharomyces* tem sido utilizado como estratégia cervejeira para criar novos protótipos de cerveja, que atendem esses critérios diversificados e saudáveis (Miguel et al., 2022).



A cerveja compreende centenas de compostos diferentes. Alguns deles são derivados de matérias-primas e passam inalterados pelo processo de fermentação, outros são produzidos durante o processo. As fontes de matérias-primas de produtos químicos na cerveja são água, maltes (e seus adjuntos), lúpulo e levedura (Buiatti, 2009).

Os principais constituintes de uma cerveja são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 – Composição da cerveja

| Substâncias             | Concentração   | Número de compostos | Fonte ou agente         |
|-------------------------|----------------|---------------------|-------------------------|
| Água                    | 90–94%         | 1                   | -                       |
| Etanol                  | 3–5% v/v       | 1                   | Levedura, malte         |
| Carboidratos            | 1–6% p/v       | 1                   | Malte                   |
| Dióxido de carbono      | 3,5–4,5 g/l    | 1                   | Levedura, malte         |
| Sais inorgânicos        | 500–4.000 mg/l | ~ 25                | Água, malte             |
| Nitrogênio total        | 300–1.000 mg/l | ~ 100               | Levedura, malte         |
| Ácidos orgânicos        | 50–250 mg/l    | ~ 200               | Levedura, malte         |
| Álcoois superiores      | 100–300 mg/l   | 80                  | Levedura, malte         |
| Aldeídos                | 30–40 mg/l     | ~ 50                | Levedura, lúpulo        |
| Ésteres                 | 25–40 mg/l     | ~ 150               | Levedura, malte, lúpulo |
| Compostos de enxofre    | 1–10 mg/l      | ~ 40                | Levedura, malte, lúpulo |
| Derivados de lúpulo     | 20–60 mg/l     | > 100               | Lúpulo                  |
| Compostos de vitamina B | 5,0–10 mg/l    | 13                  | Levedura, malte         |

**Fonte:** Modificado de Buiatti (2009).

A água é quantitativamente o principal ingrediente das cervejas: constitui mais de 90% e muitas vezes até mais de 94% do produto final. Não é de surpreender que sua composição seja muito importante e de grande preocupação para o cervejeiro. Qualquer água que vai acabar contida na garrafa de cerveja deve ser da mais alta qualidade química e microbiológica (Bamforth, 2009). A água deve cumprir todos os requisitos legais, tanto químicos como microbiologicamente, bem como satisfazer os padrões do fabricante de cerveja em termos de clareza, sabor, cheiro e falta de cor. As cervejarias precisam de grande quantidade de água; para cada litro de cerveja produzido, são necessários pelo menos mais cinco para limpeza, resfriamento e aquecimento (Buiatti, 2009).

O malte é a cevada germinada e seca e é o componente mineral de mais de 90% da cerveja produzida no mundo. O malte de cevada e seus adjuntos são fontes de diversos constituintes presentes na cerveja como, compostos nitrogenados, lipídios, carboidratos e vitaminas. As substâncias diferentes do malte de cevada que fornecem carboidratos fermentáveis além daqueles do malte são conhecidas como adjuvantes (Bamforth, 2009).

De acordo com Buiatti (2009), os adjuntos são usados para substituir o malte não apenas por razões econômicas, sendo geralmente mais baratos que o malte de cevada, mas também para modificar o sabor. Assim, as cervejas resultantes podem ter um sabor mais leve e um impacto menos saciante (especialmente quando açúcares, como adjuntos, foram adicionados) ou um sabor aumentado dependendo do adjuvante (por exemplo, cevada crua torrada) adicionado ao malte de cevada. Esses adjuntos são principalmente cereais como milho (milho), arroz, trigo, centeio, sorgo usados como fontes de amido. Também açúcar invertido (açúcar hidrolisado de cana ou beterraba), xaropes de glicose (derivados de amido de milho) ou outros xaropes de cereais são adjuvantes. O amido proveniente dos cereais, uma vez gelatinizado, é hidrolisado pelas enzimas do malte da mesma forma que o amido do malte. Esses adjuntos podem ser usados como grãos, flocos ou produtos torrados (Buiatti, 2009).

Outra composição fundamental da cerveja é o *Humulus lupulus*, lúpulo, ingrediente fundamental da cerveja usado na fabricação de cerveja há mais de 1000 anos, e a principal razão para usar lúpulo é proporcionar amargor e sabores característicos de lúpulo à cerveja (Young; Oakley; Fox, 2023). Também, proporciona alguma proteção contra a deterioração bacteriana e são fundamentais para uma boa formação de espuma. Além disso, o lúpulo pode conter de 0,5% a 3,0% de óleos essenciais e grande parte do sabor de uma cerveja depende dos compostos aromáticos adicionados pelo lúpulo (Bamforth, 2009).

Para mais, as propriedades da cerveja dependem muito da levedura utilizada. Produz não só etanol e dióxido de carbono, mas também outros compostos (álcoois superiores, ácidos orgânicos, ésteres, aldeídos, cetonas, compostos de enxofre) que desempenham um papel fundamental no perfil sensorial da cerveja (Rosa; Afonso, 2015).

### 2.1.2 Fundamentos das enzimas na produção de cerveja

A produção de cerveja é um processo bioquímico complexo que depende de diversas enzimas para converter o mosto em uma bebida saborosa e refrescante. A atividade enzimática é crucial para determinar o sabor, aroma, corpo e outras características da cerveja (Larroque *et al.*, 2020).

A modulação da atividade enzimática, de acordo com as condições de produção e ingredientes utilizados, pode ser vista no Quadro 1.

Quadro 1 - Modulação da atividade enzimática

| Condições de produção                                                                                                                                                        | Ingredientes                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Temperatura:</b> A temperatura ideal para cada enzima varia. Temperaturas mais altas aumentam a atividade enzimática, mas podem levar à formação de sabores indesejáveis. | <b>Tipo de malte:</b> O tipo de malte utilizado influencia a quantidade e o tipo de enzimas presentes no mosto.              |
| <b>pH:</b> O pH ideal para cada enzima também varia. O pH do mosto pode ser ajustado com ácido ou álcali.                                                                    | <b>Adjuntos:</b> Adjuntos como enzimas exógenas e sais minerais podem ser adicionados para modificar a atividade enzimática. |
| <b>Tempo:</b> A duração da etapa de <i>mashing</i> determina a quantidade de açúcares fermentáveis produzidos.                                                               |                                                                                                                              |

Fonte: Gomes (2023).

Como exemplos de modulação da atividade enzimática, tem-se: aumento da temperatura (aumentar a temperatura de *mashing* para aumentar a produção de açúcares fermentáveis e obter uma cerveja mais alcoólica); adição de  $\beta$ -glucanase (melhorar a viscosidade e filtração do mosto, especialmente com maltes ricos em  $\beta$ -glucanos); utilização de maltes com alto teor de proteínas (produzir cervejas com mais corpo e sabor) (Shopska, 2019).

Dessa maneira, para a obtenção de resultados consistentes é necessário ter um controle rigoroso das condições de produção através de monitoramento e ajuste da temperatura, pH e tempo de mosturação. Também, precisa-se ter uma seleção cuidadosa dos ingredientes, como a utilização de maltes de alta qualidade e adjuntos específicos para o estilo de cerveja desejado. Além de análise laboratorial, com realização de testes para verificar a atividade enzimática e garantir a qualidade da cerveja (Rosa; Afonso, 2015).

A regulação das enzimas é crucial para a produção de cervejas com características consistentes e desejáveis. O cervejeiro pode modular a atividade enzimática através do controle das condições de produção e da seleção dos ingredientes. A compreensão da bioquímica da produção de cerveja e da regulação enzimática permite ao cervejeiro criar cervejas com sabores e aromas únicos (Gomes, 2023).

### 2.1.3 Fatores que afetam a produção de enzimas através de diferentes cepas de levedura

As cepas de levedura cervejeira podem tradicionalmente ser divididas em dois grupos: cepas superiores usadas para a produção de tipos de cerveja como *Saccharomyces cerevisiae* (levedura ale) e cepas inferiores agora conhecidas como *Saccharomyces pastorianus* (levedura lager) utilizado para a produção de cervejas. Originalmente, essas cepas foram classificadas com base em suas propriedades de floculação. Para a cerveja, em termos de sabor, a fermentação é uma etapa crucial. Para cada tipo de cerveja, é utilizada uma cepa de levedura cervejeira correspondente e o sabor final da cerveja é finalizado durante a maturação (Karabín *et al.*, 2018).

Sabe-se que diferentes categorias de cerveja dependem do uso de cepas específicas de ale ou lager, onde a levedura imprime à cerveja seu perfil fermentativo distinto. Apesar disso, não há estudos que relatem quão diversas, ricas e homogêneas são as categorias de cerveja em termos de cepas de levedura cervejeira comercialmente disponíveis. Sendo assim, Bonatto (2021) apresentou em seu artigo a avaliação da diversidade, riqueza e uniformidade de diferentes categorias de cerveja e cepas de leveduras comerciais disponíveis para fabricação de cerveja através da aplicação de conceitos quantitativos de análise de diversidade em uma amostra de 119.189 receitas de cerveja. Os resultados indicaram que muitas categorias de cerveja são preferencialmente fermentadas com formulações de levedura seca em vez de leveduras líquidas, apesar do elevado número de formulações de levedura líquida disponíveis (Bonatto, 2021). Dessa maneira, o uso preferencial de formulações específicas de leveduras impulsiona a diversidade fermentativa de uma categoria de cerveja, mostrando que muitas cepas de levedura são potencial e industrialmente subexploradas.

A jornada das enzimas na produção de cerveja se inicia na mosturação, etapa em que os grãos de malte são misturados à água quente. As enzimas amilases, secretadas pela levedura e presentes no malte, rompem as cadeias de amido presentes nos grãos, liberando açúcares fermentáveis como a glicose, maltose e maltotriose. Essa conversão é crucial para a próxima etapa: a fermentação (Rosa; Afonso, 2015).

Na fermentação, as enzimas glicose oxidase e piruvato descarboxilase, presentes na levedura, convertem os açúcares fermentáveis em álcool e CO<sub>2</sub>. As enzimas proteases fragmentam as proteínas do mosto, influenciando a turbidez, o sabor e a formação da espuma da cerveja. As enzimas lipolíticas liberam ácidos graxos, impactando o aroma e o sabor da bebida (Gomes, 2023).

A produção de enzimas pelas leveduras é influenciada por diversos fatores, como:

- **Cepa da levedura:** Cada cepa possui um perfil enzimático único, influenciando o sabor, a textura e a fermentação da cerveja. Cepas como a *Saccharomyces cerevisiae ale* e *lager* apresentam diferenças na produção de enzimas, impactando o perfil final da bebida (Lima, 2017). A cepa de levedura utilizada na produção de cerveja influencia diretamente a produção de enzimas. Cada cepa possui um perfil genético único, que determina quais enzimas serão expressas e em quais quantidades (Young; Oakley; Fox, 2023).
- **Temperatura:** A temperatura ideal para a produção de enzimas varia entre 20°C e 25°C. Temperaturas fora deste intervalo podem reduzir a atividade enzimática, impactando a fermentação e o sabor da cerveja (Gomes, 2023).
- **pH:** Cada enzima possui um pH ideal para sua atuação, e o pH ideal para a maioria das enzimas cervejeiras está entre 4,5 e 5,5. Alterações no pH podem afetar a atividade enzimática e, consequentemente, a qualidade da cerveja (Motta, 2023).
- **Adição de enzimas exógenas:** Enzimas comerciais podem ser adicionadas ao mosto cervejeiro para suplementar a produção natural de enzimas pelas leveduras. Essa prática pode ser útil para otimizar o processo e obter características específicas na cerveja (Lima, 2017).

- **Interação com outros microrganismos:** A presença de outros microrganismos, como bactérias, pode influenciar a produção de enzimas pelas leveduras através de mecanismos de competição ou cooperação (Gomes, 2023).
- **Nutrientes:** A disponibilidade de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, é essencial para a produção de enzimas pelas leveduras. A deficiência de nutrientes pode limitar a atividade enzimática e comprometer a fermentação (Young, Oakley, Fox, 2023).

Exemplos de cepas de levedura e suas enzimas (Rosa, Afonso, 2015):

- *Saccharomyces cerevisiae*: A cepa mais utilizada na produção de cerveja. Produz alta atividade de amilase, maltase e zimase, resultando em cervejas com alto teor alcoólico e boa fermentação.
- *Saccharomyces pastorianus*: Produz alta atividade de  $\beta$ -glucanase, quebrando  $\beta$ -glucanos presentes no mosto e melhorando a filtração da cerveja.
- *Brettanomyces bruxellensis*: Produz enzimas que geram aromas e sabores frutados e condimentados, como ésteres e fenóis.

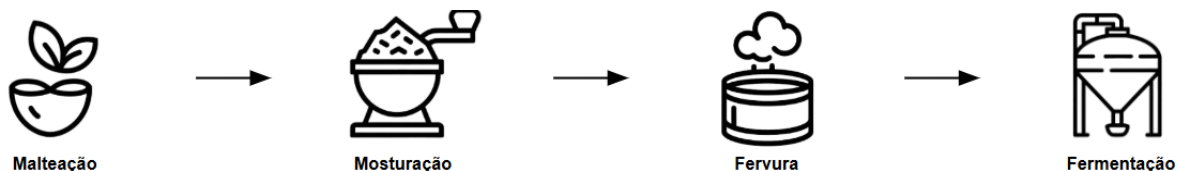
A escolha da cepa de levedura e o controle dos fatores que afetam a produção de enzimas são cruciais para a obtenção de cervejas de alta qualidade e com características desejadas (Lima, 2017).

## **2.2 Influência das etapas da produção de cerveja nos processos fermentativos e a relação das enzimas**

Durante a malteação, enzimas como amilases e proteases são ativadas, promovendo a conversão de amido em açúcares fermentáveis e a liberação de aminoácidos essenciais para a fermentação. Na mosturação, a temperatura e o pH otimizam a ação de amilases, proteases e glucanases, garantindo a formação de um mosto adequado. Já na fervura, ocorrem reações que inativam enzimas residuais, estabilizam o mosto e promovem a isomerização de  $\alpha$ -ácidos do lúpulo, contribuindo para o amargor e o perfil sensorial. Cada etapa prepara o substrato e

as condições ideais para a atuação das leveduras, influenciando o perfil final da cerveja em termos de aroma, sabor e propriedades funcionais. (Parker, 2010)

Figura 1 - Etapas do processo de produção de cerveja



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

### 2.2.1 Etapa de malteação

A malteação é uma das etapas fundamentais na produção de cerveja, responsável pela transformação de grãos, geralmente cevada, em malte, que servirá como fonte de açúcares fermentáveis para a levedura durante o processo de fermentação. Essa etapa envolve três fases principais: embebição, germinação e secagem, cada uma desempenhando papéis específicos na modificação bioquímica do grão. (Humia *et al.*, 2019)

- **Maceração:** Na fase de maceração, os grãos de cevada são mergulhados em água por um período de 24 a 48 horas. Esse processo tem como objetivo hidratar o grão, elevando seu teor de umidade para aproximadamente 45%. A água ativa as enzimas presentes e promove o início da germinação. A embebição é crucial, pois uniformiza a umidade dos grãos, garantindo uma modificação homogênea durante as etapas seguintes (Pimenta *et al.* 2020).
- **Germinação:** Após a maceração, os grãos são espalhados em camadas finas e mantidos sob condições controladas de temperatura e umidade para iniciar a germinação, que dura de 3 a 4 dias. Durante esse período, ocorrem transformações enzimáticas que quebram as paredes celulares e os carboidratos complexos, como o amido, em açúcares menores e mais fermentáveis. Enzimas como a amilase e protease são produzidas, resultando em um grão com composição ideal para a produção de cerveja. Além disso, a germinação modifica a

estrutura proteica do grão, aumentando a disponibilidade de aminoácidos que serão utilizados pelas leveduras na fermentação (Evans *et al.*, 2022 ; Miano *et al.*, 2017).

- Secagem (kilning): Concluída a germinação, os grãos germinados, agora chamados de "malte verde", passam pela secagem (ou kilning), cujo objetivo é interromper a germinação e estabilizar o produto. Esse processo envolve a aplicação de calor crescente para reduzir o teor de umidade para aproximadamente 4%. A temperatura e a duração da secagem variam de acordo com o tipo de malte desejado. Durante a secagem, ocorrem reações de Maillard e caramelização que conferem cor e sabores característicos ao malte, variando desde notas mais suaves e adocicadas até sabores tostados e amargos, dependendo da intensidade do processo. (Kalb *et al.*, 2021).

A malteação determina diretamente a composição de açúcares, aminoácidos e compostos fenólicos no grão, o que influencia o perfil sensorial final da cerveja, como o corpo, a cor e os aromas. Além disso, a qualidade da cevada e dos outros cereais, afetam o rendimento e a eficiência do processo de maceração, a etapa subsequente à malteação. Por isso, a seleção adequada dos grãos e o controle rigoroso das condições de cada etapa são essenciais para obter um malte de alta qualidade e, conseqüentemente, uma cerveja com características desejadas (Humia *et al.*, 2019).

Assim, a malteação não apenas prepara o grão para a fermentação, mas também define a base de compostos que serão transformados durante a produção, tornando-se um dos pilares na criação de diferentes estilos e perfis de cerveja.

### 2.2.2 Etapa de mosturação

A mosturação é uma etapa essencial no processo de produção de cerveja, onde ocorre a conversão dos componentes presentes no malte em açúcares fermentáveis, além de outros compostos que irão contribuir para o perfil sensorial da bebida. Essa fase consiste em misturar o malte moído (conhecido como "malte moído" ou "grist") com água quente, formando uma mistura chamada de "mosto".



