

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GENÉTICA E BIOQUÍMICA
CURSO DE BIOTECNOLOGIA

Novas leveduras para produção de cerveja: não cerevisiae, farmhouse e híbridas

Leonardo Augusto Corrêa Quirino

Monografia apresentada à Coordenação do
Curso de Biotecnologia, da Universidade
Federal de Uberlândia, para obtenção do grau
de Bacharel em Biotecnologia.

Uberlândia - MG
Maio 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GENÉTICA E BIOQUÍMICA
CURSO BIOTECNOLOGIA

Novas leveduras para produção de cerveja: não cerevisiae, farmhouse e híbridas

Leonardo Augusto Corrêa Quirino

Edgar Silveira Campos

Monografia apresentada à Coordenação do
Curso de Biotecnologia, da Universidade Federal
de Uberlândia, para obtenção do grau de
Bacharel em Biotecnologia.

Uberlândia – MG

Maio - 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GENÉTICA E BIOQUÍMICA
CURSO BIOTECNOLOGIA

Novas leveduras para produção de cerveja: não cerevisiae, farmhouse e híbridas

Leonardo Augusto Corrêa Quirino

Edgar Silveira Campos

Homologado pela coordenação do Curso de
Biotecnologia em __/__/__

Nilson Nicolau Junior

Uberlândia – MG

Maio - 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GENÉTICA E BIOQUÍMICA
CURSO DE BIOTECNOLOGIA

Novas leveduras para produção de cerveja: não cerevisiae, farmhouse e híbridas

Leonardo Augusto Corrêa Quirino

Aprovado pela Banca Examinadora em: 15 /05 /2025 Nota: 80

Nome e assinatura do Presidente da Banca Examinadora

Uberlândia, 12 de Maio de 2025

Resumo

A levedura *Saccharomyces cerevisiae* tem sido tradicionalmente utilizada na produção de cerveja devido à sua eficiência fermentativa e previsibilidade. No entanto, com o crescimento do mercado de cervejas artesanais e a busca por inovação sensorial e tecnológica, novas espécies de leveduras vêm ganhando destaque. Esta monografia apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso de leveduras não convencionais na produção de cerveja, com foco em leveduras não-*cerevisiae*, híbridas e as tradicionais farmhouse do tipo Kveik. São discutidos os aspectos microbiológicos, fermentativos e sensoriais dessas leveduras, bem como seus potenciais e desafios para a aplicação industrial. A análise revelou que espécies como *Brettanomyces*, *Lachancea*, *Candida* e *Pichia* possuem características desejáveis para a diversificação de estilos, enquanto os híbridos oferecem vantagens combinadas de diferentes linhagens. Já as leveduras Kveik se destacam por sua fermentação rápida em altas temperaturas e perfil sensorial único. Conclui-se que a exploração dessas novas leveduras representa uma tendência promissora na biotecnologia cervejeira, capaz de agregar valor ao produto final e ampliar o repertório técnico dos produtores.

Palavras-chave: levedura não convencional; fermentação; *Saccharomyces*; cerveja artesanal; Kveik; híbridos; biotecnologia.

Abstract

Saccharomyces cerevisiae has been traditionally used in beer production due to its high fermentation efficiency and predictability. However, with the growth of the craft beer market and the search for sensory and technological innovation, new yeast species have gained attention. This monograph presents a literature review on the use of non-conventional yeasts in beer production, focusing on non-*cerevisiae* species, hybrid strains, and traditional farmhouse yeasts such as Kveik. Microbiological, fermentative, and sensory aspects of these yeasts are discussed, as well as their potential and challenges for industrial application. The analysis revealed that species such as *Brettanomyces*, *Lachancea*, *Candida*, and *Pichia* have desirable characteristics for style diversification, while hybrids offer the combined advantages of different lineages. Kveik yeasts stand out for their fast fermentation at high temperatures and their unique sensory profile. It is concluded that the exploration of these new yeasts represents a promising trend in brewing biotechnology, capable of enhancing quality and distinctiveness of the final product and broadening the technical capabilities of brewers.

Keywords: non-conventional yeast; fermentation; *Saccharomyces*; craft beer; Kveik; hybrids; biotechnology.

Sumário

1. Introdução	1
2. Aspectos gerais da fermentação cervejeira	1
2.1 Processo produtivo da cerveja	1
2.2 Composição do mosto e nutrientes para leveduras	2
2.4 Leveduras cervejeiras tradicionais	3
2.5 Metabolismo fermentativo da <i>S. cerevisiae</i>	3
2.6 Reutilização de leveduras e mutações	6
3. Novas leveduras para a produção de cerveja	7
3.1 Critérios para seleção de novas leveduras	7
4. Leveduras não- <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	8
4.1 <i>Brettanomyces</i>	9
4.2 <i>Pichia</i>	10
4.3 <i>Candida</i>	11
4.4 <i>Lachancea</i>	11
5. Leveduras híbridas	14
5.1 Conceito e importância	14
5.2 Exemplos de híbridos aplicados à cerveja	15
5.3 Desafios e potencial biotecnológico	16

6. Leveduras Farmhouse – Kveik	19
6.1 Origem e domesticação	19
6.2 Processo tradicional de produção	19
6.3 Principais linhagens: Voss, Hornindal, Stranda, etc.	21
6.4 Aplicações sensoriais e industriais	24
 7. Conclusão	 26
 8. Referências	 28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do processo de fermentação alcoólica5

Figura 2 – Processo produtivo da cerveja6

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP – Adenosina Trifosfato

FAN – Free Amino Nitrogen (Nitrogênio Assimilável Livre)

Kveik – Levedura tradicional norueguesa do tipo farmhouse

POF – Phenolic Off-Flavor (sabor fenólico indesejado)

S. cerevisiae – *Saccharomyces cerevisiae*

S. pastorianus – *Saccharomyces pastorianus*

1. Introdução

Bebidas fermentadas desenvolveram um papel fundamental e especial pelo decorrer da história da humanidade devido às suas funções culturais e econômicas e talvez, sendo causadoras do início da civilização moderna (HISTORY OF BEER AND BREWING, 2003). Evidências arqueológicas situam no crescente fértil, as bebidas fermentadas mais antigas, datando até 11000 aC (BRUNER; FOX, 2020), e baseado nas evidências da agricultura da época, estas bebidas provavelmente eram cerveja.

Mesmo que tenha sido uma descoberta provavelmente acidental, hoje em dia a cerveja é uma das bebidas mais complexas e diversas de se produzir. Uma mistura elaborada entre arte e ciência que levou a vários marcos no avanço científico (BRUNER; MARCUS; FOX, 2021). Como a ciência continua a se desenvolver, novos avanços são possíveis no âmbito da produção da cerveja. Podendo assim, melhorar a produção, a qualidade e estabilidade da cerveja. No entanto, pouco avanço é obtido em relação aos quatro ingredientes básicos da cerveja, água, malte, lúpulo e levedura.