Durante a mosturação, o controle de temperatura, tempo e pH é fundamental para otimizar as reações enzimáticas que ocorrem nesse processo.

O principal objetivo da mosturação é a extração e conversão dos carboidratos, proteínas e outros componentes do malte em substâncias solúveis. Isso inclui a quebra de amidos complexos em açúcares simples (glicose e maltose) que serão posteriormente fermentados pelas leveduras para a produção de álcool e CO<sub>2</sub>. Além disso, essa etapa promove a extração de compostos nitrogenados, que servem como nutrientes para as leveduras, e a liberação de polifenóis e proteínas que influenciam a formação da espuma e a estabilidade da cerveja (Pimenta *et al.*, 2020).

A eficiência da mosturação depende da ativação e atuação de diferentes enzimas, presentes no malte, que são sensíveis às variações de temperatura e pH. As principais enzimas envolvidas são:

- Amilases ( $\alpha$ -amilase e  $\beta$ -amilase): responsáveis pela conversão do amido em açúcares fermentáveis. A  $\beta$ -amilase atua primeiro, quebrando cadeias de amido em moléculas de maltose, enquanto a  $\alpha$ -amilase realiza uma quebra mais ampla, gerando dextrinas e açúcares menores. O ponto ótimo de temperatura para a  $\alpha$ -amilase é em torno de 73,89°C, enquanto a  $\beta$ -amilase é mais ativa a 60-75°C. (Hinojosa-Avila *et al.*, 2024)
- Proteases: atuam na degradação de proteínas complexas em peptídeos menores e aminoácidos. Essas enzimas têm papel crucial no desenvolvimento de características sensoriais e na formação de uma espuma estável. Elas são mais ativas em temperaturas de 45-50°C. (Schwarz; Boitz; Methner, 2012)
- Xilanases e Glucanases: quebram a parede celular do grão e reduzem a viscosidade do mosto, facilitando a filtração. Essas enzimas atuam em faixas de temperatura mais baixas, geralmente abaixo de 30°C a 40°C. (Evans *et al.*, 2021)

Existem diversos métodos de mosturação que diferem quanto à forma de aquecimento e ao controle das variáveis do processo. Os dois mais comuns são:

- Infusão Simples: utilizado principalmente para maltes altamente modificados. Consiste em manter a temperatura do mosto estável em

um único valor (geralmente entre 65-68°C) até que todas as conversões desejadas tenham ocorrido. É um método mais simples, amplamente utilizado na produção de cervejas como ales. (Evans et al., 2021)

- Decocção: envolve a remoção de parte do mosto para fervura e, posteriormente, a reintegração desse mosto fervido na mistura principal, aumentando gradualmente a temperatura. Esse método promove maior extração de compostos e intensifica sabores maltados, sendo tradicionalmente utilizado em cervejas como lagers alemãs. (Mikyška, A.; Jurková, M., 2015)

A temperatura e o pH são variáveis críticas na mosturação. Alterações no perfil térmico podem ativar ou desativar determinadas enzimas, modificando a composição final do mosto. O pH ideal para a mosturação é levemente ácido, em torno de 5,2-5,6, garantindo a estabilidade enzimática e a extração eficiente de açúcares. Um pH inadequado pode resultar em extração de taninos indesejados e um perfil de sabor amargo. (Hornink; Murphy, 2023)

O perfil final de açúcares obtido na mosturação afeta diretamente o corpo, a doçura residual e o teor alcoólico da cerveja. A relação entre açúcares fermentáveis e não fermentáveis, determinada pelas condições de mosturação, é o que define o balanço entre a secura e a doçura do produto final. Além disso, a extração de proteínas e polissacarídeos influenciará a formação de corpo e a retenção de espuma, características sensoriais importantes para a qualidade da cerveja. (Pimenta *et al.*, 2020).

Assim, a etapa de mosturação é uma fase crítica na produção de cerveja, pois define grande parte do perfil químico e sensorial do mosto que, após a fermentação, será convertido em cerveja. O conhecimento aprofundado das variáveis envolvidas permite ao cervejeiro ajustar o processo para obter diferentes estilos e características na bebida final.

### 2.2.3 Fervura do mosto

A fervura é uma das etapas mais importantes na produção de cerveja, pois desempenha um papel fundamental na composição química e no perfil sensorial da

bebida. Durante essa etapa, o mosto é fervido por aproximadamente 60 a 90 minutos, a uma temperatura de cerca de 93 a 100°C (Shellhammer; Bamforth 2008).

A fervura ao esterilizar o mosto, proporciona estabilidade microbiológica, garantindo que apenas a cepa de levedura desejada esteja presente durante a fermentação. Essa etapa também auxilia na precipitação de complexos de proteína-polifenol que podem causar turvação posteriormente no processo de produção da cerveja. Ao remover esses compostos, o processo de fervura contribui para a clareza e estabilidade geral da cerveja. (Parker, 2010)

A adição de lúpulo ocorre geralmente durante a fervura e pode ser feita em diferentes momentos, influenciando diretamente o perfil de amargor e aroma da cerveja. Quando o lúpulo é adicionado no início da fervura, há maior isomerização dos  $\alpha$ -ácidos, resultando em um amargor mais pronunciado (Parker, 2010). Já a adição tardia, perto do fim da fervura, preserva mais os compostos aromáticos voláteis (Hinojosa-Avila *et al.*, 2023).

### **2.3 Processos fermentativos e a influência da enzimas**

A fermentação é uma das etapas mais importantes na produção de cerveja, sendo responsável pela conversão dos açúcares presentes no mosto em etanol e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), além da formação de compostos secundários que influenciam diretamente o perfil sensorial da bebida. Esse processo inicia-se após adição de leveduras, organismos unicelulares habitualmente do gênero *Saccharomyces*, ao mosto recém pasteurizado pela etapa de fervura. Elas irão metabolizar os açúcares e produzem uma variedade de metabólitos que conferem à cerveja aromas, sabores e características únicas. O controle das condições de fermentação, como temperatura, pH e concentração de leveduras, é essencial para garantir a qualidade e a consistência do produto final. (Callejo; Gonzalez; Morata, 2017)

Além da produção de álcool, a fermentação também promove a formação de uma série de compostos secundários, como álcoois superiores, ésteres, aldeídos, ácidos orgânicos e fenóis, que contribuem para o sabor, o aroma e o corpo da cerveja. Esses compostos são responsáveis por características sensoriais específicas, como notas frutadas, fenólicas ou alcoólicas, e podem variar de acordo

com a cepa de levedura utilizada e as condições de fermentação. (Callejo; Gonzalez; Morata *et al.*, 2017)

### 2.3.1 Fases dos processos fermentativos

O processo de fermentação é geralmente dividido em três fases principais: a fase lag, a fase de crescimento exponencial e a fase estacionária:

- Fase Lag (Adaptação): Na fase lag, as leveduras recém-inoculadas no mosto se adaptam ao meio, ativando seus mecanismos metabólicos e iniciando a assimilação de nutrientes. Durante esse período, não ocorre produção significativa de etanol. A fase lag é crucial para a saúde da levedura, pois uma adaptação inadequada pode resultar em fermentações lentas ou incompletas. (Pimenta *et al.*, 2020)
- Fase de Crescimento Exponencial (Atividade Fermentativa Intensa): Após a adaptação, as leveduras entram na fase de crescimento exponencial, também chamada de fase fermentativa principal, onde ocorre a rápida metabolização dos açúcares e produção de etanol e CO<sub>2</sub>. Durante essa fase, há intensa atividade enzimática, levando à formação de produtos secundários como ésteres e álcoois superiores. A temperatura é um fator determinante nesta etapa, pois afeta a taxa de crescimento e o perfil de compostos voláteis gerados. (Basso; Alcarde; Portugal, 2016 ; Pimenta *et al.*, 2020)
- Fase Estacionária: (Fermentação Secundária ou Maturação) Na fase estacionária, a taxa de crescimento das leveduras diminui e a atividade metabólica se estabiliza. Nesse ponto, a maioria dos açúcares fermentáveis já foi convertida e a produção de etanol é reduzida. Durante essa fase, ocorre a maturação da cerveja, onde os compostos indesejáveis, como diacetil (que confere aroma de manteiga), são reabsorvidos e transformados em produtos mais neutros. A duração dessa fase varia conforme o estilo da cerveja e pode durar de dias a semanas. (Walker; Stewart. 2016 ; Pimenta *et al.*, 2020)

### 2.3.2 Tipos de fermentação

Existem dois principais tipos de fermentação de cerveja, classificados de acordo com o comportamento e a temperatura de atuação das leveduras:

**Fermentação Alta (Ales)** Na fermentação alta, utiliza-se a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, que atua em temperaturas entre 15°C e 24°C. Esse tipo de fermentação ocorre na parte superior do fermentador e é caracterizado pela produção de ésteres e compostos fenólicos em maior quantidade, resultando em cervejas com sabores e aromas frutados e complexos (Callejo; Gonzalez; Morata, 2017 ; Humia *et al.*, 2019).

**Fermentação Baixa (Lagers)** A fermentação baixa é realizada com leveduras do tipo *Saccharomyces pastorianus*, que fermentam a temperaturas mais baixas, entre 7°C e 13°C. Nesse processo, as leveduras se depositam no fundo do fermentador. A fermentação em baixas temperaturas promove a formação de compostos voláteis em menores concentrações, produzindo cervejas de perfil mais limpo e suave, com destaque para as características maltadas e menos presença de ésteres (Callejo; Gonzalez; Morata, 2017 ; Humia *et al.*, 2019).

### 2.3.3 Reações enzimáticas

Durante a fermentação da cerveja, leveduras como *Saccharomyces cerevisiae* ou *Saccharomyces pastorianus* desempenham um papel fundamental na conversão dos açúcares presentes no mosto em álcool e compostos secundários, responsáveis por diversas características sensoriais da bebida. Para realizar essa transformação, as leveduras dependem de enzimas, que são proteínas catalisadoras essenciais nesse processo.

As enzimas produzidas pelas leveduras são responsáveis por regular sua metabolização, através de reações que liberam energia, permitindo que as leveduras se reproduzam e cresçam. Durante a fermentação, as enzimas também intervêm na produção de álcoois, como o etanol, e na formação de compostos secundários, como ácidos, ésteres e aldeídos, que contribuem para os sabores e aromas característicos de cada estilo de cerveja.

1. **Glicólise:** Segundo Walker e Stewart (2016), a glicólise é a principal via metabólica para a quebra dos açúcares. As enzimas da levedura catalisam a conversão de glicose e outros açúcares (maltose e maltotriose) em piruvato, com a liberação de energia na forma de ATP e NADH. As etapas importantes incluem:
  - Hexoquinase: converte glicose em glicose-6-fosfato.
  - Fosfofrutoquinase: transforma a frutose-6-fosfato em frutose-1,6-bifosfato.
  - Piruvato quinase: converte fosfoenolpiruvato (PEP) em piruvato, gerando ATP.
2. **Descarboxilação do Piruvato:** O piruvato gerado na glicólise é convertido em acetaldeído e CO<sub>2</sub> pela enzima piruvato descarboxilase. Esse é um passo essencial na produção de etanol (Walker; Stewart, 2016).
3. **Redução do Acetaldeído:** O acetaldeído é então reduzido a etanol pela enzima álcool desidrogenase, utilizando NADH gerado durante a glicólise. Essa é a etapa final na produção de álcool: (Walker; Stewart, 2016).
4. **Metabolismo de Aminoácidos e Formação de Compostos Secundários:** Além da produção de etanol, a levedura realiza reações enzimáticas que resultam na formação de compostos secundários, como ésteres, álcoois superiores, ácidos orgânicos e fenóis, que contribuem para o aroma e sabor da cerveja: (Walker; Stewart, 2016).
  - Aminoácido transaminases: convertem aminoácidos em cetoácidos, que servem como precursores de compostos aromáticos.
  - Ester sintase: catalisa a formação de ésteres a partir de álcoois e ácidos orgânicos, resultando em aromas frutados.

Essas reações enzimáticas, conduzidas e reguladas pela levedura, definem o perfil químico e sensorial da cerveja, fazendo com que a fermentação seja uma etapa determinante para o caráter final da bebida (Walker; Stewart, 2016).

O controle rigoroso de parâmetros como temperatura, pH, oxigênio e nutrientes é essencial para garantir uma fermentação eficiente e com as características desejadas:

- Temperatura: influencia diretamente a taxa de crescimento das leveduras e a formação de compostos aromáticos. Temperaturas mais altas aceleram o metabolismo das leveduras, mas também aumentam a produção de ésteres e álcoois superiores, que podem resultar em sabores indesejados. (Bonatto, 2021)
- pH: o pH ideal durante a fermentação varia de 5,3 a 5,7. Um pH fora desse intervalo pode inibir a atividade enzimática e a sobrevivência das leveduras. (Ramanan; Fox; Marco, 2024)
- Oxigênio: necessário apenas na fase inicial para a síntese de esteróis e ácidos graxos, que são essenciais para a formação de membranas celulares. O excesso de oxigênio após essa fase pode resultar em oxidação do mosto e sabores indesejados. (Saerens *et al.*, 2010)
- Concentração de Levedura: a quantidade de levedura inoculada afeta o início da fermentação e a formação de subprodutos. Inoculações insuficientes podem levar a fermentações incompletas e formação de sabores indesejados, como ácido acético. (Walker; Stewart, 2016)

## **2.4 Características sensoriais da cerveja**

### **2.4.1 Sabor Doce**

O sabor doce da cerveja é um componente fundamental que contribui para o equilíbrio sensorial da bebida, sendo influenciado por várias moléculas e processos durante a produção. As principais moléculas responsáveis por conferir o sabor doce à cerveja são os açúcares residuais, derivados da maltose e outros carboidratos, bem como compostos resultantes de reações bioquímicas durante a fermentação.

Os açúcares residuais, como maltose, maltotriose, glicose e outros oligossacarídeos, são responsáveis pela doçura percebida na cerveja. Esses carboidratos não são completamente fermentados pelas leveduras durante o processo de fermentação, permanecendo na cerveja final. Durante a etapa de mosturação, as enzimas amilases ( $\alpha$ -amilase e  $\beta$ -amilase) degradam o amido presente no malte de cevada em açúcares fermentáveis, como maltose, e açúcares não fermentáveis, que permanecem na cerveja conferindo doçura (Ramanan; Fox; Marco, 2024). O nível de açúcares residuais depende da temperatura e do tempo de

mosturação, que influenciam a atividade dessas enzimas (De Schepper; Courtin C. M., 2022).

A utilização de leveduras não convencionais, como espécies de *Brettanomyces*, pode modificar o perfil sensorial da cerveja, promovendo a produção de compostos que diminuem a doçura, como glucoamilase, gerando cervejas “super atenuadas”, com níveis de etanol ligeiramente mais elevados e menores concentrações de açúcares residuais. (Burini *et al.*, 2020)

#### 2.4.2 Sabor Amargo

O sabor amargo é uma das características sensoriais mais marcantes da cerveja, sendo conferido principalmente pelos ácidos provenientes do lúpulo. No entanto, outras moléculas, como compostos fenólicos e produtos da fermentação, também contribuem para o amargor percebido. A análise dos artigos permite uma compreensão detalhada sobre os compostos que desempenham papéis cruciais na construção deste perfil sensorial.

Estudos recentes indicam que a relação entre iso- $\alpha$ -ácidos e polifenóis pode afetar diretamente a percepção de amargor. De acordo com a pesquisa que investigou o perfil de ácidos amargos e polifenóis no lúpulo, a presença de níveis elevados de polifenóis pode equilibrar o amargor, suavizando ou intensificando-o, dependendo da sua interação com os iso- $\alpha$ -ácidos (Oladokun *et al.*, 2016)

O principal grupo de moléculas responsáveis pelo sabor amargo são os ácidos amargos,  $\alpha$ -ácidos (cohumulona, humulona, adhumulona) e  $\beta$ -ácidos (colupulona, lupulona, adlupulona), que são encontrados no lúpulo. Durante o processo de fervura, os ácidos  $\alpha$  são isomerizados em iso- $\alpha$ -ácidos, os quais têm uma solubilidade muito maior e conferem o sabor amargo predominante na cerveja. Além dos ácidos  $\alpha$ , os polifenóis presentes no lúpulo também desempenham um papel importante no amargor. A família dos polifenóis é vasta e inclui ácidos fenólicos (como os derivados hidroxicinâmicos e hidroxi-benzônicos), flavanóis e seus glicosídeos, além de flavonoides prenilados (Oladokun *et al.*, 2016).

A adição de frutas cítricas à cerveja, principalmente durante a fermentação, aumenta a atividade antioxidante e o conteúdo de polifenóis da bebida, contribuindo para um perfil de sabor mais rico. Estudos mostraram que as cervejas de frutas, incluindo aquelas feitas com frutas cítricas como laranja, exibem níveis



significativamente mais altos de polifenóis e flavonóides totais em comparação com as cervejas convencionais sem adição de frutas. O processo de fermentação permite a extração de compostos bioativos das frutas, o que não só melhora a qualidade nutricional da cerveja, mas também diversifica suas características aromáticas (Nardini; Garaguso, 2020).

#### 2.4.3 Sabor Ácido

O sabor ácido em cervejas, especialmente nas variedades conhecidas como “sour beers”, é resultado de uma combinação de fatores microbianos, processos fermentativos e compostos orgânicos presentes no produto final. A acidez pode ser atribuída principalmente à presença de ácidos orgânicos formados durante a fermentação e pela ação de microrganismos específicos, como bactérias lácticas e algumas cepas de leveduras não convencionais.

Um dos principais compostos responsáveis pelo sabor ácido é o ácido láctico, que é produzido por bactérias do gênero *Lactobacillus* e *Pediococcus* durante a fermentação láctica. Esse ácido é amplamente identificado como o principal componente responsável pela acidez em cervejas do estilo lambic, gueuze e outras sour beers. A capacidade dessas bactérias de fermentar açúcares, convertendo-os em ácido láctico, é um fator essencial para gerar o sabor ácido característico. (Ramanan; Fox; Marco., 2024).

Além do ácido láctico, outro ácido relevante é o ácido acético, produzido principalmente por leveduras acéticas como *Brettanomyces* e algumas bactérias acéticas. O estudo sobre leveduras não convencionais explica que o ácido acético confere um amargor acentuado e, em níveis elevados, pode tornar a cerveja desagradavelmente ácida. No entanto, em concentrações controladas, contribui para o perfil complexo de algumas cervejas envelhecidas (Basso; Alcarde; Portugal, 2016; Karabín, 2018).

Além dos ácidos orgânicos, a presença de ácido carbônico derivado da carbonatação também pode influenciar a acidez percebida. Esse fenômeno é comum em cervejas de alta carbonatação, onde a presença de CO<sub>2</sub> dissolvido no líquido gera uma leve acidez, que, embora não derivada de compostos orgânicos, contribui para a sensação de frescor e acidez na boca (Buiatti, 2009).

#### 2.4.4 Sabor Umami

O sabor umami, embora mais frequentemente associado a alimentos como carnes, queijos e cogumelos, também pode ser percebido em algumas cervejas. Esse sabor é descrito como uma sensação de "deliciosidade" ou "saboroso" e resulta de compostos que estimulam receptores específicos de umami na língua. Na cerveja, esse perfil de sabor pode ser gerado por moléculas específicas, como aminoácidos e nucleotídeos, que se formam ou permanecem após o processo de fermentação.

Os aminoácidos livres, especialmente o ácido glutâmico, são os principais responsáveis pela percepção de umami na cerveja. Durante o processo de malteação e fermentação, há uma liberação de aminoácidos das proteínas do malte, incluindo o glutamato que juntamente com outros aminoácidos como a asparagina, pode contribuir para o sabor umami em cervejas que passam por fermentação prolongada ou que utilizam maltes específicos ricos em proteínas (Buiatti, 2009 ; Schmidt; Olsen; Mouritsen, 2021).

#### 2.4.5 Aroma dos Ésteres e Álcoois superiores

Os ésteres são compostos aromáticos que desempenham um papel central na criação do perfil sensorial de diversas cervejas, especialmente em termos de aroma. Eles são responsáveis por notas frutadas, florais e doces. No metabolismo da levedura, os açúcares fermentáveis e os lipídios são transformados em acetil-CoA, enquanto o metabolismo do nitrogênio resulta na geração de álcoois fúsel. Esses álcoois são então usados na síntese de ésteres, catalisada pela enzima sintetase de ésteres, sendo sua produção influenciada pela temperatura de fermentação e condições do mosto (Humia *et al.*, 2019; Holt *et al.*, 2018).

Um dos principais ésteres presentes na cerveja é o acetato de isoamila, conhecido por conferir um aroma de banana. Este composto é particularmente dominante em cervejas fermentadas com leveduras do tipo *Saccharomyces cerevisiae* e *Pichia kluyverii*, apresenta um limiar de 1-6 mg/ l nas cervejas. (Holt *et al.*, 2018).

O acetato de etila é comum em diversos estilos de cerveja em concentrações de 10-60 mg/l, em baixas concentrações, contribui para um aroma suave e

agradável amanteigado. No entanto, em níveis muito altos, ele pode resultar em um cheiro excessivamente solvente, o que pode prejudicar o equilíbrio sensorial da cerveja. (Humia *et al.*, 2019).

O caprilato de etila é responsável por notas aromáticas de maçã com um sabor azedo. Essas moléculas são frequentemente encontradas em cervejas fermentadas com cepas específicas de leveduras que promovem a produção desses compostos. O uso de leveduras não-Saccharomyces, como o uso de Brettanomyces pode aumentar a produção desses ésteres, enriquecendo o perfil aromático com uma maior diversidade de aromas (Basso; Alcarde; Portugal, 2016; Callejo; Gonzalez; Morata, 2017 ; Humia *et al.*, 2019 ; Holt *et al.*, 2018).

Outros ésteres de grande importância para o aroma frutado e floral da cerveja incluem: o acetato de 2-feniletil (0,05-3 mg/L), octanoato de etila (0,5-4 mg/L), 2-metilbutanoato de etila (0,05-1,2 mg/L), hexanoato de etila (0,4-1 mg/L) e butanoato de etila (0,3-3 mg/L), todos originados do metabolismo das leveduras (Holt *et al.*, 2018).

Os álcoois superiores também conhecidos como álcoois fúsel, desempenham um papel importante no aroma da cerveja. Eles são subprodutos do metabolismo de leveduras. Existem duas vias metabólicas bem conhecidas para maior biossíntese desses álcoois, uma delas é a clássica glicolítica, a outra é através da via de Ehrlich, onde ocorre a desaminação do aminoácido para um  $\alpha$ -cetoácido, descarboxilação e redução de aldeído para álcool por atividade da aldeído redutase. Um dos álcoois superiores mais comuns é o álcool isoamílico, que em concentrações adequadas confere aromas de banana, alcoólico, vinoso e doce em níveis típicos de 30 a 70 mg/l. (Humia *et al.*, 2019 ; Holt *et al.*, 2018)

#### 2.4.6 Aroma dos Terpenos

Outro grupo importante são os terpenos, compostos voláteis que podem ser derivados do lúpulo utilizado na produção. Os terpenos conferem aromas florais, cítricos e herbais, sendo particularmente perceptíveis em cervejas mais lupuladas.

Um dos terpenos mais abundantes no lúpulo é o mirceno, correspondendo 75% dos óleos essenciais é responsável por promover um aroma de manga. Outro terpeno importante é o linalol, descrito como aroma floral, cítrico e de anis, apresentando uma concentração de 0,2 a 0,47 mg/l. A  $\beta$ -ionona, com níveis típicos

de 1-3  $\mu\text{g/L}$ , contribui com aromas de framboesa artificial, cedro e violetas. A  $\beta$ -damascenona, presente em concentrações de 1-30  $\mu\text{g/L}$ , adiciona notas de groselha preta, framboesa e mentol. O geraniol, em concentrações de 0,02-0,2 mg/L e limiar de 0,05-0,5 mg/L, confere aromas de Limão, floral, jacinto e rosa. Por fim, o humulenol II, com níveis de 0,02-1,15 mg/L e limiar de 0,5 mg/L, está associado ao aroma de lúpulo. (Holt *et al.*, 2018).

Todos esses compostos têm origem no lúpulo, com alguns também sendo formados pela transformação de leveduras ou durante o processo de mosturação, desempenhando um papel essencial no perfil sensorial da cerveja. (Holt *et al.*, 2018)

#### 2.4.7 Aroma das Lactonas e Furanonas e Tióis Polifuncionais

As lactonas, furanonas e tióis polifuncionais desempenham papéis importantes no aroma da cerveja, especialmente em notas frutadas e adocicadas. Esses compostos, formados a partir de precursores presentes no malte, lúpulo ou gerados durante a fermentação, são essenciais para o perfil aromático de estilos lupulados e envelhecidos. (Holt *et al.*, 2018)

A  $\gamma$ -decalactona é uma lactona associada aos aromas de damasco e pêssego. Esse composto é derivado de precursores de ácidos graxos hidroxilados durante o processo de brassagem. Seus níveis típicos na cerveja variam entre 4 e 200  $\mu\text{g/l}$ , embora seu limiar sensorial seja de aproximadamente 400  $\mu\text{g/l}$ . Ela é responsável por notas frutadas em cervejas que utilizam maltes e lúpulos ricos nesses precursores. (Holt *et al.*, 2018)

A Whiskey-lactone ou oak-lactone ( $\beta$ -metil- $\gamma$ -octalactona) confere aromas doces e de coco, sendo encontrada principalmente em cervejas envelhecidas em barris de carvalho, como Gueuze e Lambic. Essa lactona também é presente no Whisky, e seu aroma contribui para o caráter de envelhecimento em barris. (Holt *et al.*, 2018)

A furanona 4-hidroxi-2,5-dimetil-3(2H), conhecida como furanona morango, confere aroma de abacaxi e caramelo. Seu nível típico em cervejas escuras é de 2,6 mg/l, com um limiar sensorial de 0,5 mg/l. É formada durante a torrefação do malte e transformações de levedura, sendo importante para o aroma de abacaxi em certos estilos de cerveja. (Holt *et al.*, 2018)

Entre os tióis polifuncionais, destaca-se o 3-sulfanil-4-metilpentan-1-ol (3S4MP), que confere aromas exóticos de frutas e ruibarbo. Esse tiol é encontrado no lúpulo Nelson Sauvin e passa por transformações de levedura durante a fermentação. Seus níveis típicos são de 138 ng/l, com um limiar sensorial de 70 ng/l. (Holt *et al.*, 2018)

Outro tiol importante é o 4-metil-4-sulfanilpentan-2-ona (4MSP), que contribui com aromas de groselha preta e notas frutadas. Este composto, presente em lúpulos como Simcoe, Summit, Apollo, Cascade, Mosaic, e Sorachi Ace, também é formado por transformações de levedura. Seu nível típico varia entre 17 e 184 ng/l, com um limiar sensorial de 1,5 ng/l, tornando-o um composto de alto impacto no aroma da cerveja. (Holt *et al.*, 2018)

#### 2.4.8 Textura

A textura da cerveja, também conhecida como “mouthfeel,” é uma característica sensorial que envolve a percepção física da bebida na boca. A textura é influenciada por uma série de fatores, incluindo a concentração de açúcares residuais, proteínas, carboidratos não fermentáveis e compostos como álcoois superiores e dióxido de carbono. Esses componentes atuam de maneira combinada para determinar a viscosidade, a sensação de cremosidade e suavidade, bem como a carbonatação da cerveja.

Uma das principais moléculas que conferem textura à cerveja são os carboidratos não fermentáveis, como as dextrinas, que são subprodutos do processo de mosturação. As dextrinas não são fermentadas pelas leveduras e, portanto, permanecem no produto final, aumentando a viscosidade e proporcionando uma sensação de corpo mais encorpado. (Michiels *et al.*, 2024).

Além disso, as arabinoxilanas, que são polissacarídeos não amiláceos que também aumentam a viscosidade da cerveja e podem melhorar a plenitude do paladar, especialmente quando em sua forma de alto peso molecular. Eles são derivados principalmente do malte de cevada e contribuem para a textura geral da bebida. (Michiels *et al.*, 2024) Já, os  $\beta$ -glucanos são polissacarídeos não amiláceos provenientes das paredes celulares da cevada e de outros cereais usados na produção da cerveja. Essas moléculas aumentam a viscosidade da cerveja, contribuindo para uma sensação mais densa no paladar. (Michiels *et al.*, 2024).

Além dos carboidratos, as proteínas desempenham um papel essencial na textura da cerveja. Durante o processo de malteação, as proteínas do malte são degradadas em peptídeos e aminoácidos que contribuem para a sensação de corpo e cremosidade. (Michiels *et al.*, 2024). Por fim, a presença de glicerol, um subproduto da fermentação, também contribui para a textura da cerveja. O glicerol adiciona uma sensação de suavidade e viscosidade, influenciando a cremosidade da bebida. (Walker; Stewart, 2016).

#### 2.4.9 Espuma

Em algumas cervejas, a criação e manutenção da espuma desempenham um papel crucial. A estrutura da espuma é formada por albumina termorresistente (proteína Z), originária do malte de cevada, que pode ser degradada pela proteinase A, uma enzima liberada pela levedura durante sua autólise na fase de maturação da cerveja (Karabín *et al.*, 2017). Além disso, a estabilidade da espuma é afetada por glicoproteínas presentes na superfície da parede celular da levedura. Dessa forma, a qualidade final da cerveja está intimamente ligada à cepa de levedura selecionada (Bonatto, 2021). A humulona, presente em concentrações de até 4 mg/L na cerveja, também contribui para a estabilidade da espuma, inibindo a formação excessiva de espuma (gushing) e auxiliando na conservação da bebida (Evans *et al.*, 2021).

#### 2.4.10 Coloração

A coloração da cerveja é uma de suas características sensoriais mais visíveis e importantes, sendo influenciada principalmente pelos ingredientes utilizados e pelos processos térmicos envolvidos na fabricação. As moléculas responsáveis pela cor da cerveja são, em grande parte, derivadas das reações químicas que ocorrem durante a produção, especialmente durante a maltagem e a fervura do mosto.

Uma das principais classes de compostos responsáveis pela coloração da cerveja são as melanoidinas, formadas durante as reações de Maillard. Essas reações ocorrem quando açúcares redutores reagem com aminoácidos sob condições de alta temperatura, como durante a torrefação do malte. As melanoidinas são responsáveis por cores que variam do âmbar claro ao marrom escuro, conferindo também características sensoriais como aromas de caramelo e

tostado. (Dack *et al.*, 2017 ; Parker, 2012). Outro grupo de moléculas que contribuem para a coloração da cerveja são os polifenóis presentes no lúpulo, que ao serem oxidados podem influenciar na cor. (Shellhammer; Bamforth 2008).

## **2.5 Características funcionais da cerveja**

### **2.5.1 Principais vitaminas**

A cerveja contém uma variedade de vitaminas que podem trazer benefícios à saúde, especialmente aquelas do complexo B, que são essenciais para o metabolismo energético e o funcionamento adequado do sistema nervoso. A produção de cerveja, especialmente o processo de fermentação, é uma das principais fontes dessas vitaminas, que são incorporadas ao produto final. As vitaminas do complexo B são encontradas em quantidades consideráveis na cerveja, especialmente a tiamina (B1), niacina (B3), ácido pantotênico (B5), piridoxina (B6), ácido fólico (B9) e cobalamina (B12). Essas vitaminas desempenham papéis fundamentais no metabolismo de carboidratos, gorduras e proteínas, sendo responsáveis pela liberação de energia dos alimentos e pela manutenção da saúde das células nervosas e sanguíneas.(Depeint *et al.*, 2006).

O ácido fólico, ou vitamina B9, é essencial para a síntese de DNA e RNA e para a divisão celular. A presença dessa vitamina na cerveja, resultante da fermentação, pode contribuir para a ingestão diária recomendada, especialmente em dietas deficientes. Estudos indicam que o consumo moderado de cerveja pode ser uma fonte significativa de ácido fólico, ajudando na prevenção de deficiências que podem levar a anemias (Lyon *et al.*, 2020).

A riboflavina e a niacina também estão presentes na cerveja em quantidades relevantes. A riboflavina desempenha um papel fundamental no metabolismo energético e na proteção das células contra o estresse oxidativo. Essas vitaminas são parcialmente derivadas dos grãos utilizados na produção de cerveja, mas também são amplificadas pelo processo de fermentação (Lyon *et al.*, 2020).

A biotina é outra vitamina do complexo B presente na cerveja. Ela é vital para a saúde da pele, cabelo e unhas, além de contribuir para o metabolismo de macronutrientes. (Depeint *et al.*, 2006). O consumo moderado desta bebida pode ajudar a complementar a ingestão dessa vitamina em uma dieta balanceada

(Osorio-Paz *et al.*, 2019).

### 2.5.2 Principais Polifenóis

Os polifenóis são um grupo diverso de compostos bioativos encontrados em vários alimentos e bebidas, incluindo cerveja, onde contribuem para suas propriedades antioxidantes e potenciais benefícios à saúde. Nas cervejas, o conteúdo total de polifenóis varia de 321 a 767 mg/L, com cervejas de frutas exibindo níveis mais altos em comparação com cervejas convencionais, particularmente cervejas de cereja, que têm a maior concentração de polifenóis.

A presença desses compostos não apenas melhora os atributos sensoriais da cerveja, mas também oferece benefícios potenciais à saúde, incluindo efeitos protetores contra doenças cardiovasculares, diabetes, osteoporose e doenças degenerativas.(Nardini; Garaguso, 2020)

Os polifenóis são classificados como Ácidos fenólicos, flavonoides, estilbenos e lignanas (Amawi *et al.*, 2017).

### 2.5.3 Resveratrol

O Resveratrol é uma subclasse dos Estilbenos, embora não seja um composto naturalmente presente na cerveja em quantidades significativas, ele pode ser encontrado em cervejas de frutas, especialmente aquelas feitas com uvas. O resveratrol é relatado como tendo numerosos efeitos promotores de saúde em animais e humanos, como propriedades antioxidante, anti-inflamatória, antidiabética e antiproliferativa (Nardini; Garaguso, 2020).

### 2.5.4 Flavonóides

A cerveja contém uma variedade de flavonóides, que são compostos fenólicos derivados principalmente do lúpulo e dos grãos utilizados no processo de produção. Esses compostos exercem atividades antioxidantes, anti-inflamatórias e anticancerígenas, sendo considerados importantes para a promoção da saúde humana. Dentre os flavonoides presentes na cerveja, o xanthohumol se destaca como um dos mais estudados por seus efeitos benéficos à saúde.



O xanthohumol é um flavonoide prenilado encontrado no lúpulo (*Humulus lupulus*), ingrediente fundamental na produção da cerveja. Estudos têm demonstrado que essa molécula possui potentes propriedades antioxidantes e quimiopreventivas. O xanthohumol atua inibindo a formação de lesões pré neoplásicas no fígado e no cólon, além de reduzir o dano ao DNA induzido por mutágenos alimentares como o amino-3-metil-imidazo[4,5-f]quinolina. O consumo de cervejas com altos teores de xanthohumol, como as cervejas do tipo stout e porter, pode proporcionar uma proteção significativa contra o desenvolvimento de câncer, especialmente em tecidos hepáticos e intestinais (Ferk *et al.*, 2010). Além de suas propriedades anticancerígenas, o xanthohumol também exerce atividades anti-inflamatórias e antioxidantes, sendo capaz de neutralizar radicais livres e reduzir processos inflamatórios no organismo. Esses efeitos antioxidantes são fundamentais na prevenção de doenças crônicas, como doenças cardiovasculares e distúrbios neurodegenerativos (Osorio-Paz *et al.*, 2019). Por fim, o xanthohumol também demonstra propriedades anti-inflamatórias e melhora a cicatrização de feridas, reduzindo o estresse oxidativo e a inflamação em modelos de pele (Chen *et al.*, 2013).