2. Aspectos gerais da fermentação cervejeira

2.1 Processo produtivo da cerveja

A produção da cerveja pode ser dividida em duas etapas, quente e fria. A parte quente se inicia quando o malte de cevada é moído e adicionado em água quente, entre 40 °C e 70 °C para que seu amido seja hidrolisado, liberando maltose, maltotriose e dextrinas. Este processo é chamado de mosturação e dá origem ao líquido açucarado denominado de mosto, que contém os nutrientes necessários para a replicação e fermentação da levedura.

Parte-se então para a próxima etapa na qual o mosto será fervido e adicionado lúpulo para a isomerização de alfa ácidos que configuram amargor para a cerveja, a solubilização de compostos aromáticos, e para a sanitização do mosto.

2.2 Composição do mosto e nutrientes para leveduras

Saindo da parte quente para a parte fria do processo produtivo, o mosto é resfriado até a temperatura ideal para a inoculação da levedura, que irá metabolizar de 50 até 90% dos açúcares e nutrientes presentes no mosto e deixando para trás, proteínas metabolizadas, oligossacarídeos e outros compostos que podem ou não afetar o perfil organoléptico e físico-químico da cerveja final.

O perfil de açúcares e proteínas presentes no mosto varia de acordo com os tipos de maltes e adjuntos presentes durante a mosturação e de acordo com a temperatura de mostura que consegue favorecer enzimas diferentes na hidrolização do amido e das proteínas (MALLETT, 2014).

A complexidade do mosto, em comparação a outros meios usados na produção de álcool fermentado, cria um ambiente único e rico para a levedura. Quando inoculada no mosto, a levedura encontra uma diversidade de nutrientes, incluindo açúcares simples, dextrinas, aminoácidos, peptídeos, proteínas, vitaminas e íons, essenciais para o processo de fermentação. Esse conjunto de nutrientes, especialmente o FAN (Free Amino Nitrogen), que consiste em aminoácidos do mosto, íons de amônio e pequenos peptídeos, fornece nitrogênio assimilável crucial para a fermentação. Estudos avançados em ciência cervejeira ao longo das últimas décadas ajudaram a desvendar como as células de levedura utilizam ordenadamente esses nutrientes (MALLETT, 2014; BRAUNS, 2013; WHITE & ZAINASHEFF, 2010).

2.3 Comparativo com outros mostos (vinho e sidra)

Na produção de vinho, o mosto produzido a partir da uva contém em sua maior parte frutose e glicose, apresentando uma pequena quantidade de açúcares mais complexos como as pentoses (WATERHOUSE; SACKS; JEFFERY, 2018). Aminoácidos essenciais para o crescimento e fermentação das leveduras apresentam-se em baixas quantidades e comumente é necessária a suplementação de fosfato de diamônio para que haja uma fermentação bem sucedida (WATERHOUSE; SACKS; JEFFERY, 2016).

Assim como na produção de vinho, o mosto produzido a partir da maçã para a produção de sidras é rico em frutose e glicose. Contendo baixas concentrações de açúcares mais complexos, aminoácidos livres e lipídios essenciais para o crescimento celular e fermentação alcoólica (DACCACHE et al., 2020).

2.4 Leveduras cervejeiras tradicionais

Em maior parte da história da produção da cerveja a levedura usada para a fermentação alcoólica foi a *Saccharomyces cerevisiae*. No entanto, a primeira cultura isolada da produção de cerveja foi a *S. carlsbergensis* posteriormente renomeada de *Saccharomyces pastorianus*.

2.5 Metabolismo fermentativo da *S. cerevisiae*

Para a fermentação alcoólica, a levedura deve ser inoculada seguindo uma taxa de um milhão de células por mililitro por porcentagem de açúcar presente no mosto. Quando inoculada na concentração correta, a *S. cerevisiae* utilizará os dissacarídeos produzidos na parte quente do processo e os converterá em gás carbônico e etanol anaerobicamente. Além do CO₂ e do etanol, também podem ser produzidos mais de 600 compostos ativos de sabor durante a fermentação dependendo do tipo de cerveja produzida e da cepa de levedura utilizada.

A levedura utiliza da via anaeróbica da glicólise, mas quando oxigênio está presente no mosto, há a reprodução celular por brotamento (WHITE; ZAINASHEFF, 2010)

No primeiro estágio da fermentação alcoólica, a levedura assimila primeiramente açúcares simples e posteriormente os mais complexos, seguindo a ordem: glicose, frutose, sacarose, maltose e maltotriose. A presença de glicose no mosto suprime a utilização dos outros açúcares, pois ela é absorvida pela célula por difusão facilitada. Isso faz com que seja consumida primeiramente. Todas as leveduras cervejeiras têm a capacidade de utilizar maltose como substrato para fermentação anaeróbica, mas nem todas conseguem metabolizar maltotriose.

A habilidade da levedura conseguir fermentar ou não os diferentes açúcares e nutrientes presentes no mosto é um ponto indispensável na caracterização do metabolismo e utilização da levedura para produção de diferentes cervejas.

Absorvida, a glicose será glicosilada anaerobicamente, gerando duas moléculas de piruvato, que na presença de oxigênio será transportado para a mitocôndria e a célula seguirá a via de respiração celular e reprodução por brotamento. Na ausência do oxigênio, o piruvato será reduzido a acetaldeído pela enzima piruvato descarboxilase e o acetaldeído será reduzido a etanol pela enzima álcool desidrogenase (BOULTON, 2020).

Outra maneira que as leveduras podem fermentar anaerobicamente mesmo na presença de oxigênio é o efeito crabtree, que é o mais comum na fermentação de cerveja. Ele ocorre quando a concentração de glicose no meio é elevada (0,4%) e a grande quantidade de enzimas glicolíticas presentes faz com que a produção de Adenosina Trifosfato (ATP) seja mais rápida pela via anaeróbica do que pelo ciclo de Krebs (URK et al., 1990).

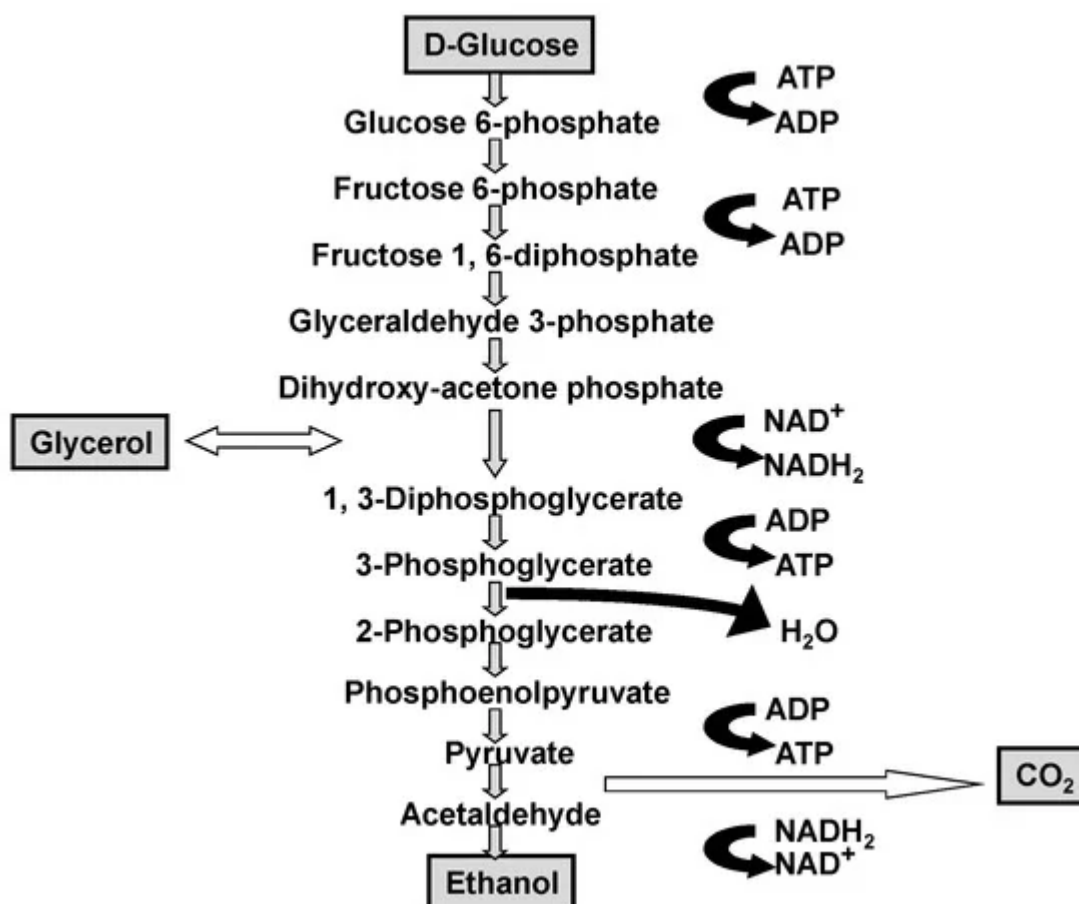


Figura 1 – Ilustração do processo de fermentação alcoólica

Fonte: STEWART, Graham G. *Saccharomyces species in the Production of Beer*.4o

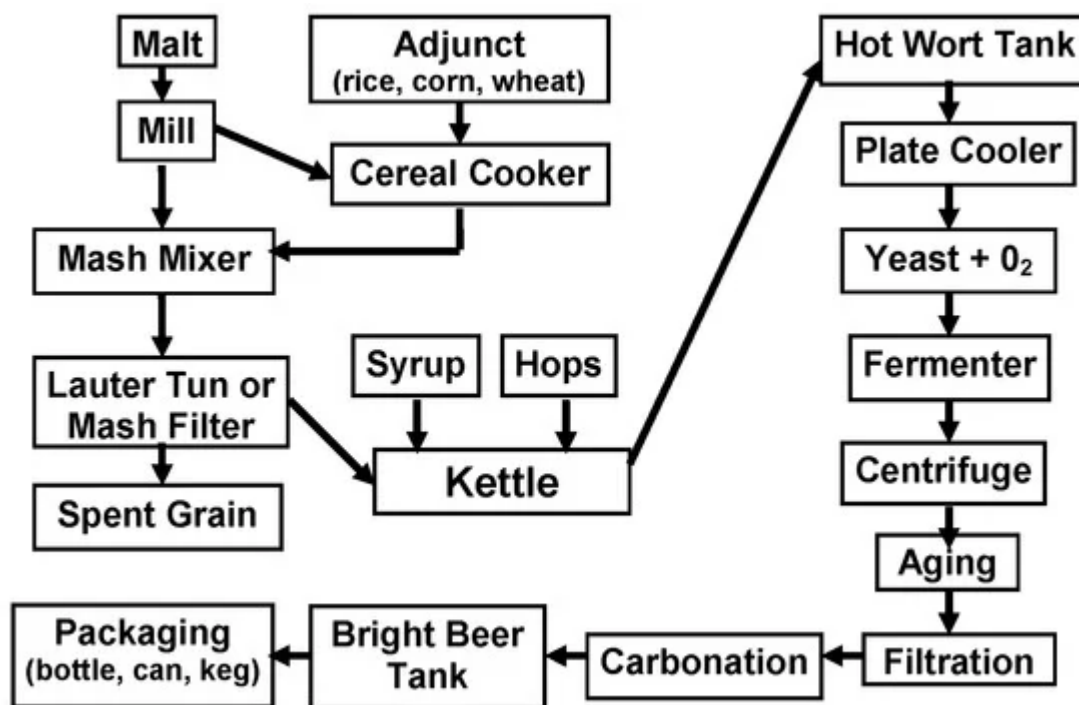


Figura 2 processo produtivo da cerveja

Fonte: STEWART, Graham G. *Saccharomyces species in the Production of Beer*.

2.6 Reutilização de leveduras e mutações

Na fabricação de cerveja, a levedura é comumente reutilizada chegando a 10 ou mais re inoculações subsequentes, enquanto na produção de vinho e cidra um inóculo é usado menos vezes devido às condições mais estressantes à levedura devido à falta de nutrientes, alto teor de etanol ou presença de outros microrganismos. Tais fatores levam a um alto grau de mortalidade da levedura na produção dessas bebidas se comparado com o mosto cervejeiro que possui muito mais nutrientes e um meio menos hostil em uma produção convencional de cerveja (KIRSOP; BROWN, 1972). Na maioria dos casos, esta reutilização em série causa mutações genéticas que podem alterar o perfil fermentativo e organoléptico contribuído à cerveja pela levedura (WANG et al., 2019).