Outro flavonoide prenilado derivado do xanthohumol é o isoxanthohumol, que também é encontrado em cervejas, embora em menor concentração. O isoxanthohumol é produzido durante o processo de fervura do lúpulo e tem mostrado potencial efeito antiproliferativo em vários tipos de célula cancerígena semelhantes às do xanthohumol. Assim como outros flavonoides, o isoxanthohumol contribui para a redução do estresse oxidativo.(Osorio-Paz *et al.*, 2019).

Quercetina é um flavonóide presente na cerveja que tem sido associado a diversos benefícios à saúde devido às suas propriedades antioxidantes. Estudos indicam que a quercetina pode ajudar na proteção contra doenças cardiovasculares, certos tipos de câncer e processos inflamatórios, além de ter potencial anti-envelhecimento (Osorio-Paz *et al.*, 2019 ; Boots *et al.*, 2008).

A catequina é um flavonoide encontrado tanto no lúpulo quanto nos grãos da cevada, utilizados na produção de cerveja. Esse composto apresenta atividades antioxidantes robustas, sendo capaz de proteger as células contra danos oxidativos (Osorio-Paz *et al.*, 2019). A catequina tem sido associada à melhora da função endotelial e à redução da inflamação crônica, o que pode ajudar na prevenção de doenças cardiovasculares e na proteção contra o câncer. O consumo moderado de

cerveja contendo catequina pode, portanto, contribuir para a manutenção da saúde cardiovascular e a prevenção de doenças degenerativas (Mangels; Molher III, 2017).

Outro flavonoide encontrado no lúpulo é o 8-prenilnaringenina, conhecido por ser um dos fitoestrogênios mais potentes. Estudos indicam que este composto pode atuar de maneira benéfica no equilíbrio hormonal, especialmente em mulheres, podendo aliviar sintomas da menopausa. Além disso, a 8-prenilnaringenina tem mostrado efeitos na redução da perda óssea, sendo um potencial agente na prevenção da osteoporose. (Chen *et al.*, 2013)

### 2.5.5 Ácidos Fenólicos

Os ácidos fenólicos presentes na cerveja são compostos bioativos com potentes propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e anticancerígenas. Esses compostos, derivados principalmente dos grãos utilizados no processo de malteação, são conhecidos por seus efeitos protetores contra doenças crônicas, como doenças cardiovasculares e cânceres. Entre os ácidos fenólicos encontrados na cerveja, destacam-se o ácido ferúlico, o ácido cafeico, o ácido sinápico e o ácido p-cumárico.

O ácido ferúlico é um dos ácidos fenólicos mais abundantes na cerveja, principalmente derivado da cevada e do malte. Ele exerce fortes atividades antioxidantes, sendo capaz de neutralizar radicais livres e proteger as células contra o estresse oxidativo. O ácido ferúlico também tem sido associado à prevenção de doenças cardiovasculares, uma vez que ajuda a inibir a oxidação do colesterol LDL, um fator importante no desenvolvimento da aterosclerose. Além disso, estudos sugerem que o ácido ferúlico pode ter um efeito protetor contra o desenvolvimento de certos tipos de câncer, devido às suas propriedades anti-inflamatórias (Li *et al.*, 2017 ; Osorio-Paz *et al.*, 2019).

O ácido cafeico é outro ácido fenólico encontrado na cerveja, conhecido por suas atividades antioxidantes e anti-inflamatórias. Ele desempenha um papel importante na modulação de processos inflamatórios e na proteção das células contra danos oxidativos (Osorio-Paz *et al.*, 2019). O ácido cafeico tem sido amplamente estudado por seus efeitos protetores contra o câncer, especialmente no trato gastrointestinal onde pode melhorar a composição da microbiota e proteger contra danos à barreira intestinal (Alam *et al.*, 2022).

O ácido sinápico, também presente na cerveja, possui propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias significativas. Ele é eficaz na redução do estresse oxidativo, protegendo as células contra danos causados por radicais livres. Estudos indicam que o ácido sinápico pode ser benéfico na prevenção de doenças hepáticas relacionadas ao consumo de álcool, pois ajuda a modular o estresse oxidativo e a inflamação no fígado. (Chu *et al.*, 2021). Além disso, em estudos sobre doenças inflamatórias intestinais, o ácido sinápico ajudou a manter a integridade das junções celulares no intestino e melhorou a microbiota intestinal, o que pode ser benéfico para condições como a colite (Jang *et al.*, 2023).

O ácido p-cumárico é um fenol comum encontrado nos grãos de cevada sendo liberado na etapa de mosturação da produção de cerveja (Schwarz; Boitz; Methner, 2012) . Ele tem propriedades antioxidantes potentes, atuando na neutralização de radicais livres e na proteção das membranas celulares contra danos oxidativos. O ácido p-cumárico também possui atividades anti-inflamatórias, o que pode ajudar na prevenção de doenças inflamatórias crônicas, como artrite e doenças cardíacas. Além disso, esse ácido fenólico tem demonstrado potencial na inibição do desenvolvimento de células cancerígenas, particularmente no câncer de cólon (Roychoudhury *et al.*, 2021).

#### 2.5.6 Ácidos Amargos

Os ácidos amargos presentes na cerveja, especialmente aqueles derivados do lúpulo, desempenham papéis fundamentais na promoção da saúde devido às suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas. Entre os principais ácidos amargos encontrados na cerveja, destacam-se os ácidos  $\alpha$  e  $\beta$ , além de compostos como o humulona e o lupulona, que têm demonstrado efeitos benéficos na prevenção de doenças crônicas.

Os ácidos  $\alpha$ , também conhecidos como humulonas, são compostos amargos encontrados no lúpulo, que conferem à cerveja seu sabor característico. Além de sua função sensorial, esses compostos apresentam importantes propriedades funcionais para a saúde. Estudos demonstram que os humulonas possuem atividades anti-inflamatórias, atuando na inibição de enzimas pró-inflamatórias, como a ciclooxygenase-2 (COX-2). Essa atividade pode ajudar a prevenir doenças inflamatórias crônicas, como artrite e doenças cardiovasculares (Gerhauser *et al.*,

2005). Além disso, os humulonas possuem atividade antioxidante, ajudando a neutralizar radicais livres e a prevenir danos oxidativos às células. Isso é particularmente importante na prevenção de doenças relacionadas ao envelhecimento e ao estresse oxidativo, como doenças neurodegenerativas e certos tipos de câncer (Osorio-Paz et al., 2019).

Os ácidos  $\beta$ , ou lupulonas, também são compostos amargos presentes no lúpulo, com propriedades antimicrobianas notáveis. Esses ácidos têm a capacidade de inibir o crescimento de bactérias gram positivas. (Chen *et al.*, 2013). Além disso, os lupulonas demonstraram efeitos anti proliferativos em células cancerígenas, sugerindo um potencial uso na prevenção do desenvolvimento de tumores (Osorio-Paz *et al.*, 2019).

### 2.5.7 Probióticos

A cerveja pode ser considerada uma bebida funcional quando produzida com adição de microrganismos Probióticos que proporcionam benefícios à saúde. Esses Probióticos, que são principalmente bactérias lácticas, como as do gênero *Lactobacillus* e *Bifidobacterium*, têm sido utilizados em processos de fermentação de cerveja devido à sua capacidade de melhorar a saúde intestinal e promover o equilíbrio da microbiota.

Outra importante classe de Probióticos usada em processos de fermentação de cerveja é a das leveduras variantes da *Saccharomyces*, como *Saccharomyces boulardii* apresentou propriedades anti-inflamatórias e pode influenciar as vias de sinalização nas células intestinais do hospedeiro (Hinojosa-Avila et al., 2023).

Outras leveduras não convencionais como a *Pichia kluyveri*, *Hanseniaspora uvarum* e *Candida intermedia*, têm mostrado potencial de alta taxa de agregação, capacidade de adesão ao epitélio intestinal, atividade antimicrobiana contra patógenos e resistência a condições adversas, como as encontradas no trato gastrointestinal e durante o processo de fermentação (Hinojosa-Avila *et al.*, 2023).

Os *Lactobacillus*, quando adicionados à cerveja, não apenas contribuem para a acidificação da bebida, mas também trazem benefícios à saúde. A fermentação da cerveja, especialmente com cepas probióticas como de *L. paracasei* Lpc-37 e *S. cerevisiae* CNCM I-3856, promovem a produção de metabólitos bioativos derivados do triptofano, como ácido fenilático, hidroxifenilático e indol-lático, que trazem

benefícios à saúde, como redução da pressão arterial e melhora da saúde intestinal. O ambiente fermentativo é essencial para a formação desses compostos, com subprodutos como etanol e ácidos orgânicos também contribuindo para as propriedades bioativas. (Ramanan; Fox; Marco, 2024).

### 3 METODOLOGIA

A análise adota a forma de uma revisão de bibliografia científica sobre o uso de enzimas em processos cervejeiros, fundamentada em informações da literatura. A investigação do tema envolveu a consulta a diversas bases de dados, predominantemente online, como PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com>), Google Academic/Scholar (<https://scholar.google.com/>), MDPI (<https://www.mdpi.com/>) e Taylor e Francis (<https://www.tandfonline.com/>), além repositórios científicos de universidades brasileiras e livros acadêmicos de relevância para o assunto. As palavras-chave utilizadas foram: “beer”, “beer consumption”, “application in brewing”, “brewing”, “fermentation”, “beer and enzymes”, “aroma”, “flavor” e “functional”, modificando a ordem do conjunto de palavras-chave. Optou-se por selecionar artigos majoritariamente em inglês e de acesso online obrigatório, priorizando a relevância do conteúdo publicado nos últimos 20 anos. No entanto, também foram incluídos trabalhos de grande referência na área, independentemente de sua data de publicação, em razão de sua relevância e contribuição significativa para o tema. A pesquisa foi refinada por meio da análise dos resumos e metodologias dos artigos escolhidos, buscando-se material diretamente relacionado ao objeto da pesquisa. Foram excluídas as publicações que não apresentaram ganhos práticos na indústria.

Para a revisão integrativa da literatura, foram utilizadas as mesmas fontes e com as mesmas palavras-chave, restringindo-se apenas artigos de pesquisa, excluindo revisões de literaturas, estudos de caso e cartas ao leitor. Sendo priorizadas publicações dos últimos 20 anos, com descobertas inéditas e análises que contribuem para o avanço da área, apresentando metodologias replicáveis. Os artigos de pesquisa foram inseridos no software VOSviewer para realizar a análise de ocorrência de palavras, com o objetivo de identificar os termos mais frequentes presentes nos títulos. Essa análise permitiu a criação de mapas que revelam as conexões entre os diferentes tópicos de pesquisa, permitindo a identificação de padrões, grupos de pesquisa e tendências predominantes na área estudada, o software também facilitou a criação de variáveis para caracterizar os artigos analisados. A partir dessa análise e das variáveis definidas, foram elaboradas tabelas para caracterizar os artigos. Essas tabelas auxiliam na visualização dos

padrões e tendências observadas nos estudos, fornecendo uma visão mais estruturada sobre as contribuições de cada artigo para o campo de estudo.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Características Sensoriais

O seguinte quadro apresenta artigos sobre características sensoriais da cerveja, destacando o tipo de característica sensorial estudada, o fator de modulação e um breve comentário sobre os achados de cada estudo.

Quadro 2 - Artigos levantados nas bases de dados sobre características sensoriais.

| Artigo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Tipo de característica | Fator de modulação      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| <p>Nome: Brief Insight into the Underestimated Role of Hop Amylases on Beer Aroma Profiles</p> <p>Comentário: A fermentação foi modulada devido a adição de lúpulo suas enzimas, como <math>\alpha</math>-amilase e <math>\beta</math>-amilase, geraram glicose e maltose, impactando o metabolismo da levedura, resultando em uma alteração no perfil aromático da cerveja durante a fermentação secundária</p> <p>Referência: <a href="#">(Werrie; Decker; Fauconnier, 2021)</a></p> | Aromas                 | Adição de lúpulo        |
| <p>Nome: Assessment of the impact of unmalted cereals, hops, and yeast strains on volatolomic and olfactory profiles of Blanche craft beers: A chemometric approach</p> <p>Comentário: Combinações de cereais não maltados, lúpulos e cepas de levedura modularam o perfil volatolômico e olfativo das cervejas resultando em variações nas notas sensoriais, como intensidade olfativa e aromas florais e herbáceos</p> <p>Referência: <a href="#">(Palombi et al., 2023)</a></p>     | Aromas                 | Variação de cereais     |
| <p>Nome: Coculturing of <i>non-Saccharomyces cerevisiae</i> and <i>Saccharomyces cerevisiae</i> for improving the aroma quality and antioxidant characteristics of beer with Yuan'an yellow tea</p> <p>Comentário: O chá forneceu compostos como terpenos (linalol, geraniol, citronelol) e álcoois aromáticos (feniletil álcool, benzil álcool), que intensificaram as notas florais e frutadas da cerveja.</p> <p>Referência: <a href="#">(Wu et al., 2024)</a></p>                  | Aromas                 | Enriquecimento do mosto |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |         |                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------|
| <p>Nome: Aroma-active ester profile of ale beer produced under different fermentation and nutritional conditions</p> <p>Comentário: A suplementação de L-leucina (0,75 g/L) aumentou em 7,05 vezes a concentração de isoamyl acetate e 1,96 vezes a de ethyl decanoate, melhorando o perfil aromático da cerveja. Já a suplementação de sulfato de zinco (0,12 g/L) aumentou em 2,46 vezes ambos os compostos, contribuindo para maior concentração de ésteres.</p> <p>Referência: <a href="#">(Hilaral; Olarinan; Pillay, 2013)</a></p> | Aromas  | Enriquecimento do mosto                 |
| <p>Nome: Impact of barley selection and mashing profile on the arabinoxylan content and structure in beer</p> <p>Comentário: A seleção de cevada e o perfil de mosturação afetam o conteúdo e a estrutura do arabinoxilano na cerveja. O estudo descobriu que tanto a seleção da cevada quanto o processo de mosturação influenciam significativamente o conteúdo de arabinoxilano.</p> <p>Referência: <a href="#">(Michiels et al., 2024)</a></p>                                                                                       | Textura | Seleção de cevada                       |
| <p>Nome: Maltose and glucose utilization during fermentation of barley and sorghum lager beers as affected by <math>\beta</math>-amylase or amyloglucosidase addition</p> <p>Comentário: Enzimas amilolíticas aumentam a concentração de açúcares fermentáveis no mosto, o que eleva o teor de etanol nas cervejas. As enzimas afetam a concentração inicial de açúcares, que está ligada à taxa de consumo e à concentração final desses açúcares.</p> <p>Referência: <a href="#">(Espinosa-Ramírez et al., 2014)</a></p>               | Sabor   | Suplementação de enzima exógena         |
| <p>Nome: Analysis of the Formation of Characteristic Aroma Compounds by Amino Acid Metabolic Pathways during Fermentation with <i>Saccharomyces cerevisiae</i></p> <p>Comentário: A adição de aminoácidos afeta as vias metabólicas, influenciando a formação de álcoois, ácidos e ésteres, oferecendo uma base teórica para melhorar o perfil aromático de bebidas fermentadas.</p> <p>Referência: <a href="#">(Lu et al., 2023)</a></p>                                                                                                | Aromas  | Enriquecimento do mosto                 |
| <p>Nome: A Search for Diastatic Enzymes Endogenous to Humulus lupulus and Produced by Microbes Associated with Pellet Hops Driving “Hop Creep” of Dry Hopped Beer</p> <p>Comentário: No estudo, os microrganismos isolados, incluindo bactérias do gênero <i>Klebsiella</i> e fungos dos gêneros <i>Penicillium</i> e <i>Alternaria</i>, foram responsáveis por produzir amilases (<math>\alpha</math>-amilase e</p>                                                                                                                     | Aromas  | Ação de outros tipos de microorganismos |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |        |                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------|
| <p><math>\beta</math>-amilase), que atuaram na degradação de dextrinas.</p> <p>Referência: <a href="#">(Cottrell, 2022)</a></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |        |                                                                 |
| <p>Nome: Biotransformation of Hop-Derived Monoterpene Alcohols by Lager Yeast and Their Contribution to the Flavor of Hopped Beer</p> <p>Comentário: <i>Saccharomyces pastorianus</i> desempenha um papel essencial na biotransformação de compostos como geraniol em <math>\beta</math>-citronelol, alterando significativamente o perfil aromático da cerveja.</p> <p>Referência: <a href="#">(Takoi et al., 2010)</a></p>                                                                                                                                                                                                                             | Aromas | Utilização de leveduras <i>Saccharomyces</i> de outras espécies |
| <p>Nome: The effect of selected <i>non-Saccharomyces</i> yeasts and cold-contact fermentation on the production of low-alcohol marula fruit beer</p> <p>Comentário: <i>M. pulcherrima</i> e <i>P. fermentans</i> contribuíram para o desenvolvimento de compostos aromáticos e acidez, enquanto <i>P. kluyveri</i> foi a mais eficaz em reduzir a produção de álcool.</p> <p>Referência: <a href="#">(Hlangwani et al., 2024)</a></p>                                                                                                                                                                                                                    | Sabor  | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i>                |
| <p>Nome: Evaluation of <i>non-Saccharomyces</i> yeasts in the fermentation of wine, beer and cider for the development of new beverages</p> <p>Comentário: <i>Pichia kluyveri</i>, <i>Lindnera meyeri</i>, <i>Starmeria caribae</i>, <i>Yarrowia lipolytica</i>, <i>Saccharomycodes ludwigii</i> foram avaliadas por sua capacidade de produzir compostos aromáticos únicos, como ésteres, álcoois superiores e ácidos voláteis. Elas contribuíram para a criação de perfis sensoriais distintos nas fermentações de cerveja, vinho e cidra, com destaque para aromas frutados e florais</p> <p>Referência: <a href="#">(Gutierrez et al., 2018)</a></p> | Aromas | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i>                |
| <p>Nome: Evaluation of the potential of commercial <i>non-Saccharomyces</i> yeast strains of <i>Torulaspora delbrueckii</i> and <i>Lachancea thermotolerans</i> in beer fermentation</p> <p>Comentário: <i>Lachancea thermotolerans</i> capaz de bioacidificação, produzindo quantidades notáveis de ácido láctico.</p> <p>Referência: <a href="#">(Toh et al., 2019)</a></p>                                                                                                                                                                                                                                                                            | Sabor  | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i>                |
| <p>Nome: Alternative <i>Saccharomyces</i> interspecies hybrid combinations and their potential for low-temperature wort fermentation</p> <p>Comentário: Híbridos de <i>Saccharomyces</i> apresentaram melhor desempenho fermentativo e maior produção de ésteres aromáticos, como acetato de 3-metilbutilo (aroma de banana), hexanoato de etila (aroma de maçã) e octanoato de etila (aroma</p>                                                                                                                                                                                                                                                         | Aromas | Hibridização de leveduras                                       |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |        |                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------|
| <p>frutado), em comparação com as cepas parentais</p> <p>Referência: <a href="#">(Nikulin; Krogerus; Gibson, 2017)</a></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |        |                                                  |
| <p>Nome: Identification and assessment of non-conventional yeasts in mixed fermentations for brewing bioflavored beer</p> <p>Comentário: No estudo, <i>Pichia kudriavzevii</i> e <i>Meyerozyma guilliermondii</i> modularem o perfil aromático da cerveja, produzindo compostos como acetato de etila, 2-feniletanol e álcool isoamílico, que conferiram notas frutadas e florais. Já <i>Saccharomyces cerevisiae</i> modulou a atenuação e o teor alcoólico na fermentação mista, completando a fermentação e aumentando o etanol.</p> <p>Referência: <a href="#">(Sampaolesi et al., 2023)</a></p> | Aromas | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |
| <p>Nome: Impact of <i>non-Saccharomyces</i> yeasts derived from traditional fermented foods on beer aroma: Analysis based on HS-SPME-GC/MS combined with chemometrics</p> <p>Comentário: Leveduras <i>non-Saccharomyces</i> como <i>Pichia</i>, <i>Torulaspora</i>, e <i>Debaryomyces</i> foram responsáveis por modular a produção de compostos aromáticos voláteis (como acetato de isoamila, acetato de fenetila e caprato de etila), que influenciaram diretamente as notas frutadas e florais da cerveja</p> <p>Referência: <a href="#">(Cao et al., 2024)</a></p>                              | Aromas | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |
| <p>Nome: Bioflavoring by non-conventional yeasts in sequential beer fermentations</p> <p>Comentário: A utilização de leveduras não-convencionais, como <i>Pichia kluyveri</i> e <i>Brettanomyces</i>, em fermentações sequenciais foi capaz de gerar perfis aromáticos únicos, adicionando notas frutadas.</p> <p>Referência: <a href="#">(Holt et al., 2018)</a></p>                                                                                                                                                                                                                                | Aromas | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |
| <p>Nome: Application of <i>non-Saccharomyces</i> yeasts with high <math>\beta</math>-glucosidase activity to enhance terpene-related floral flavor in craft beer</p> <p>Comentário: A alta atividade de <math>\beta</math>-glucosidase da <i>Candida glabrata</i> foi fundamental para a liberação de compostos terpênicos, como geraniol e linalol, que são responsáveis por notas florais e frutadas.</p> <p>Referência: <a href="#">(Han et al., 2023)</a></p>                                                                                                                                    | Aromas | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |
| <p>Nome: Effect of <i>Saccharomyces</i> and <i>non-Saccharomyces</i> native yeasts on beer aroma compounds</p> <p>Comentário: <i>Pichia anomala</i> e <i>Zygoascus meyeri</i> produziram compostos voláteis como 4-vinilguaiacol, álcool <math>\beta</math>-feniletil e álcool isoamílico, que superaram os limiares sensoriais, tornando-as</p>                                                                                                                                                                                                                                                     | Aromas | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |        |                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------|
| interessantes para estilos de cerveja como wheat beer e blond beer.<br>Referência: <a href="#">(Larroque et al., 2021)</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |        |                                                  |
| Nome: Exploring <i>non-Saccharomyces</i> yeasts from Daqu for beer production<br>Comentário: O estudo identificou 14 espécies de leveduras <i>não-Saccharomyces</i> , entre elas <i>Wickerhamomyces anomalus</i> , que mostrou um aumento de 13,86 vezes na produção de acetato de etila, e <i>Hanseniaspora osmophila</i> , que apresentou um aumento de 7 vezes na produção de acetato de fenetil, em comparação com as leveduras convencionais.<br>Referência: <a href="#">(Song et al., 2024)</a> | Aromas | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |
| Nome: Optimization of beer mixed fermentation using <i>Saccharomyces cerevisiae</i> and <i>Lactobacillus brevis</i><br>Comentário: L. brevis antes de S. cerevisiae resultaram em maior concentração de ácido láctico e redução do pH<br>Referência: <a href="#">(Modzelewska; Jackowski; Trusek, 2023)</a>                                                                                                                                                                                           | Aromas | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |
| Nome: Beer astringency assessed by time–intensity and quantitative descriptive analysis: Influence of pH and accelerated aging<br>Comentário: Adstringência foi significativamente maior em cervejas com pH mais baixo (pH 3.0) do que em cervejas com pH mais alto (pH 5.0). Além disso, o tempo para atingir a intensidade máxima da adstringência foi menor nas cervejas de pH 3.0.<br>Referência: <a href="#">(François et al., 2006)</a>                                                         | Sabor  | Utilização de outra faixa de pH                  |
| Nome: How low pH can intensify $\beta$ -damascenone and dimethyl trisulfide production through beer aging<br>Comentário: O pH mais baixo intensificou a produção de $\beta$ -damascenona, enquanto o pH mais alto favoreceu a liberação de compostos como 3-(methylthio)propionaldeído, precursor do dimetil trissulfeto (DMTS), embora este último também tenha sido mais presente em condições de pH baixo devido à proteção dos adutos sulfetos.<br>Referência: <a href="#">(Gus et al., 2002)</a> | Aromas | Utilização de outra faixa de pH                  |
| Nome: Influence of pH and ageing on beer organoleptic properties. A sensory analysis based on AEDA data<br>Comentário: O pH afeta o perfil sensorial da cerveja envelhecida. Cervejas com pH 4.2 apresentaram mais off-flavors, como trans-2-nonenal (aroma de papelão), enquanto o aumento para pH 4.6 reduziu esses aromas indesejáveis. Além disso, o pH mais alto                                                                                                                                 | Aromas | Utilização de outra faixa de pH                  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |        |                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------------------------|
| intensificou aromas desejáveis, como o de coco<br>Referência: <a href="#">(Derclek et al., 2005)</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |        |                                    |
| Nome: LC-MS/MS Studies on the Influence of the pH Value on the Formation of Iso- $\alpha$ -Acid Degradation Products in Beer<br>Comentário: O pH mais baixo (4.3) acelera a degradação dos iso- $\alpha$ -ácidos, resultando em maior formação de compostos indesejáveis, como triciclocohumul e triciclohumul, durante o armazenamento da cerveja. Isso afeta a estabilidade do sabor, especialmente o amargor<br>Referência: <a href="#">(Schmidt et al., 2014)</a>                                                                                                                                                                                  | Aromas | Utilização de outra faixa de pH    |
| Nome: Evidence of Dextrin Hydrolyzing Enzymes in Cascade Hops ( <i>Humulus lupulus</i> )<br>Comentário: O aumento da temperatura, acelera as reações enzimáticas, levando à maior produção de açúcares. A consequência é uma maior fermentação das leveduras, resultando em uma atenuação excessiva.<br>O autor sugere que, ao reduzir a temperatura do "dry-hopping", é possível controlar esse processo e evitar que a cerveja perca o equilíbrio desejado entre doçura e secura, minimizando a superatenuação.<br>Referência: <a href="#">(Kirkpatrick; Shellhammer 2018)</a>                                                                       | Sabor  | Fermentação em Altas temperaturas  |
| Nome: The effect of selected <i>Non-Saccharomyces</i> yeasts and cold-contact fermentation on the production of low-alcohol marula fruit beer<br>Comentário: A fermentação a baixas temperaturas (<10°C) garantiu níveis mínimos de álcool (0,00% a 0,20% v/v) e preservou os compostos aromáticos<br>Referência: <a href="#">(Hlangwani et al., 2024)</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Aromas | Fermentação em baixas temperaturas |
| Nome: The temperature dependent functionality of <i>Brettanomyces bruxellensis</i> strains in wort fermentations<br>Comentário: O estudo confirmou que as leveduras <i>Brettanomyces</i> produzem mais ésteres voláteis, como etil caproato, etil caprilato e etil decanoato, em temperaturas mais altas (22,5°C), resultando em um perfil aromático frutado típico de cervejas. Em temperaturas mais baixas (15°C), a <i>Brettanomyces bruxellensis</i> apresentou uma atividade metabólica mais lenta, resultando em uma menor produção de álcoois superiores e compostos aromáticos voláteis.<br>Referência: <a href="#">(Tyarawa et al., 2019)</a> | Aromas | Fermentação em Altas temperaturas  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |        |                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------------------------|
| <p>Nome: Alternative <i>Saccharomyces</i> interspecies hybrid combinations and their potential for low-temperature wort fermentation</p> <p>Comentário: A temperatura influenciou significativamente a fermentação e a produção de compostos aromáticos nos híbridos de <i>Saccharomyces</i>. Temperaturas mais baixas favoreceram o desenvolvimento de perfis aromáticos específicos, com maior produção de ésteres desejáveis.</p> <p>Referência: <a href="#">(Nikulin; Krogerus; Gibson, 2017)</a></p> | Aromas | Fermentação em baixas temperaturas |
| <p>Nome: Influence of fermentation temperature and yeast type on the chemical and sensory profile of handcrafted beers</p> <p>Comentário: A fermentação a 18°C aumentou a produção de compostos voláteis, como álcoois superiores e ésteres, resultando em perfis aromáticos mais complexos e melhor avaliação sensorial. A fermentação a 12°C produziu maior conteúdo de polifenóis, mas com menor complexidade aromática.</p> <p>Referência: <a href="#">(Lasanta et al., 2020)</a></p>                 | Aromas | Fermentação em altas temperaturas  |
| <p>Nome: Formation of Beer Volatile Compounds at Different Fermentation Temperatures using Immobilized Yeasts</p> <p>Comentário: A formação de ésteres foi menor em temperaturas de 5°C a 15°C, e a formação de acetaldeído foi menor em temperaturas de 5°C a 12°C</p> <p>Referência: <a href="#">(Smogrovicova et al., 2014)</a></p>                                                                                                                                                                    | Aromas | Fermentação em altas temperaturas  |
| <p>Nome: The effect of temperature on fermentation and beer volatiles at an industrial scale</p> <p>Comentário: Em temperaturas mais altas (acima de 10°C), houve maior produção de compostos aromáticos, como ésteres e álcoois superiores, mas também de compostos indesejáveis, como acetaldeído e diacetil. Temperaturas mais baixas (cerca de 8,5°C) reduziram esses compostos indesejáveis, mas a fermentação foi mais lenta.</p> <p>Referência: <a href="#">(Kucharczyk; Tuszyński, 2018)</a></p>  | Aromas | Fermentação em altas temperaturas  |
| <p>Nome: Influence of different fermentation conditions on the analytical and sensory properties of craft beers: Hopping, fermentation temperature and yeast strain</p> <p>Comentário: A fermentação a 18°C gerou maior quantidade de compostos voláteis em comparação com a fermentação a 12°C, intensificando os aromas e sabores das cervejas, especialmente quando combinada com o método de dry hopping.</p> <p>Referência: <a href="#">(Castro et al., 2022)</a></p>                                | Aromas | Fermentação em altas temperaturas  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |        |                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------------------------------|
| <p>Nome: Aroma-active ester profile of ale beer produced under different fermentation and nutritional conditions</p> <p>Comentário: Aumento na temperatura de fermentação de 18°C para temperatura ambiente (aproximadamente 22,5°C) resultou em um aumento de 17,03% na produção de etanol e um aumento de 14,42% e 62,82% na concentração total de ésteres de acetato e ésteres de etila, respectivamente</p> <p>Referência: <a href="#">(Hilaral; Olarinan; Pillay, 2013)</a></p>                                                                                                       | Aromas | Fermentação em altas temperaturas |
| <p>Nome: High temperature stimulates acetic acid accumulation and enhances the growth inhibition and ethanol production by <i>Saccharomyces cerevisiae</i> under fermenting conditions</p> <p>Comentário: A temperatura elevada gerou um aumento na produção de ácido acético e etanol, além de causar inibição do crescimento celular devido ao estresse térmico. Isso também levou ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS) e aumento da permeabilidade das membranas celulares, afetando a eficiência da fermentação</p> <p>Referência: <a href="#">(Woo et al., 2014)</a></p> | Sabor  | Fermentação em altas temperaturas |

## 4.2 Características Funcionais

O seguinte quadro apresenta artigos sobre características sensoriais da cerveja, destacando o tipo de característica funcional estudada, o fator de modulação e um breve comentário sobre os achados de cada estudo.

Quadro 3 - Artigos levantados nas bases de dados sobre características funcionais.

| Artigo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Tipo de característica | Fator de modulação      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| <p>Nome: Influence of <i>Pichia myanmarensis</i> in fermentation to produce quinoa based non-alcoholic beer with enhanced antioxidant activity</p> <p>Comentário: Quinoa aumentou o conteúdo de compostos fenólicos e flavonoides, elevando significativamente a atividade antioxidante da cerveja.</p> <p>Referência: <a href="#">(Prasad C G et al., 2022)</a></p> | Antioxidante           | Enriquecimento do mosto |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |             |                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------|
| <p>Nome: Impact of Two Commercial Enzymes on the Release of Inositols, Fermentable Sugars, and Peptides in the Technology of Buckwheat Beer</p> <p>Comentário: Enzimas tiveram pouco ou nenhum efeito significativo na recuperação dos inositóis, mas contribuíram para uma maior presença de peptídeos de baixo peso molecular. Esses achados sugerem o potencial para a produção de cerveja funcional voltada para pacientes com doença celíaca.</p> <p>Referência: <a href="#">(Dulinsk et al., 2018)</a></p>                                                                                                 | Nutricional | Suplementação de enzima exógena                  |
| <p>Nome: Use of probiotic strains to produce beers by axenic or semi-separated co-culture system</p> <p>Comentário: Método de co-cultura entre <i>L. paracase</i> e <i>Saccharomyces cerevisiae</i> variante <i>boulardii</i> evitou a competição entre as cepas, garantindo o crescimento adequado de ambos os microrganismos e a produção de cerveja com propriedades funcionais.</p> <p>Referência: <a href="#">(Silva et al., 2020)</a></p>                                                                                                                                                                  | Probiótico  | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |
| <p>Nome: Assessment of non-conventional yeasts with potential probiotic for protein-fortified craft beer production</p> <p>Comentário: O efeito Probiótico dessas leveduras se dá principalmente pela sobrevivência em condições gastrointestinais, como resistência a ácidos estomacais e sais biliares, além da capacidade de competir contra patógenos no intestino. Elas também apresentam atividade antioxidante e podem melhorar a biodisponibilidade de nutrientes, contribuindo para a saúde intestinal e o bem-estar geral do consumidor</p> <p>Referência: <a href="#">(Canonico et al., 2021)</a></p> | Probiótico  | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |
| <p>Nome: Assessment of non-conventional yeasts with potential probiotic for protein-fortified craft beer production</p> <p>Comentário: Adição de lentilha e grão de bico aumentou significativamente o conteúdo de proteínas nas cervejas fermentadas com as leveduras selecionadas</p> <p>Referência: <a href="#">(Canonico et al., 2021)</a></p>                                                                                                                                                                                                                                                               | Nutricional | Enriquecimento do mosto                          |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |              |                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|
| <p>Nome: Influence of <i>Pichia myanmarensis</i> in fermentation to produce quinoa based non-alcoholic beer with enhanced antioxidant activity</p> <p>Comentário: <i>Pichia myanmarensis</i> produziu compostos voláteis, como álcoois superiores e ésteres, que conferiram à cerveja características antioxidantes, o que compensou a baixa produção de álcool.</p> <p>Referência: (<a href="#">Prasad C G et al., 2022</a>)</p>                                                                                                                                                         | Antioxidante | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |
| <p>Nome: Coculturing of non-<i>Saccharomyces cerevisiae</i> and <i>Saccharomyces cerevisiae</i> for improving the aroma quality and antioxidant characteristics of beer with Yuan'an yellow tea</p> <p>Comentário: O metodo de Co-cultura com a levedura <i>Torulaspora delbrueckii</i> (S14) foi responsável por elevar significativamente os níveis de terpenos, álcoois e ésteres, como geraniol, linalol, e citronelol, que intensificaram as notas frutadas e florais da cerveja</p> <p>Referência: (<a href="#">Wu et al., 2024</a>)</p>                                            | Antioxidante | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |
| <p>Nome: Optimization of quality features of new wheat beers fermented through sequential inoculation of non-<i>Saccharomyces</i> and <i>Saccharomyces</i> yeasts</p> <p>Comentário: As cervejas produzidas com fermentação sequencial, com leveduras <i>Schizosaccharomyces pombe</i> e <i>Saccharomyces cerevisiae</i>, apresentaram características funcionais como antioxidantes.</p> <p>Referência: (<a href="#">Grieco et al., 2024</a>)</p>                                                                                                                                        | Antioxidante | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |
| <p>Nome: Co-fermentation of lactic acid bacteria and <i>S. cerevisiae</i> for the production of a probiotic beer: Survival and sensory and analytical characterization</p> <p>Comentário: A co-fermentação de <i>Lactobacillus plantarum</i> e <i>Saccharomyces cerevisiae</i>, manteve o sabor e aroma da cerveja, além de agregar benefícios à saúde com a presença de bactérias vivas. O uso de dry hopping foi essencial para preservar a viabilidade das bactérias, tornando a cerveja funcional e probiótica</p> <p>Referência: (<a href="#">Domínguez-Tornay et al., 2023</a>)</p> | Probiótico   | Utilização de leveduras não <i>Saccharomyces</i> |