3. Novas leveduras para a produção de cerveja

Nos últimos anos, com o crescimento do setor de cervejas consideradas artesanais, cervejeiros procuram cada vez mais leveduras diferentes, *Saccharomyces* ou não, para a produção de suas bebidas. Seja com o intuito de produzir em tempo reduzido, mantendo o perfil sensorial, ou com condições de temperatura de fermentação diferentes, ou até mesmo a reutilização da levedura por mais gerações, esta procura se baseia no objetivo de produzir cervejas únicas e de qualidade que se destaquem no mercado (IATTICI; CATALLO; SOLIERI, 2020). Isto é essencial para a conquista de novas fatias de mercado tanto no âmbito da qualidade das cervejas quanto na eficiência da produção e redução dos custos para conseguir melhor competitividade (GARAVAGLIA; SWINNEN, 2020).

A cepa de levedura mais usada no meio cervejeiro seja *S. pastorianus* na produção de cervejas do tipo lager (VRIES; PRONK; DARAN, 2019), esta revisão irá se focar em novas cepas como *Lachancea ssp.* para produção de cervejas de baixo teor alcoólico, leveduras norueguesas domesticadas usadas na produção de cervejas farmhouse tradicionais históricas e leveduras híbridas.

3.1 Critérios para seleção de novas leveduras

Na seleção de leveduras novas para a fermentação, o cervejeiro deve levar em consideração a atenuação (quantidade de açúcar consumida pela levedura), floculação (a habilidade da levedura de se aglutinar e sair de suspensão), faixa ideal de temperatura de fermentação, cinética de fermentação (idealmente rápida), efeito no perfil sensorial final da cerveja, capacidade de reutilização em série e disponibilidade comercial. Estas características, além de fatores morfológicos, hibridização e estabilidade genética auxiliam o cervejeiro a escolher e adotar uma nova cepa de levedura para a produção de suas cervejas.

4.0 Leveduras não-*Saccharomyces cerevisiae*

O mercado cervejeiro tem experienciado um aumento nas pesquisas relacionadas à obtenção e caracterização de novas leveduras não *cerevisiae*, fenômeno causado por vários fatores, dentre eles, o efêmero gosto e desejo dos consumidores por novas cervejas com perfis sensoriais diferentes. (BRUNER; FOX, 2020).

Por muito tempo, o uso de leveduras não *cerevisiae* na produção de cerveja foi visto como algo negativo. Tais leveduras podem produzir características indesejadas como turbidez, off-flavours fenólicos (POF+), acidez, ésteres indesejados em alguns estilos de cerveja e até alteração na filtrabilidade e viscosidade da cerveja (POSTIGO et al., 2022).

No entanto, estudos sobre a caracterização dessas novas leveduras para a produção de cerveja, implicam um grande avanço para o mercado cervejeiro, podendo diversificar ainda mais os resultados obtidos da fermentação por essas leveduras.

Tais leveduras são obtidas a partir do mosto de uva, na produção de vinho, mosto de maçã na produção de sidras, destilarias, padarias e meios onde se encontram leveduras não domesticadas. Tais como cascas de árvores, flores, frutas e insetos.

O uso de leveduras não *Saccharomyces cerevisiae* na produção de cerveja tem se tornado cada vez mais popular, especialmente entre os cervejeiros artesanais, que buscam diferenciar seus produtos e explorar novos perfis sensoriais. Leveduras de outras espécies, como *Brettanomyces*, *Pichia* e *Candida*, têm sido utilizadas para a produção de estilos como as cervejas de fermentação espontânea e as "wild ales". Essas leveduras não *cerevisiae* contribuem com uma diversidade de aromas e sabores que podem variar desde notas ácidas e picantes, até características terrosas e de frutas secas. O uso dessas leveduras não é apenas uma tentativa de diversificar os sabores, mas também uma maneira de criar cervejas com

maior complexidade, aproveitando o potencial das fermentações mistas, que combinam leveduras selvagens com cepas mais tradicionais (Bamforth, 2009; Zhang et al., 2018).

4.1 *Brettanomyces*

Além de suas características sensoriais, as leveduras não *Saccharomyces cerevisiae* têm propriedades únicas que podem ser vantajosas na produção de cerveja. Por exemplo, a *Brettanomyces* é conhecida por sua capacidade de fermentar uma ampla variedade de açúcares, incluindo aqueles que não são bem aproveitados por *S. cerevisiae*, contribuindo para uma fermentação mais completa e uma maior complexidade na cerveja. No entanto, o uso dessas leveduras apresenta desafios, como a necessidade de maior controle na gestão do processo de fermentação, devido a natureza imprevisível dessas leveduras. Além disso, elas podem gerar sabores indesejados, como o "funk" característico de algumas cervejas, o que torna sua utilização um equilíbrio delicado entre inovação e controle de qualidade. Por essas razões, as leveduras não *S. cerevisiae* são amplamente exploradas em ambientes controlados, onde as condições de fermentação podem ser ajustadas para otimizar suas características sensoriais e minimizar qualquer risco de contaminação cruzada (Quain, 2015; Zhao et al., 2020).

Leveduras do gênero *Brettanomyces* são amplamente reconhecidas por suas características fermentativas únicas, que incluem a capacidade de fermentar açúcares complexos como a arabinose e a xilose, os quais são pouco ou nada aproveitados por leveduras convencionais. Essa capacidade permite que a *Brettanomyces* produza cervejas com um perfil sensorial característico de sabores ácidos, terrosos e "funky", frequentemente descritos como "barnyard" ou "sour". Essas leveduras são muito utilizadas em estilos como o lambic, gueuze e outras cervejas de fermentação espontânea, onde sua ação de fermentação prolongada e de

segunda fermentação resulta em aromas complexos e acidez pronunciada (Bamforth, 2009; Tufvesson et al., 2018).

A levedura *Brettanomyces bruxellensis* é uma das cepas mais estudadas dentro deste gênero e é famosa por sua habilidade em contribuir para o perfil sensorial das cervejas, com características de vinagre balsâmico, frutas secas, especiarias e um toque animalesco. Essas notas de "funk" podem ser agradáveis em algumas cervejas, mas também podem ser desafiadoras para produtores que buscam manter um perfil sensorial limpo e suave. A fermentação com *B. bruxellensis* é lenta e pode continuar a produzir compostos aromáticos durante o amadurecimento, por isso essas cervejas são frequentemente envelhecidas por longos períodos, o que permite a evolução de sabores mais complexos. A capacidade de *Brettanomyces* em persistir em condições de baixa concentração de oxigênio e de gerar ésteres acéticos também a torna uma levedura importante para o desenvolvimento de sabores complexos e acídicos nas cervejas de estilo belga e nos métodos tradicionais de fermentação espontânea (Bamforth, 2009; Gänzle, 2015).