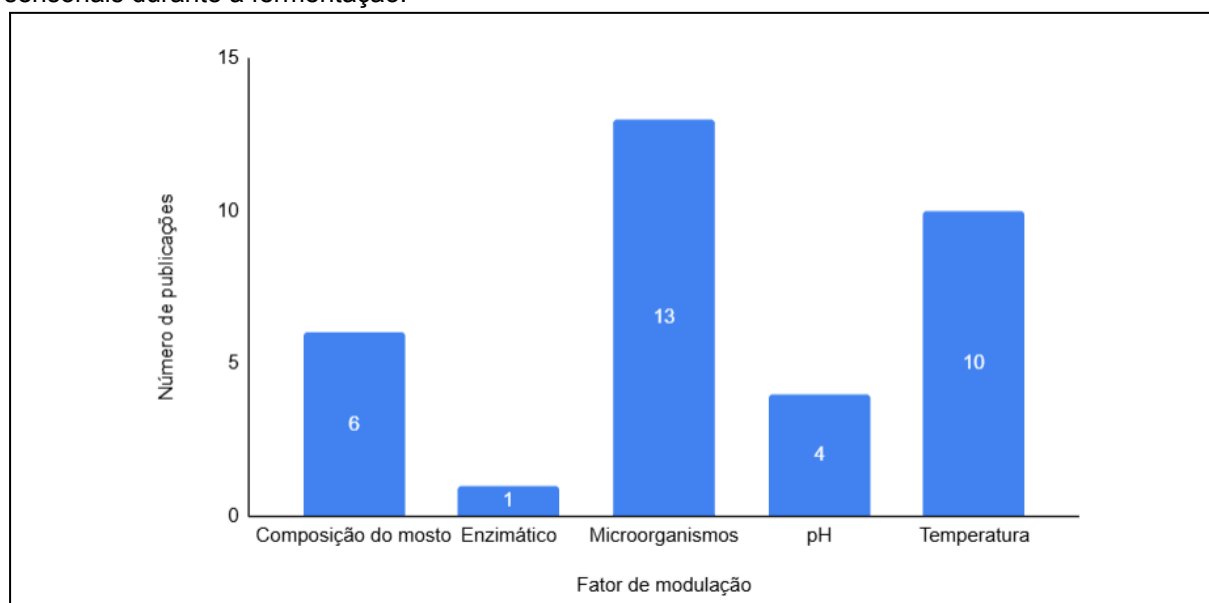
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |              |                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------|
| <p>Nome: Use of <i>Saccharomyces cerevisiae</i> var. <i>boulardii</i> in co-fermentations with <i>S. cerevisiae</i> for the production of craft beers with potential healthy value-added</p> <p>Comentário: <i>S. boulardii</i> se manteve viável durante a fermentação, mas também contribuiu para a elevação do conteúdo de polifenóis e atividade antioxidante na cerveja</p> <p>Referência: <a href="#">(Capece et al., 2018)</a></p> | Probiótico   | Utilização de leveduras <i>Saccharomyces</i> de outras espécies |
| <p>Nome: pH regulated scavenging activity of beer antioxidants through modified DPPH assay</p> <p>Comentário: Maior atividade antioxidante em seu pH nativo (pH ácido) do que em um ambiente mais alcalino (pH 7.3), sugerindo que o pH pode ser um fator crucial para a biodisponibilidade e a eficiência dos antioxidantes presentes na cerveja</p> <p>Referência: <a href="#">(Singha; Sharmab; Balapureb, 2007)</a></p>               | Antioxidante | Utilização de outra faixa de pH                                 |

## 5 DISCUSSÃO

Para a realização desta revisão integrativa, foram selecionados cinco fatores principais que modulam o processo de fermentação na produção de cerveja: composição do mosto, fatores enzimáticos, utilização de microrganismos, pH e temperatura de fermentação. A pesquisa foi conduzida na coleta de publicações nos principais repositórios de artigos científicos, priorizando estudos com metodologias replicáveis. Com base nesses critérios, foram identificados 45 artigos relevantes. Esses estudos permitiram identificar como as interações entre os fatores escolhidos influenciam o perfil sensorial e funcional da cerveja, contribuindo para uma compreensão mais profunda de como o processo fermentativo pode ser ajustado para otimizar o sabor, aroma e outras propriedades funcionais, durante a produção de cerveja.

Entre as 45 publicações encontradas, 34 estavam relacionadas a características sensoriais durante a fermentação, gerando o Gráfico 1 mostra que os fatores mais explorados na modulação de características sensoriais durante a fermentação são os microrganismos (14 publicações) e a temperatura (10 publicações), seguidos pela composição do mosto (5 publicações) e pH (4 publicações). O fator enzimático é o menos pesquisado, com apenas 1 publicação, indicando uma menor atenção a esse aspecto.

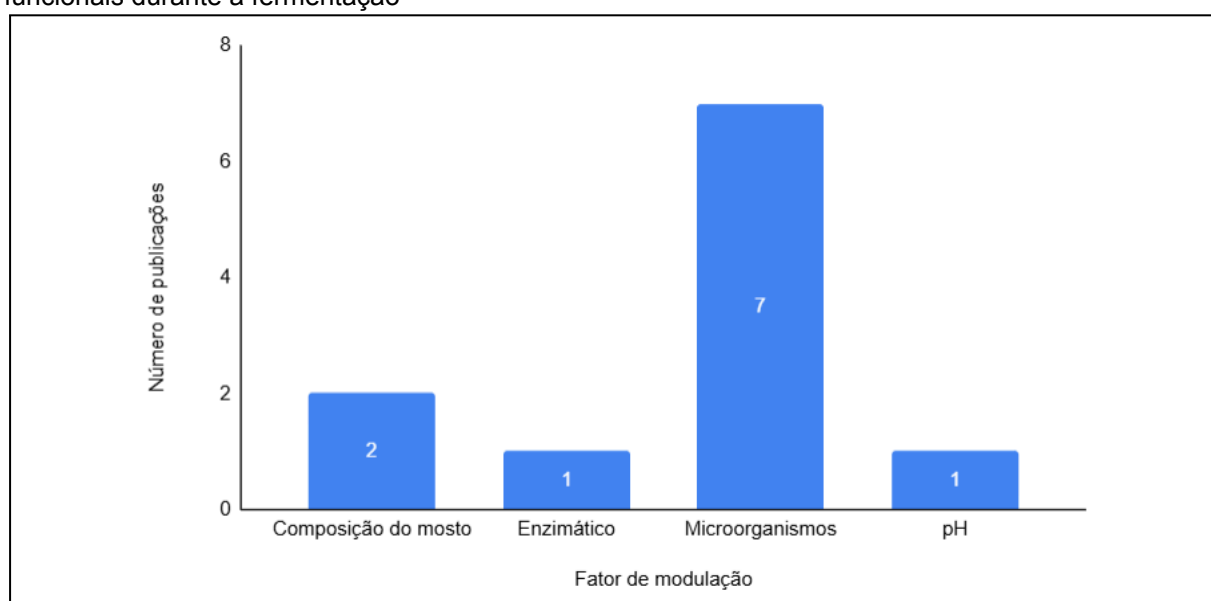
Gráfico 1 - Quantidade de publicações relacionadas a fatores de modulação de características sensoriais durante a fermentação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

O Gráfico 2 mostra uma quantidade de 11 publicações relacionadas a diferentes fatores de modulação de características funcionais durante o processo de fermentação. De acordo com o gráfico, o fator "Microorganismos" é o mais estudado, com 7 publicações, indicando um maior interesse ou relevância desse fator na modulação de características funcionais durante a fermentação. "Composição do mosto", "Enzimático" e "pH" apresentam apenas 1 publicação cada, sugerindo que esses fatores receberam menos atenção nas pesquisas comparadas.

Gráfico 2 - Quantidade de publicações relacionadas a fatores de modulação de características funcionais durante a fermentação



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Esse padrão sugere que, dentro do contexto de modulação de características funcionais durante a fermentação, os microorganismos desempenham um papel central ou têm um impacto significativo, enquanto os demais fatores são explorados de forma menos intensa.

## 5.1 Influência dos moduladores dos processos fermentativos

### 5.1.1 Influência enzimática

Apenas dois artigos foram encontrados, relacionando o uso de enzimas exógenas durante o processo de fermentação. Um artigo relatando a produção de

uma cerveja de baixo peso molecular através do uso de enzimas exógenas, possibilitando um produto que possa ser consumido por pacientes celíacos (Dulinsk *et al.*, 2018). Outro artigo relatando o aumento de açúcares fermentados após a suplementação de enzimas  $\beta$ -amilase (Espinosa-Ramírez *et al.*, 2014).

Uma das limitações deste estudo foi a dificuldade em encontrar publicações recentes que abordassem isoladamente a influência enzimática nos processos fermentativos. A maioria dos artigos disponíveis focava no metabolismo das leveduras, discutindo principalmente o funcionamento de suas vias metabólicas, ou a influência de outras moléculas ou fatores ambientais que influenciasses as enzimas, sem explorar métodos de otimização do processo ou a obtenção de produtos adicionais.

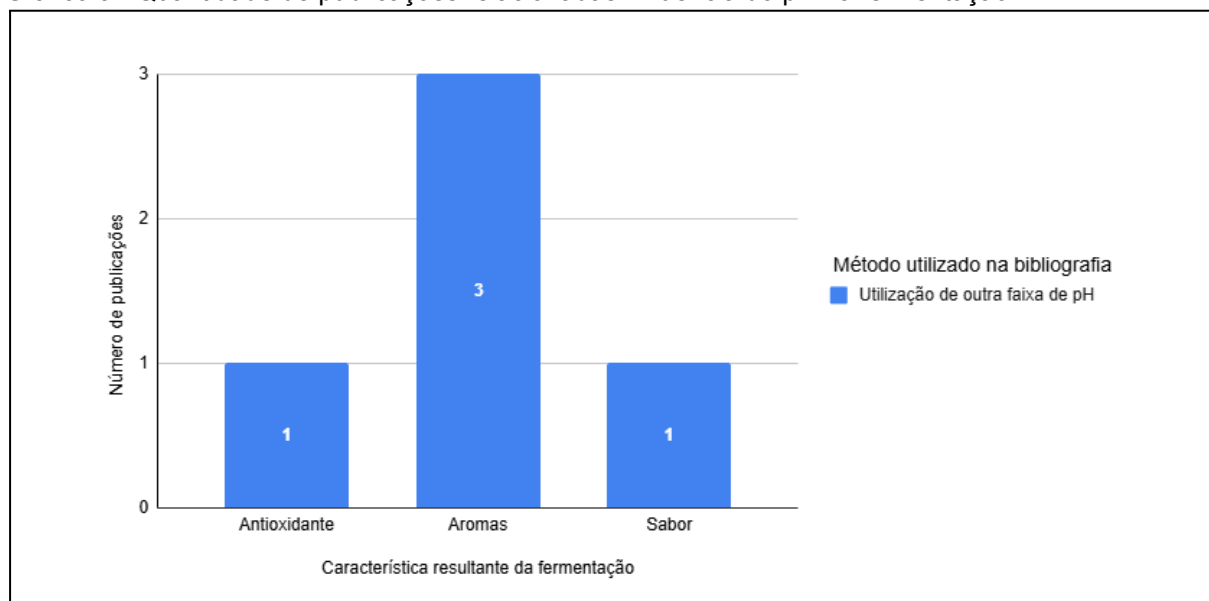
### 5.1.2 Influência do pH

Dos achados nas publicações o pH foi um fator modulador relativamente importante durante o processo de fermentação. Uma publicação relatou que conseguiu aumentar a biodisponibilidade e a eficiência de antioxidantes na cerveja, trabalhando em faixas mais ácidas do pH, assim permitindo a obtenção de um produto com características benéficas à saúde (Singha; Sharmab; Balapureb, 2007).

Outros estudos revelam a modulação de características sensoriais pelo pH, sendo elas o aroma favorecendo a liberação de compostos como DMTS e reduzindo off-flavors, como o trans-2-nonenal, melhorando aromas desejáveis, como coco. E o sabor, diminuindo a adstringência da cerveja em faixas de pH mais altas (Gus *et al.*, 2002 ; Derclek *et al.*, 2005).

O Gráfico 3 mostra a quantidade de publicações que abordam a influência do pH na fermentação, distribuídas conforme a característica resultante. As características analisadas incluem "Antioxidante," "Aromas" e "Sabor." Aromas foi a característica mais estudada, com 3 publicações mencionando a influência do pH sobre esse aspecto da fermentação. As características Antioxidante e Sabor tiveram apenas 1 publicação cada uma focando na influência do pH.

Gráfico 3 - Quantidade de publicações relacionadas influência do pH na fermentação



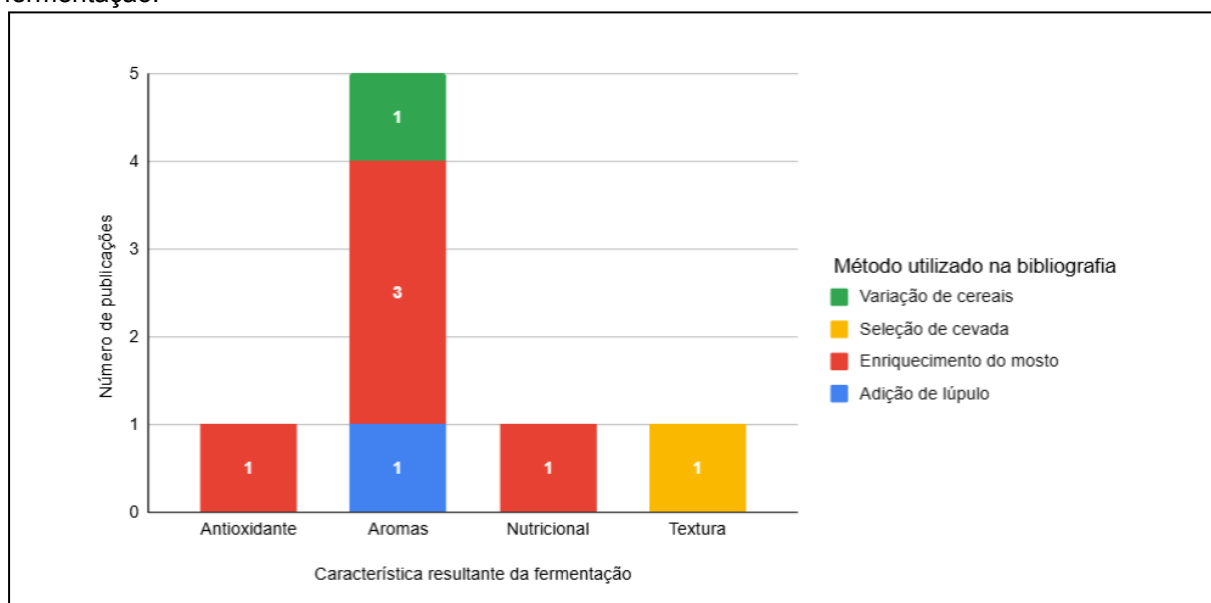
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

### 5.1.3 Influência da composição do mosto

A exploração da composição do mosto como modo de modular os processos fermentativos gerou publicações, com variadas metodologias. A utilização de variados tipos de cereais pode resultar na alteração do perfil aromático no produto final (Palombi *et al.*, 2023). Um cereal explorado foi a quinoa, que além de fornecer uma carga proteica maior ao produto final, melhorou a concentração de compostos fenólicos e flavonoides, elevando significativamente a atividade antioxidante da cerveja (Prasad C. G. *et al.*, 2022). Outra publicação que explora uma característica sensorial, sendo a textura, revelou que dependendo da seleção de cevada e o perfil de mosturação afetam o conteúdo e a estrutura do arabinosilano, permitindo modular a textura da cerveja.

O Gráfico 4 apresenta a quantidade de publicações que estudam a influência da composição do mosto na fermentação, distribuídas de acordo com as características resultantes, como "Antioxidante," "Aromas" e "Textura." Cada cor representa um método diferente utilizado na bibliografia: Aromas: Foi a característica mais explorada, com quatro métodos diferentes identificados (variação de cereais, suplementação do mosto e seleção de cevada), cada um representando uma publicação. Antioxidante: Uma publicação foi relacionada ao método de enriquecimento do mosto. Textura: Uma publicação foi relacionada ao método de adição de lúpulo.

Gráfico 4 - Quantidade de publicações relacionadas à influência da composição do mosto na fermentação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

O gráfico indica uma diversidade de abordagens (como variação de cereais, suplementação e adição de lúpulo) para investigar como a composição do mosto pode influenciar características específicas durante a fermentação, com "Aromas" sendo o foco predominante entre as publicações.

#### 5.1.4 Influência da Temperatura

Os estudos demonstram que leveduras conseguem trabalhar em diversas faixas de temperaturas, porém algumas preferem faixas de temperaturas mais baixas e outras mais altas. Isso impacta diretamente no perfil sensorial da cerveja, pois alguns compostos podem ter sua produção aumentada ou atenuada por conta do metabolismo da levedura específica usada na produção da cerveja.

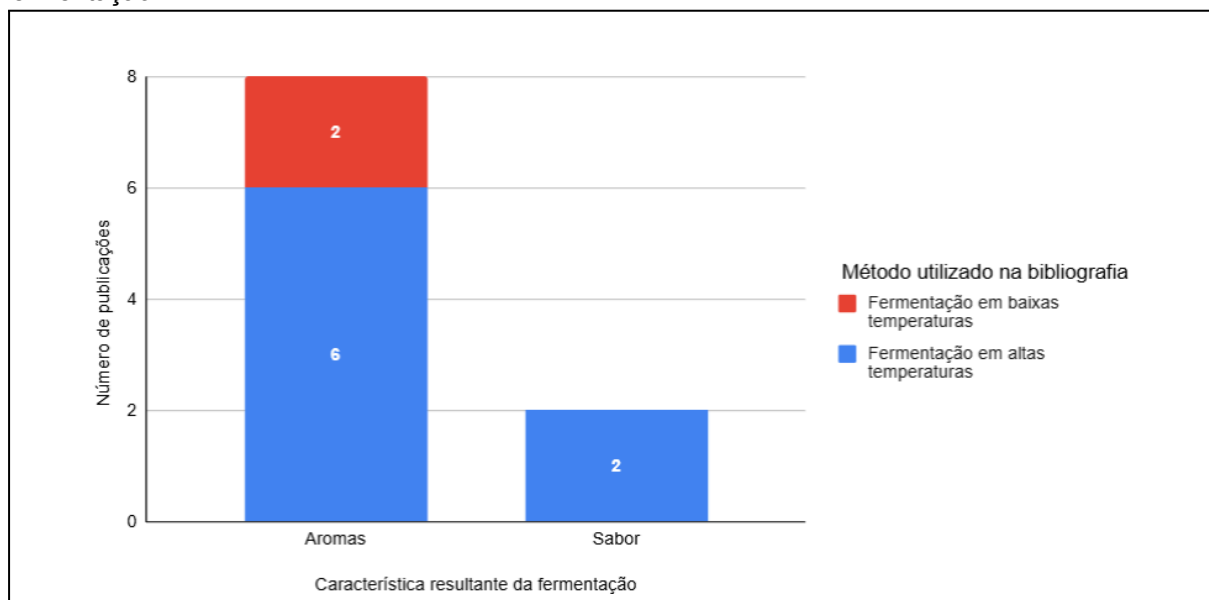
Entretanto, a maioria dos estudos encontrados, demonstram que temperaturas levemente altas, proporcionam um melhor perfil aromático à cerveja (Tyarawa *et al.*, 2019). Porém, um achado relata a utilização de uma faixa de temperatura extremamente alta comparada com as tradicionais, relatando a inibição do crescimento celular e gerando compostos indesejáveis, como acetaldeído e diacetil, que podem prejudicar a qualidade sensorial da cerveja (Woo *et al.*, 2014).

O Gráfico 5 apresenta a quantidade de publicações relacionadas às características sensoriais resultantes da fermentação, considerando diferentes métodos utilizados na bibliografia com foco na temperatura de fermentação.

**Aromas:** A maior quantidade de publicações (6) está associada à fermentação em altas temperaturas, indicando que esse método é amplamente estudado em relação à produção de aromas. A fermentação em baixas temperaturas é citada em 2 publicações, sugerindo menor atenção nesse aspecto.

**Sabor:** Fermentação em altas temperaturas possuem apenas 2 publicações cada, mostrando que há menor foco no impacto da temperatura sobre o sabor em comparação com os aromas.

Gráfico 5 - Quantidade de publicações relacionadas à influência da faixa de temperatura na fermentação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

### 5.1.5 Influência de microorganismos

A literatura tem demonstrado maior tendência em estudos que utilizam diversos tipos de microrganismos durante a produção de cerveja, dentre eles a utilização das clássicas *Saccharomyces cerevisiae* ou espécies variações híbridas da própria *Saccharomyces* (Nikulin; Krogerus; Gibson, 2017). Muitos outros estudos relatam a utilização de cepas puras de microrganismos não-*Saccharomyces*, como bactérias por exemplo *Lactobacillus* e fungos filamentosos como a *Alternaria* (Cottrell, 2022). Ou utilizando outras estratégias envolvendo esses



microorganismos, como no caso da co-cultura, onde duas cepas de diferentes microorganismo são adicionadas ao mosto no mesmo tempo (Domínguez-Tornay *et al.*, 2023). A starter culture onde primeiramente uma cepa é adicionada ao iniciando a fermentação, posteriormente outra cepa de é adicionada para promover algum atributo ao produto final da cerveja (Capece *et al.*, 2018).

O Gráfico 6 apresenta a quantidade de publicações relacionadas à influência do uso de microorganismos na fermentação, organizadas por características resultantes como "Antioxidante," "Aromas," "Probiótico" e "Sabor." Cada cor representa um método diferente de utilização de microorganismos na bibliografia.

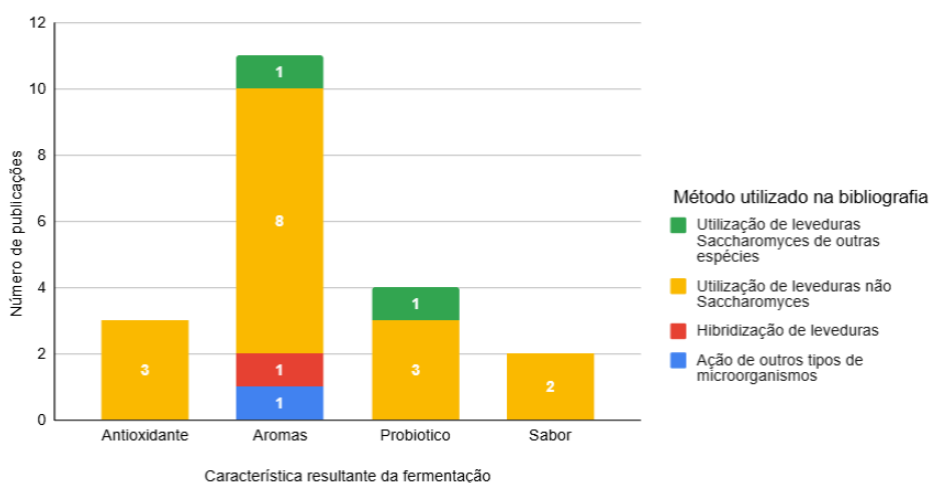
Aromas: É a característica mais estudada, com 11 publicações no total. Os métodos mais frequentemente associados a essa característica incluem:

- "Utilização de leveduras não *Saccharomyces*" com 8 publicações.
- "Utilização de leveduras *Saccharomyces* de outras espécies", "Hibridização de leveduras" e "Utilização de bactérias" com uma publicação cada.

Probiótico: Foram identificadas 4 publicações que exploram a função probiótica, com "Utilização de leveduras não *Saccharomyces*" (3 publicações) e "Utilização de bactérias" (1 publicação).

Antioxidante e Sabor: Cada uma dessas características tem publicações associadas à "Utilização de leveduras não *Saccharomyces*".

Gráfico 6 - Quantidade de publicações relacionadas à influência na utilização de microorganismos na fermentação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

## 6 CONCLUSÃO

Através da pesquisa realizada com base nos artigos analisados, foi possível aprofundar sobre o processo fermentativo na produção de cerveja e como as diferentes etapas anteriores a ele, impactam atributos de aromas, sabores e propriedades funcionais, resultando em cervejas de elevada qualidade e distintos estilos para o consumidor final.

Primeiramente, foi possível desvendar cada etapa da produção de cerveja até o processo de fermentação, identificando os fatores que modulam essas fases. Na malteação, a cevada e outros cereais envolvidos na mistura de grãos são germinados, o que permite a exposição do amido. Na etapa seguinte, ocorre a conversão de amidos complexos em açúcares menores, facilitando a fermentação posterior. A adição de lúpulo ou de outros adjuntos, como frutas, no processo de fervura trazem componentes aromáticos e benéficos à saúde, além de influenciar o metabolismo das leveduras e até a atividade de outros compostos presentes no mosto. Por fim, a fermentação, que é afetada pelas etapas anteriores, depende do rendimento de componentes no mosto, especialmente os açúcares fermentáveis e do tipo da cepa microorganismos utilizados, como diferentes linhagens de *Saccharomyces cerevisiae* ou *Brettanomyces*, define o perfil de fermentação, enquanto ajustes no processo permitem destacar ou minimizar atributos desejados.

A revisão integrativa revela que os estudos atuais estão focados na criação de cervejas com melhores atributos sensoriais, através do uso de leveduras e outros tipos de microrganismos não convencionais, que além de otimizarem o processo de produção, conseguem trazer resultados inovadores no perfil aromático da cerveja.

Além disso, há uma crescente expectativa de que a tecnologia e os processos fermentativos evoluem, tornando a cerveja uma fonte rica de componentes funcionais benéficos à saúde. Ingredientes como quinoa, chás e grãos não maltados já demonstram aumentar a atividade antioxidante da bebida, e a modulação de compostos bioativos durante a fermentação tem potencial para transformar a cerveja em um produto funcional.

Portanto, a participação de processos fermentativos desempenha um papel crucial na criação de cervejas inovadoras, que oferecem tanto experiências sensoriais únicas quanto benefícios funcionais à saúde, conectando tradição e

inovação para atender às novas demandas do mercado e promover o desenvolvimento de cervejas com atributos únicos e funcionais.

## REFERÊNCIAS

- ALAM, M.; ASHRAF, G. M.; SHEIKH, K.; KHAN, A.; ALI, S.; ANSARI, M. M.; ADNAN, M.; PASUPULETI, V. R.; HASSAN, M. I. Potential Therapeutic Implications of Caffeic Acid in Cancer Signaling: Past, Present, and Future. **Front Pharmacol**, Lausanne, v. 13, Artigo. 845871, March, 2022. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8959753/>. Acesso em: 11 set. 2024.
- AMAWI, H.; ASHBY, C. R.; SAMUEL, T.; PERAMAN, R.; TIWARI, A. K. Polyphenolic Nutrients in Cancer Chemoprevention and Metastasis: Role of the Epithelial-to-Mesenchymal (EMT) Pathway. **Nutrients**, Basel, v. 9, n. 8, p. 911, August, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28825675/>. Acesso em: 9 jun. 2024.
- BAMFORTH, C. W. **Beer**: Tapping into the Art and Science of Brewing. Edição 3. Oxford: Oxford University Press, 2009. Disponível em: [https://books.google.com.br/books/about/Beer.html?id=V3Sr4bbTH5oC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.br/books/about/Beer.html?id=V3Sr4bbTH5oC&redir_esc=y). Acesso em: 20 out. 2024.
- BASSO, R. F.; ALCARDE, A. R.; PORTUGAL, C. B. Could non-Saccharomyces yeasts contribute on innovative brewing fermentations? **Food Research International**, Ottawa, v. 68, p. 112-120, August, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996916302332>. Acesso em: 13 mar. 2024.
- BONATTO, D. The diversity of commercially available ale and lager yeast strains and the impact of brewer's preferential yeast choice on the fermentative beer profiles. **Food Research International**, Ottawa, v. 141, p. 1-12, January, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33641992/>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- BOOTS, A. W.; HAENEN, G. R.; BAST, A. Health effects of quercetin: from antioxidant to nutraceutical. **European Journal of Pharmacology**, Amsterdam, v. 585, n. 2-3, p. 325-37, May, 2008. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18417116/>. Acesso em: 22 abr. 2024.
- BRASIL. Instrução Normativa nº 65, de 10 de dezembro de 2019. Estabelece os padrões de identidade e qualidade para os produtos de cervejaria. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, edição 239, p. 31, 11 dez. 2019 Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-65-de-10-de-dezembro-de-2019-232666262>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- BUIATTI, S. Beer Composition: An Overview. In: Victor R. Preedy. **Beer in Health and Disease Prevention**. London: Academic Press, 2009. p. 213-225. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:93782190>. Acesso em: 12 mar. 2024.
- BURINI, J. A.; EIZAGUIRRE, J. I.; LOVISOC, C.; LIBKINDA, D. Levaduras no convencionales como herramientas de innovación y diferenciación en la producción de cerveza. **Revista Argentina de Microbiología**, Buenos Aires, v. 53, n. 4, p. 359-377, Diciembre, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0325754121000109>. Acesso em: 15 mar. 2024.

CALLEJO, M. J.; GONZALEZ, C.; MORATA, A. Use of Non-Saccharomyces Yeasts in Bottle Fermentation of Aged Beers. *In*: KANAUCHI, Makoto **Brewing Technology**. Miyagi, 2017. Disponível em:

<https://www.intechopen.com/chapters/55582>. Acesso em: 19 jul. 2024.

CANONICO, L.; ZANNINI, E.; CIANI, M.; COMITINI, F. Assessment of non-conventional yeasts with potential probiotic for protein-fortified craft beer production. **LWT - Food Sci. Technol.**, Georgia, v. 145, p. 111361, June, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643821005144?via%3Dihub>. Acesso em: 8 mar. 2024.

CAO, K. *et al.* Impact of non-Saccharomyces yeasts derived from traditional fermented foods on beer aroma: Analysis based on HS-SPME-GC/MS combined with chemometrics. **Food Research International**, Ottawa, v. 187, p. 114366, July, 2024. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996924004368?via%3Dihub>. Acesso em: 14 set. 2024.

CAPECE, A. *et al.* Use of Saccharomyces cerevisiae var. boulardii in co-fermentations with S. cerevisiae for the production of craft beers with potential healthy value-added. **International Journal of Food Microbiology**, Turim, v. 284, p. 22-30, November, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168160518303416>. Acesso em: 7 ago. 2024.

CASTRO, R. *et al.* Influence of different fermentation conditions on the analytical and sensory properties of craft beers: Hopping, fermentation temperature and yeast strain. **Journal of Food Composition and Analysis**, London, v. 106, March, 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889157521004786?via%3Dihub>. Acesso em: 30 jul. 2024.

CHEN, W. *et al.* Beer and beer compounds: physiological effects on skin health. **Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology**, Luxembourg, v. 28, art.104278, February, 2022. Disponível em:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23802910/>. Acesso em: 18 ago. 2024.

CHU, J. *et al.* Sinapic Acid Reduces Oxidative Stress and Pyroptosis via Inhibition of BRD4 in Alcoholic Liver Disease. **Front Pharmacol**, Lausanne, v. 12, art. 668708, June, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34149421/>. Acesso em: 17 mar. 2024.

COTTRELL, M. T. A Search for Diastatic Enzymes Endogenous to Humulus lupulus and Produced by Microbes Associated with Pellet Hops Driving “Hop Creep” of Dry Hopped Beer. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, Minnesota, v. 80, n. 3, p. 435-447, July, 2022. Disponível

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03610470.2022.2084327>. Acesso em: 18 ago. 2024.

CULVER, C. A.; WROLSTAD, R. E. Color Quality of Fresh and Processed Foods *In*: SHELLHAMMER, T.H.; BAMFORTH, C. W. **Assessing Color Quality of Beer**. v. 983. Oregon: American Chemical Society, 2008. Cap. 15, p. 192-202. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Assessing-Color-Quality-of-Beer-Shellhammer-Bamforth/d080634610b54ebbd8ae25efbdab90c94270870>. Acesso em 22 ago. 2024.

DACK, R. E. *et al.* The effect of Maillard reaction products and yeast strain on the synthesis of key higher alcohols and esters in beer fermentations. **Food Chemistry**, Oxford, v. 232, p. 595-601, October, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814617306143>. Acesso em: 18 ago. 2024.

DE SCHEPPER C. F.; COURTIN C. M. High mashing thickness negatively influences gelatinisation of small and large starch granules and starch conversion efficiency during barley malt brewing, **Food Hydrocolloids**, Oxford, v. 131, art. 107745, October 2022, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X2200265X>. Acesso em 28 mar. 2024

DEPEINT, F. *et al.* Mitochondrial function and toxicity: role of the B vitamin family on mitochondrial energy metabolism. **Chemico-Biological Interactions**, Limerick, v. 163, n. 1-2, p. 94-112, October 2006. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16765926/>. Acesso em: 18 jun. 2024.

DOMÍNGUEZ-TORNAY, A. *et al.* Co-fermentation of lactic acid bacteria and *S. cerevisiae* for the production of a probiotic beer: Survival and sensory and analytical characterization. **Food Bioscience**, Amsterdam v. 57, art. 103482, February. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429223011331>. Acesso em: 12 ago. 2024.

EVANS, D. E. *et al.* Profiling Malt Enzymes Related to Impact on Malt Fermentability, Lautering and Beer Filtration Performance of 94 Commercially Produced Malt Batches. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, Minnesota, v. 80, p. 413–426, September 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03610470.2021.1979891> 30 mar. 2024

FERK, F. *et al.* Xanthohumol, a prenylated flavonoid contained in beer, prevents the induction of preneoplastic lesions and DNA damage in liver and colon induced by the heterocyclic aromatic amine amino-3-methyl-imidazo[4,5-f]quinoline (IQ). **Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis**, Amsterdam, v. 691, n. 1-2, p. 17-22, September 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20547166/>. Acesso em: 3 mar. 2024.