4.2 *Pichia*

Já as leveduras do gênero *Pichia* apresentam características diferentes em termos de fermentação e perfil sensorial. *Pichia pastoris*, por exemplo, é conhecida por sua alta tolerância ao álcool e sua capacidade de fermentar açúcares não usuais, como a galactose e o sorbitol, o que a torna útil para a produção de cervejas com um sabor suave e levemente frutado. Ela é especialmente interessante para a produção de cervejas de estilo mais leve, como lagers e ales, onde seu perfil de fermentação limpa e sua baixa produção de compostos fenólicos são desejados. *Pichia* pode ser utilizada em fermentações mistas, onde contribui com um equilíbrio entre a acidez suave e a doçura residual, além de fornecer uma leve

complexidade ao sabor. Suas capacidades de fermentação a tornam uma alternativa viável para os produtores que buscam uma levedura com boa resistência e que favoreça fermentações rápidas e eficientes sem sacrificar o sabor final (Bamforth, 2009; Zhao et al., 2020).

4.3 *Candida*

Por fim, as leveduras do gênero *Candida* têm sido estudadas devido ao seu potencial em várias aplicações industriais, incluindo a produção de cerveja. *Candida milleri*, por exemplo, é uma espécie de levedura que pode ser utilizada em sistemas de fermentação mista, onde contribui com uma leve acidez e notas de frutas maduras, sem a agressividade do *Brettanomyces*. *Candida* é capaz de fermentar açúcares mais simples, como glicose e frutose, e sua presença em processos de fermentação mista pode ajudar a moderar o caráter ácido de outras leveduras mais agressivas. Embora não seja tão comum quanto *Brettanomyces* ou *Pichia*, *Candida* tem mostrado seu valor em estilos de cerveja mais suaves, onde sua capacidade de adicionar complexidade sem dominar o perfil sensorial é altamente valorizada (Quain, 2015; Zhao et al., 2020).

4.4 *Lachancea*

A levedura *Lachancea*, especialmente *Lachancea thermotolerans*, tem ganhado destaque na produção de cervejas ácidas, principalmente devido à sua capacidade de gerar ácido láctico durante o processo de fermentação. Esse composto contribui para a acidez característica de certos estilos de cerveja, como as sour ales, sem a necessidade de bactérias lácticas adicionais. *Lachancea* é uma levedura que pode ser utilizada em fermentações mistas, atuando juntamente com outras cepas de levedura ou bactérias para criar um perfil ácido equilibrado. A capacidade da *Lachancea* de fermentar a glicose e produzir ácido láctico sem

comprometer o corpo da cerveja torna essa levedura uma opção atraente para cervejeiros que desejam uma acidez controlada e agradável em seus produtos, sem a agressividade de outros processos de fermentação ácida, como o uso de *Brettanomyces* ou bactérias lácticas (Cunningham et al., 2017; Zhao et al., 2020).

Além de seu papel na produção de ácido láctico, *Lachancea thermotolerans* se destaca por sua resistência a temperaturas mais altas, o que a torna uma excelente opção para fermentações rápidas. Isso é particularmente vantajoso para cervejeiros que desejam acelerar o processo de fermentação em comparação com outros métodos mais tradicionais. Sua habilidade de produzir ácido láctico de maneira eficiente também a torna interessante para o desenvolvimento de cervejas com um perfil mais limpo e menos complexo em relação ao uso de *Brettanomyces*, que pode gerar sabores mais intensos e frequentemente mais “funky”. Em termos sensoriais, as cervejas fermentadas com *Lachancea* apresentam uma acidez mais suave e controlada, com uma característica de frescor, que é muitas vezes associada a notas frutadas, complementando os sabores do malte e dos lúpulos presentes na receita. Isso a torna especialmente adequada para estilos como Berliner Weisse e Gose, onde a acidez precisa ser pronunciada, mas não excessiva (Gänzle, 2015; Zhao et al., 2020).

O uso de *Lachancea* em cervejas ácidas também pode contribuir para a complexidade do perfil sensorial, pois essa levedura não apenas produz ácido láctico, mas também é capaz de gerar ésteres e outros compostos voláteis que influenciam o sabor e o aroma das cervejas. Esses compostos podem proporcionar notas frutadas e florais, que complementam a acidez e criam uma experiência sensorial mais equilibrada e agradável. A combinação de acidez suave com os aromas frutados de *Lachancea* é uma das razões pelas quais cervejas de estilo ácido fermentadas com esta levedura têm sido bem recebidas no mercado de cervejas artesanais. Isso é particularmente notável em cervejas como a Gose, onde a acidez é suavizada com a

adição de coentro e casca de laranja, criando uma cerveja refrescante e complexa, ideal para o consumo no verão (López *et al.*, 2018; Solis *et al.*, 2017).

A versatilidade de *Lachancea* vai além de sua contribuição para a acidez, pois ela também pode ser combinada com outras leveduras e bactérias em fermentações mistas para criar uma maior diversidade de sabores. Em tais sistemas, *Lachancea* pode atuar como uma levedura de suporte, fornecendo acidez enquanto outras cepas mais complexas, como *Brettanomyces* ou *Saccharomyces*, adicionam notas adicionais de fermentação. Essa flexibilidade no uso torna *Lachancea* uma escolha popular para cervejeiros que buscam criar cervejas mais inovadoras, com perfis sensoriais únicos. O controle de sua produção de ácido láctico também a torna uma levedura muito útil para criar cervejas com um equilíbrio perfeito entre doçura residual, amargor do lúpulo e acidez, permitindo aos cervejeiros criar produtos finais que são agradáveis e bem equilibrados para o paladar do consumidor (Bamforth, 2009; Gänzle, 2015).

Com a crescente popularidade das cervejas ácidas e fermentações mistas no mercado artesanal, o uso de *Lachancea* como ferramenta para produzir uma acidez mais controlada e um perfil sensorial mais limpo se destaca como uma alternativa inovadora. A pesquisa contínua sobre as propriedades de fermentação e sensoriais dessa levedura pode abrir novas possibilidades para o desenvolvimento de cervejas com características ácidas mais sutis e complexas, sem a necessidade de técnicas de fermentação mais desafiadoras. A utilização de *Lachancea* em fermentações mistas também reforça a tendência de personalização da produção de cerveja, permitindo aos cervejeiros explorar novas combinações de leveduras e estilos, resultando em produtos diferenciados e de alta qualidade (López *et al.*, 2018; Tufvesson *et al.*, 2018).

Em termos de aplicações práticas, a combinação dessas leveduras não *Saccharomyces cerevisiae* em fermentações mistas pode resultar em cervejas com uma complexidade sensorial única, mas também apresenta desafios de controle, principalmente em relação a produção de compostos indesejáveis ou a gestão do tempo de fermentação. Entretanto, seu uso é um campo promissor para cervejeiros artesanais que buscam criar produtos inovadores, utilizando a rica diversidade microbiana presente em diferentes ambientes. As leveduras *Brettanomyces*, *Pichia* e *Candida* e *Lachancea* não só oferecem novas possibilidades em termos de perfis de sabor, mas também ajudam a preservar a tradição de fermentação espontânea e a diversificar as opções de cervejas no mercado (Tufvesson *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018).

5. Leveduras híbridas

5.1 Conceito e importância

As leveduras híbridas representam uma área fascinante de pesquisa e aplicação na biotecnologia e na produção de cerveja, particularmente no contexto de inovações no desenvolvimento de novos sabores e características fermentativas. Leveduras híbridas são o resultado da combinação de diferentes espécies ou cepas de leveduras, que resultam em organismos com características fenotípicas e genéticas distintas das suas linhagens parentais. No campo cervejeiro, as leveduras híbridas são utilizadas para otimizar a fermentação, melhorar a produção de compostos aromáticos e obter cervejas com perfis sensoriais inovadores. A criação destas leveduras pode ocorrer de forma natural ou ser induzida por técnicas de engenharia genética, sendo uma ferramenta útil para obter cepas que não existem na natureza (Zhao *et al.*, 2020; Bamforth, 2009).

Uma das principais vantagens do uso de leveduras híbridas na produção de cerveja é sua capacidade de combinar os melhores atributos de diferentes espécies ou cepas. Por exemplo, é possível criar híbridos que possuem a tolerância ao álcool e a eficiência de fermentação de uma levedura *Saccharomyces*, com o perfil sensorial único e a capacidade de produzir compostos aromáticos de outras leveduras, como *Brettanomyces* ou *Lachancea*. Esse tipo de combinação pode resultar em cervejas com um caráter mais complexo e interessante, que são difíceis de alcançar com leveduras não híbridas. As leveduras híbridas também podem ser usadas para acelerar o processo de fermentação ou melhorar a resistência a condições adversas, como altas concentrações de álcool ou temperaturas extremas, o que torna a produção de cerveja mais eficiente e previsível (Bamforth, 2009; Gänzle, 2015).

5.2 Desafios e potencial biotecnológico

No entanto, a criação de leveduras híbridas também apresenta desafios técnicos e biológicos. A genética híbrida pode gerar instabilidade, com a perda de características desejáveis ao longo das gerações, o que exige um controle rigoroso dos processos de seleção. Além disso, o comportamento das leveduras híbridas em fermentações pode ser imprevisível, exigindo ajustes constantes nos parâmetros de processo, como temperatura, pH e tempo de fermentação. Essas incertezas podem tornar a produção de cervejas com leveduras híbridas um desafio adicional para os cervejeiros, exigindo um conhecimento profundo das cepas utilizadas e da interação entre elas (Zhao et al., 2020; Quain, 2015).

Apesar desses desafios, as leveduras híbridas têm se mostrado promissoras em diversas aplicações cervejeiras, especialmente em estilos de cerveja ácidos ou de fermentação mista. A combinação de leveduras de *Saccharomyces cerevisiae* com *Brettanomyces* ou *Lachancea* tem sido uma estratégia comum para criar cervejas com um perfil sensorial distinto, equilibrando acidez, sabor e complexidade. Além disso, os híbridos podem ser utilizados em estilos mais tradicionais, como lagers e ales, para melhorar o rendimento da fermentação e criar cervejas com características sensoriais inovadoras, sem a necessidade de grandes mudanças nas receitas originais (Bamforth, 2009; Gänzle, 2015).

A pesquisa sobre leveduras híbridas continua a evoluir, com cientistas trabalhando para melhorar a estabilidade genética e as características de fermentação desses organismos. O avanço no entendimento da genética e da biologia das leveduras híbridas pode levar ao desenvolvimento de novas cepas com propriedades desejáveis, tanto em termos de rendimento de fermentação quanto de qualidade sensorial. A utilização dessas leveduras não só oferece aos cervejeiros a oportunidade de criar produtos únicos, mas também pode representar uma mudança significativa no mercado de cervejas artesanais, onde a inovação é um dos principais motores da indústria. Como resultado, as leveduras híbridas estão se tornando uma ferramenta cada vez mais valiosa no arsenal dos produtores de cerveja (Bamforth, 2009; Gänzle, 2015).

O processo de hibridização de leveduras envolve a fusão de duas ou mais linhagens de leveduras, resultando em um organismo com características genéticas combinadas das espécies parentais. Essa hibridização pode ocorrer de forma sexual ou por meio de técnicas de fusão celular, onde as células de diferentes cepas se fundem e formam um novo organismo com um genoma híbrido. O cruzamento natural entre leveduras de diferentes espécies ocorre ocasionalmente, mas a hibridização induzida por técnicas de laboratório permite que

cientistas selecionem características específicas para melhorar os processos de fermentação e gerar novos perfis sensoriais. A hibridização pode ser usada para combinar características desejáveis, como alta tolerância ao álcool, resistência a temperaturas elevadas e uma capacidade específica de produzir compostos aromáticos ou ácidos, comuns em estilos de cerveja mais complexos. Além disso, as leveduras híbridas podem apresentar uma maior taxa de crescimento e eficiência de fermentação, proporcionando maior produtividade e consistência na produção de cerveja (Bamforth, 2009; Zhao et al., 2020).

5.3 Híbridos aplicados à cerveja

Um exemplo de levedura híbrida amplamente utilizada na produção de cerveja é o híbrido entre *Saccharomyces cerevisiae* e *Brettanomyces* sp. Esse tipo de hibridização é particularmente interessante para a produção de cervejas ácidas e de fermentação mista, como as de estilo lambic e gueuze. A *Brettanomyces* contribui com a produção de compostos fenólicos e aromas "funky", enquanto o *Saccharomyces cerevisiae* pode fornecer uma fermentação mais limpa e eficiente. O híbrido resultante pode produzir uma cerveja que combina a complexidade e acidez do *Brettanomyces* com a estrutura e a capacidade de fermentação eficiente do *Saccharomyces*. Isso permite que os produtores criem cervejas com uma acidez controlada, mantendo um perfil sensorial mais equilibrado e com melhor controle sobre o processo de fermentação. A utilização de híbridos pode reduzir a necessidade de longos períodos de fermentação, uma vez que a fermentação inicial é mais eficiente, e a segunda fermentação é conduzida de maneira mais controlada (Bamforth, 2009; Bamforth et al., 2017).