FERREIRA, V.; LOPEZ, R. Proceedings from XIII Weurman Flavour Research Symposium *In*: SCHMIDT, C. et al. **LC-MS/MS Studies on the Influence of the pH Value on the Formation of Iso- $\alpha$ -Acid Degradation Products in Beer**. 1<sup>o</sup> ed. Cambridge: Academic Press, 2014. Cap. 111, p. 607-611. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123985491001112?via%3Dihub>. Acesso em: 29 jan. 2024

FERREIRA, V.; LOPEZ, R. Proceedings from XIII Weurman Flavour Research Symposium *In*: SMOGROVICOVA, D. **Formation of Beer Volatile Compounds at Different Fermentation Temperatures using Immobilized Yeasts**. 1<sup>o</sup>ed. Cambridge: Academic Press, 2014. Cap. 23, p. 129-131. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123985491000234?via%3Dihub>. Acesso em: 25 ago. 2024.

FRANÇOIS, N. *et al.* Beer astringency assessed by time–intensity and quantitative descriptive analysis: Influence of pH and accelerated aging. **Food Quality and Preference**, Oxford, v. 17, n. 6, p. 445-452, September 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950329305000807?via%3Dihub>. Acesso em: 29 ago. 2024.

GERHÄUSER, C. Beer constituents as potential cancer chemopreventive agents. **European Journal of Cancer**, Oxford, v. 41, n. 13, p. 1941-54, September 2005. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15953717/>. Acesso em: 19 ago. 2024.

GIJS, L.; CHEVANCE, F.; JERKOVIC, V.; COLLIN, S. How low pH can intensify  $\beta$ -damascenone and dimethyl trisulfide production through beer aging. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 50, n. 20, art. 020563, August 2002. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf020563p>. Acesso em: 5 set. 2024.

GOMES, F. O. Atividade Enzimática da Beta-Amilase em Cerveja Utilizando Diferentes Períodos de Repouso. *In*: CORDEIRO, C. A. M.; EVANGELISTA-BARRETO, N. S. **Ciência e Tecnologia de Alimentos: o Avanço da Ciência no Brasil**, 3. ed. Guarujá: Científica Digital, 2023. t. XI, p. 369-408. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/isbn/978-65-5360-167-3>. Acessado em 12 dec. 2023.

GRIECO, F. *et al.* Optimisation of quality features of new wheat beers fermented through sequential inoculation of non-Saccharomyces and Saccharomyces yeasts. **Heliyon**, Cambridge, v. 10, n. 18, art. e37598, September 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39309899/>. Acesso em: 12 jul. 2024.

GRUMEZESCU, A. M.; HOLBAN, A. M. The Science of Beverages *In*: SHOPSKA, V. **Kinetic Characteristics of Alcohol Fermentation in Brewing: State of Art and Control of the Fermentation Process**. 5<sup>a</sup> ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. Cap. 13, p. 529-575. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128152713000130>. Acesso em: 17 jan. 2024



GUTIÉRREZ, A. *et al.* Evaluation of non-Saccharomyces yeasts in the fermentation of wine, beer and cider for the development of new beverages. **Journal of the Institute of Brewing**, London, v. 124, n. 4, p. 389-402, September 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jib.512>. Acesso em: 17 ago. 2024.

GUYOT-DECLERCK, C. *et al.* Influence of pH and ageing on beer organoleptic properties. A sensory analysis based on AEDA data. **Food Quality and Preference**, Oxford, v. 16, n. 2, p. 157-162, March 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950329304000552?via%3Dihub>. Acesso em: 23 ago. 2024.

HAN, X. *et al.* Application of non-Saccharomyces yeasts with high  $\beta$ -glucosidase activity to enhance terpene-related floral flavor in craft beer. **Food Chemistry**, Oxford, v. 404, parte B, art. 134726, March 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814622026887?via%3Dihub>. Acesso em: 30 jul. 2024.

HINOJOSA-AVILA C. *et al.* Exploring the potential of probiotic-enriched beer: Microorganisms, fermentation strategies, sensory attributes, and health implications, **Food Research International**, Oxford, v. 175, art. 113717 January ,2024 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996923012656>. Acesso em 2 jun. 2024.

HLANGWANIA, E.; DU PLESSIS, H. W.; DLAMINIA, B. C. The effect of selected non-Saccharomyces yeasts and cold-contact fermentation on the production of low-alcohol marula fruit beer. **Heliyon**, Cambridge, v. 10, n. 2, art. e24505, January 2024. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)00536-X](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)00536-X). Acesso em: 21 set. 2024.

HIRALAL, L.; OLANIRAN, A. O.; PILLAY, B. Aroma-active ester profile of ale beer produced under different fermentation and nutritional conditions. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, Osaka, v. 117, n. 1, p. 57-64, January 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389172313002211?via%3Dihub>. Acesso em: 12 ago. 2024.

HOLT, S. *et al.* The molecular biology of fruity and floral aromas in beer and other alcoholic beverages. **FEMS Microbiology Reviews**, Cambridge, v. 43, n. 3, p. 193–222, May 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30445501/>. Acesso em: 12 mar. 2024.

HORNINK, G. P. **Princípios da produção cervejeira e as enzimas na mosturação**. 2ª edição, Alfenas, Universidade Federal de Alfenas, 2023. Disponível em: <https://www.unifal-mg.edu.br/bibliotecas/wp-content/uploads/sites/125/2022/05/Principios-da-producao-cervejeira-e-as-enzimas-na-mosturacao-2.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2024.

HUMIA B. V. *et al.* Beer Molecules and Its Sensory and Biological Properties: A



Review. **Molecules**. Basel, v. 25, art. 24081568, April 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/24/8/1568/>. Acesso em 15 jun. 2024.

JANG, S. *et al.* Sinapic acid alleviates inflammatory bowel disease (IBD) through localization of tight junction proteins by direct binding to TAK1 and improves intestinal microbiota. **Front Pharmacol**, Lausanne, v. 14, art. 1217111, August. 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37649894/>. Acesso em: 6 jul. 2024.

KALB V. *et al.* The Role of Endogenous Enzymes during Malting of Barley and Wheat Varieties in the Mitigation of Styrene in Wheat Beer. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 68 n. 47, November 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jafc.0c04837>. Acesso em 01 mai. 2024.

KARABÍN, M. *et al.* Enhancing the performance of brewing yeasts. **Biotechnology Advances**, Oxford, v. 36, n. 3, p. 691-706, June 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29277309/>. Acesso em: 13 mar. 2024.

KERR, W. C.; STOCKWELL, T. Understanding standard drinks and drinking guidelines. **Drug and Alcohol Review**, Melbourne v. 31, n. 2, p. 200-205, March 2012. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1465-3362.2011.00374.x>. Acesso em: 11 mar. 2024.

KIRKPATRICK, K. R.; SHELLHAMMER, T. H. Evidence of dextrin hydrolyzing enzymes in Cascade hops (*Humulus lupulus*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 66, n. 34, August 2018. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jafc.8b03563>. Acesso em: 31 jul. 2024.

LARROQUE, M. N. *et al.* Effect of *Saccharomyces* and non-*Saccharomyces* native yeasts on beer aroma compounds. **International Journal of Food Microbiology**, Turim, v.1, p. 1-42, October 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108953>. Acesso em: 12 mar. 2024.

LASANTA, C. *et al.* Influence of fermentation temperature and yeast type on the chemical and sensory profile of handcrafted beers. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, West Sussex v. 101, n. 3, p. 1174-1181, February 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32789862/>. Acesso em: 21 jul. 2024.

LIMA, L. Comparing the impact of environmental factors during very high gravity brewing fermentations. **Journal of the Institute of Brewing**, London, v. 117, n. 3, p. 359-367, May 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/j.2050-0416.2011.tb00480.x>. Acesso em: 22 jun. 2024

LU, X. *et al.* Analysis of the Formation of Characteristic Aroma Compounds by Amino Acid Metabolic Pathways during Fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*. **Molecules**, Basel, v. 28, n. 7, p. 3100, March 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/7/3100>. Acesso em: 15 abr. 2024.

LYON, P. *et al.* Vitamins and One-Carbon Metabolism: Implications in Human Health and Disease. **Nutrients**, Basel, v. 12, n. 9, art. 2867, September 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32961717/>. Acesso em: 12 abr. 2024.

MANGELS, D. R.; MOHLER, E. R. 3rd. Catechins as Potential Mediators of Cardiovascular Health. **Arterioscler Thromb Vasc Biol**, Philadelphia v. 37, n. 5, p. 757-763, May 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28336557/>. Acesso em: 5 jul. 2024.

MIANO, A.; AUGUSTO P. The Hydration of Grains: A Critical Review from Description of Phenomena to Process Improvements. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Malden, v. 17, n. 2, p. 352-370, March 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33350085/>. Acesso em: 20 mar 2024

MICHIELS, P. *et al.* Enhancing the mouthfeel of non-alcoholic beers: The influence of dextrin and arabinoxylan on perceived viscosity and body. **Food Hydrocolloids**, Oxford, v. 159, art. 110642, February 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110642>. Acesso em: 18 jul. 2024.

MIGUEL, G. A. *et al.* Non-Saccharomyces yeasts for beer production: Insights into safety aspects and considerations. **International Journal of Food Microbiology**, Turim, v. 383, art. 109951, December 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36240605/>. Acesso em: 12 mar. 2024.

MIKYŠKA, A.; JURKOVÁ, M. Study on the effect of malt and decoction mashing on polyphenols and antiradical power of wort. **KVASNY PRUMYSL**, Praga, v. 70, p. 846-854, February, 2024. Disponível em: <https://kvasnyprumysl.eu/index.php/kp/article/view/303> Acesso em: 12 abr. 2024.

MODZELEWSKA, A.; JACKOWSKI, M.; TRUSEK, A. Optimization of beer mixed fermentation using *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus brevis*. **European Food Research and Technology**, New York, v. 249, p. 3261-3269, September 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00217-023-04365-z>. Acesso em: 2 jul. 2024.

MOTTA, J. F. G. Use of enzymes in the food industry: a review. **Food Science and Technology**, Basel, v. 43, art. 106222, December. 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/7RzPQGJnrPgWgzMsTCrKTjK/?lang=en>. Acesso em 17 jun 2023.

NARDINI, M.; GARAGUSO I. Characterization of bioactive compounds and antioxidant activity of fruit beers, **Food Chemistry**, Oxford, v. 305, art. 125437, February 2020, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814619315523>. Acesso em: 22 ago. 2024

NIKULIN, J.; KROGERUS, K.; GIBSON, B. Alternative *Saccharomyces* interspecies hybrid combinations and their potential for low-temperature wort fermentation. **Yeast**,

West Sussex, v. 35, n. 1, p. 113-127, January 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28755430/>. Acesso em: 9 set. 2024

OLADOKUN, O. *et al.* The impact of hop bitter acid and polyphenol profiles on the perceived bitterness of beer, **Food Chemistry**, Oxford, v. 205, p. 212-220, August 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814616303740> Acesso em: 19 jul. 2024

OSORIO-PAZ, I.; BRUNAUER, R.; ALAVEZ, S. Beer and its non-alcoholic compounds in health and disease. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Philadelphia, v. 60, n. 20, p. 3492-3505, November 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31782326/>. Acesso em: 25 set. 2024.

PIGGOTT, J. Alcoholic Beverages: Sensory Evaluation and Consumer Research *In*: PARKER D.K. **Beer**: production, sensory characteristics and sensory analysis. 1º ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. Cap 6, p. 133-158. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090515500067>. Acesso em 13 abr. 2024

PIMENTA, L. B. *et al.* A história e o processo da produção da cerveja: uma revisão. **Cadernos de Ciência and Tecnologia**, Pernambuco, v. 37, n. 3, art. 26715, Novembro 2020. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/26715>. Acesso em: 13 mai. 2024.

PULIGUNDLA, P. Recent developments in high gravity beer-brewing. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, Oxford, v. 64, art. 102399, August 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856420303453>. Acesso em: 07 out 2023.

RAMANAN, M.; FOX, G. P. L.; MARCO, M. L. Beer for live microbe delivery, **Journal of Functional Foods**, Amsterdam, v. 113, art. 105987, February 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175646462300587X>. Acesso em: 13 jul. 2024

ROSA, N. A.; AFONSO, J. C. A química da cerveja. **Química Nova Interativa**. São Paulo, v. 37, p. 98-105, 2015. Disponível em: <https://qnint.sbg.org.br/novo/index.php?hash=tema.89>. Acesso em 139 set. 2024

ROYCHOUDHURY, S. *et al.* Scavenging Properties of Plant-Derived Natural Biomolecule Para-Coumaric Acid in the Prevention of Oxidative Stress-Induced Diseases. **Antioxidants**, Basel, v. 10, art. 10081205, July 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3921/10/8/1205>. Acesso em: 23 maio 2024.

PRASAD, D. C. G. *et al.* Influence of *Pichia myanmarensis* in fermentation to produce quinoa based non-alcoholic beer with enhanced antioxidant activity. **Journal of Cereal Science**, London, v. 103, art. 103390, January 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521021002319?via%3Dihub>. Acesso em: 14 jul. 2024.

SAMPAOLESI, S. *et al.* Identification and assessment of non-conventional yeasts in mixed fermentations for brewing bioflavored beer. **International journal of food microbiology**. v. 399, art. 110254, May 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110254>. Acesso em: 12 mar. 2024.

SAERENS, S. M. *et al.*, Production and biological function of volatile esters in *Saccharomyces cerevisiae*. **Microbial Biotechnology**. New Jersey, v. 3, n. 2, p. 165–177, March 2020 Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3836583/>. Acesso em: 2 jun. 2024.

SCHMIDT, C. V.; OLSEN, K.; MOURITSEN, O. G.; Umami potential of fermented beverages: Sake, wine, champagne, and beer, **Food Chemistry**, Oxford, v. 360, art. 128971, October 2021, Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814620328557>. Acesso em 24 ago. 2024

SCHWARZ, J. S.; BOITZ, L. I.; METHNER, F. Release of Phenolic Acids and Amino Acids during Mashing Dependent on Temperature, pH, Time, and Raw Materials. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, Minnesota, v. 70, n. 4, p. 290–295, February 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1094/ASBCJ-2012-1011-02?scroll=top&needAccess=true>. Acesso em: 25 mar 2024.

SILVA, L. C. *et al.* Use of probiotic strains to produce beers by axenic or semi-separated co-culture system. **Food and Bioproducts Processing**, Rugby v. 124, p. 408-418, November 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308520305289>. Acesso em: 19 set. 2024.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA CERVEJA – SINDICERV. **Do campo ao copo, a cerveja rende um papel vital na economia brasileira**. [2023]. Disponível em: <https://www.sindicerv.com.br/noticias/do-campo-ao-copo-a-cerveja-rende-um-papel-vital-na-economia-brasileira/#:~:text=O%20mercado%20da%20bebida%2C%20portanto,ano%2C%20segundo%20estudo%20da%20FGV>. Acesso em: 11 mar. 2024.

SINGH, N.; SHARMA, R.; BALAPURE, A. K. pH regulated scavenging activity of beer antioxidants through modified DPPH assay. **Toxicology and Industrial Health**, California, v. 23, n. 2, p. 75-81, March 2007. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18203559/>. Acesso em: 19 jul. 2024.

SONG, L. *et al.*, Exploring non-*Saccharomyces* yeasts from Daqu for beer production. **LWT - Food Sci. Technol.**, v. 209, art. 116803, October 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643824010867?via%3Dihub>. Acesso em: 25 set. 2024.

TAKOI, K. *et al.* Biotransformation of Hop-Derived Monoterpene Alcohols by Lager Yeast and Their Contribution to the Flavor of Hopped Beer. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 58, n. 8, art. 1000524, April 2010. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf1000524>. Acesso em: 10 set. 2024.

TOH, D. W. K. *et al.* Evaluation of the potential of commercial non-Saccharomyces yeast strains of *Torulaspora delbrueckii* and *Lachancea thermotolerans* in beer fermentation. **International Journal of Food Science and Technology**, Cambridge, v55, n. 5, p. 2049-2059, October 2019. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ijfs.14399>. Acesso em: 15 jul. 2024.

TYRAWA, C. *et al.* The temperature dependent functionality of *Brettanomyces bruxellensis* strains in wort fermentations. **Journal of the Institute of Brewing**, London, v. 125, n.3, p. 315-325, June 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jib.565>. Acesso em: 19 set. 2024.

WALKER, G. M.; STEWART, G. G. *Saccharomyces cerevisiae* in the Production of Fermented Beverages. **Beverages**, Basel, v.2, n.4, p. 30, October 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5710/2/4/30>. Acesso em: ago 2024

WOO, J. M. *et al.* High temperature stimulates acetic acid accumulation and enhances the growth inhibition and ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* under fermenting conditions. **Applied Microbiology and Biotechnology**, New York, v. 98, n. 13, p. 6085-6094, July 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24706214/>. Acesso em: 14 ago. 2024.

WU, D. *et al.* Coculturing of non-Saccharomyces *cerevisiae* and *Saccharomyces cerevisiae* for improving the aroma quality and antioxidant characteristics of beer with Yuan'an yellow tea. **Food Bioscience**, Amsterdam, v. 58, art. 103725, April 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221242922400155X?via%3Dihub>. Acesso em: 26 ago. 2024.

YOUNG, J.; OAKLEY, W. R. M.; FOX, G. *Humulus lupulus* and microbes: Exploring biotic causes for hop creep. **Food Microbiology**, London, v. 114, art. 104298, September 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37290874/>. Acesso em: 13 mar. 2024.

ZHANG, W. *et al.* More efficient barley malting under catalyst: Thermostability improvement of a  $\beta$ -1,3-1,4-glucanase through surface charge engineering with higher activity. **Enzyme and Microbial Technology**, New York, v. 162, art. 110151, January 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141022922001703?via%3Dihub>. Acesso em: 1 jan. 2023.