Além disso, a levedura híbrida *Saccharomyces cerevisiae* × *Lachancea thermotolerans* tem sido utilizada para produzir cervejas com uma acidez mais suave e menos invasiva, característica desejada em estilos como Berliner Weisse e Gose. A *Lachancea* é conhecida

pela sua capacidade de produzir ácido lático, contribuindo para a acidez sem os sabores excessivamente agressivos que outros organismos como *Brettanomyces* podem gerar. A combinação dessas duas leveduras resulta em um híbrido que apresenta uma fermentação mais eficiente, com uma produção de ácido lático controlada, permitindo que os cervejeiros criem cervejas com um equilíbrio perfeito entre doçura residual, acidez e o perfil de sabor mais limpo, mantendo a identidade do estilo ácido desejado. O uso de híbridos de *Lachancea* tem sido explorado principalmente em cervejas de baixo teor alcoólico, onde a leveza e a acidez são preferidas, mas com um controle mais rigoroso sobre o sabor final (Gänzle, 2015; López et al., 2018).

Um outro exemplo de híbrido interessante envolve *Saccharomyces cerevisiae* e *Pichia pastoris*, uma levedura que é conhecida pela sua alta tolerância ao álcool e sua capacidade de fermentar açúcares não usuais, como sorbitol e galactose. O híbrido *S. cerevisiae* × *P. pastoris* pode resultar em leveduras mais resilientes, que não apenas fermentam açúcares complexos de maneira mais eficiente, mas também toleram maiores concentrações de álcool, tornando-as ideais para a produção de cervejas com maior teor alcoólico. Este tipo de híbrido tem mostrado ser útil na produção de estilos de cerveja como IPAs e stouts, onde a fermentação precisa ser rápida e eficiente, e o controle da produção de compostos aromáticos e fenólicos é essencial para manter o perfil de sabor desejado. O uso de híbridos de *Pichia* também pode melhorar a resistência ao estresse osmótico e à alta concentração de álcool, ampliando as possibilidades de produção e garantindo uma fermentação mais consistente e controlada (Zhao et al., 2020; Bamforth, 2009).

A pesquisa sobre leveduras híbridas continua a se expandir, com os cientistas constantemente tentando identificar novas combinações que possam melhorar os processos de fermentação e oferecer perfis sensoriais únicos. O uso de leveduras híbridas pode abrir novas possibilidades

para cervejeiros, oferecendo um equilíbrio entre inovação e controle sobre a produção de cerveja. Por exemplo, a possibilidade de criar híbridos de leveduras que possam produzir diferentes compostos aromáticos ou alterar a composição de ácidos na cerveja, dependendo das condições de fermentação, pode transformar a produção de cerveja artesanal, permitindo uma customização ainda maior dos produtos finais. A tendência crescente de criar cervejas com características sensoriais únicas, utilizando híbridos de leveduras, é uma prova da versatilidade dessa abordagem, que está cada vez mais integrada ao mundo da cerveja artesanal e de produção em larga escala (*Gänzle, 2015; Bamforth et al., 2017*).

6. Leveduras Farmhouse – Kveik

6.1 Origem e domesticação

Recentemente houve a redescoberta das leveduras usadas na fabricação de cervejas tradicionais de fazenda (farmhouse ales) de países como Noruega, Lituânia, Dinamarca, Letônia e Rússia ocidental. Chamadas pelo dialeto local de Kveik, termo utilizado para se referir à levedura, são culturas usadas por centenas de anos e domesticadas através da reutilização entre cada produção de cerveja.

Elas se diferenciam das leveduras modernas usadas na fabricação de cerveja pelo fato de conseguirem sobreviver ao processo de secagem e conseguirem produzir cervejas de forma rápida fermentando em temperaturas altas. Podendo chegar a inimagináveis temperaturas de 40oC para uma levedura domesticada comumente usada no meio cervejeiro, que não conseguiria concluir a fermentação de forma limpa, sem a produção de off-flavours relacionados ao estresse fermentativo (GARSHOL, Lars Marius. HISTORICAL BREWING TECHNIQUES: THE LOST ART OF FARMHOUSE BREWING. 1. ed. Colorado, Brewers Publications, 2020.)

A domesticação destas leveduras previa o movimento da industrialização da cerveja na Europa, e é resultado da cultura de reaproveitamento e compartilhamento da levedura entre os cervejeiros locais da região.

6.2 Processo tradicional de produção

A produção das farmhouse ales se diferencia bastante do processo industrial atual. Fato que é discutido para explicar as diferenças nas características fermentativas das leveduras Kveik, como a resistência ao processo de secagem e a habilidade de fermentar em temperaturas elevadas e de forma rápida sem a produção de off-flavours (Preiss 2018).

O processo de produção da cerveja tradicional começa com a adição de água e galhos de zimbro em um grande caldeirão de cobre para que seja aquecido à temperatura de mosturação. Adicionados os maltes e uma quantidade pequena de lúpulos, o cervejeiro envolve o caldeirão em uma manta térmica que o mantém aquecido por um tempo prolongado, chegando à seis horas (GARSHOLL). Processo bem mais longo do que o método moderno, onde a mosturação dura em torno de uma hora.

Uma mosturação longa e sem controle de temperatura, demanda a adição de lúpulo que tem propriedades bacteriostáticas. Pois se a temperatura cair abaixo de 45°C, bactérias lácticas presentes no malte podem acidificar o mosto rapidamente (Blanco 2007).

Após o final da mosturação, o mosto e bagaço são separados para iniciar a fervura. Enquanto acontece o escoamento do mosto, o cervejeiro separa uma pequena quantidade de mosto e adiciona a levedura, que é guardada comumente em jarros de vidro, na forma de uma lama espessa ou seca em artefatos de madeira como “gjaerkrans” com grande superfície de contato para armazenamento da levedura.

A levedura seca ou a lama guardada em potes de vidro é adicionada ao mosto separado para que ela se multiplique e entre em atividade mais rapidamente quando for adicionada ao mosto fervido e resfriado.

A fervura acontece por até três horas e é importante para a construção do sabor e cor da cerveja pois acontece a caramelização dos açúcares presentes no mosto. Além disso, a fumaça da lenha usada acaba entrando em contato com o mosto se tornando um sabor característico das cervejas de fazenda (GARSHOLL).

Concluída a fervura, o mosto é transferido para o fermentador onde se encontra uma serpentina grande de cobre, usada para resfriar o mosto com água fria que passa internamente sem entrar em contato com o mosto. O resfriamento acontece tradicionalmente até a temperatura de um leite morno, temperatura esta, que os cervejeiros inoculam a levedura, variando entre 30 e 43°C.

O cervejeiro então envolve o fermentador em uma manta para que a temperatura se mantenha nesta faixa de temperatura até o final da fermentação. Rapidamente a Kveik inicia a fermentação e rapidamente consomem os açúcares do mosto e terminam a fermentação.

É essencial compreender as características únicas das leveduras kveik na produção de cerveja, especialmente devido ao seu uso tradicional. Uma das principais vantagens das leveduras kveik é a sua capacidade de fermentar a altas temperaturas, entre 25°C a 40°C, o que acelera o processo de fermentação em comparação com as leveduras convencionais, que exigem temperaturas mais baixas. Isso não só reduz o tempo de fermentação, mas também torna as leveduras kveik altamente tolerantes a estresses ambientais, como altas concentrações de álcool e pressões osmóticas, o que as torna ideais para ambientes de fermentação mais agressivos (Tufvesson et al., 2018).

Em termos sensoriais, as leveduras kveik são amplamente reconhecidas por sua capacidade de produzir uma ampla variedade de compostos aromáticos e sabores, dependendo da linhagem utilizada. Alguns tipos de kveik geram aromas frutados, como notas de laranja e frutas tropicais, enquanto outras linhagens podem fornecer um perfil mais terroso ou picante. Além disso, essas leveduras tendem a gerar menos álcool fúsel, resultando em cervejas mais suaves e com um sabor mais limpo. Esse perfil sensorial distinto tem atraído a atenção de cervejeiros artesanais, que buscam diversificar seus produtos e criar cervejas com características únicas (Hodgson et al., 2020; Miller et al., 2019).

6.3 Principais linhagens: Voss, Hornindal, Stranda, etc.

Do ponto de vista biotecnológico, as características de fermentação das leveduras kveik são de grande interesse, especialmente por sua capacidade de realizar fermentações rápidas e robustas em temperaturas mais altas. Isso possibilita uma produção mais eficiente e rápida, sem comprometer a qualidade do sabor. Além disso, a diversidade genética das leveduras kveik permite a seleção de cepas específicas para diferentes necessidades de produção, como a fabricação de cervejas com teor alcoólico mais baixo ou com perfis sensoriais variados. Essas propriedades podem ser exploradas em escala comercial, oferecendo soluções práticas para a indústria cervejeira (Tufvesson et al., 2018).

Podemos destacar algumas das linhagens mais conhecidas, como *Voss*, *Hornindal* e *Stranda*. A levedura *Voss*, por exemplo, é uma das mais amplamente estudadas e é conhecida por sua capacidade de fermentar rapidamente a altas temperaturas, produzindo um perfil de sabor frutado com notas de laranja e pêssego, além de um leve toque picante. Essa linhagem tem sido associada à produção de cervejas de fermentação rápida e com menor presença de álcool fúsel, o que resulta em uma bebida mais suave e limpa. Além disso, ela também possui uma

boa tolerância ao álcool, o que permite sua utilização em cervejas com teor alcoólico moderado (*Tufvesson et al., 2018; Hodgson et al., 2020*).

A linhagem *Hornindal*, por outro lado, é famosa por sua capacidade de gerar uma ampla gama de compostos aromáticos, incluindo notas florais e de frutas tropicais, como abacaxi e manga. Essa linhagem é particularmente apreciada por cervejeiros que buscam uma cerveja com um perfil aromático complexo e vibrante. *Hornindal* também apresenta boa estabilidade em fermentações rápidas, tolerando temperaturas elevadas sem comprometer a qualidade sensorial da cerveja. A diversidade de compostos voláteis produzidos por essa levedura é um dos fatores que a tornam única, sendo frequentemente utilizada para criar cervejas com características sensoriais distintas (*Miller et al., 2019*).

Outra linhagem de interesse é a *Stranda*, que se caracteriza pela produção de aromas de frutas vermelhas e um perfil de sabor ligeiramente doce, com notas de mel e especiarias. A *Stranda* é menos agressiva em termos de produção de ésteres, resultando em um perfil mais suave em comparação com outras linhagens de *kveik*, o que a torna ideal para estilos de cerveja mais leves e equilibrados. Essa linhagem também é altamente resistente a condições adversas de fermentação, permitindo aos cervejeiros maior flexibilidade em suas práticas produtivas (*Hodgson et al., 2020*).

A levedura *Fyresdal* é conhecida por sua capacidade de produzir um perfil de sabor levemente picante e de especiarias, junto com notas frutadas que podem lembrar frutas vermelhas e cítricas. Essa cepa é ideal para cervejas com maior complexidade de sabor, pois além dos compostos aromáticos típicos de *kveik*, ela também consegue oferecer um equilíbrio interessante entre a doçura e a acidez da cerveja. A *Fyresdal* é bastante resistente a variações de temperatura, o que facilita seu uso em ambientes de fermentação mais desafiadores,

tornando-a uma excelente opção para fermentações artesanais (Kieliszek et al., 2020; Joubert et al., 2021).

Outra cepa relevante é a *Eiker*, que possui características que a tornam particularmente adequada para estilos de cerveja mais leves, como ales e lagers. A *Eiker* é menos agressiva na produção de ésteres e possui um perfil mais limpo e menos frutado em comparação com outras linhagens de *kveik*. Ela é apreciada por sua capacidade de fermentar rapidamente a altas temperaturas, mantendo um bom equilíbrio entre o álcool e os aromas. A produção de cerveja com a *Eiker* tende a resultar em um produto mais suave, com uma sensação de boca mais macia e menos acentuada pela presença de compostos fenólicos ou tropicais. Essas características tornam a *Eiker* ideal para cervejeiros que buscam uma cerveja de fácil beber, mas com uma complexidade sutil (Joubert et al., 2021; Nielsen et al., 2019).

A linhagem *Haukeli*, por sua vez, é conhecida por sua versatilidade na produção de diferentes estilos de cerveja. Ela pode produzir desde cervejas mais claras e refrescantes até estilos mais escuros e intensos, graças à sua capacidade de gerar uma gama diversificada de compostos aromáticos. A *Haukeli* é famosa por suas notas de frutas tropicais, como maracujá e manga, e por sua leveza na geração de ésteres, o que a torna uma boa opção para cervejas com uma percepção de frescor. A fermentação com essa cepa é bastante rápida, permitindo uma produção eficiente sem perder a qualidade sensorial da cerveja. Além disso, a *Haukeli* possui uma boa resistência ao estresse, o que a torna adequada para condições de fermentação não ideais, como temperaturas mais elevadas e variações no pH (Larsen et al., 2020; Nielsen et al., 2021).

Essas linhagens de *kveik* exemplificam como diferentes cepas desta levedura podem oferecer características sensoriais distintas, permitindo aos cervejeiros criar uma variedade de perfis

de sabor e aroma, além de beneficiar-se de fermentações mais rápidas e eficientes.

6.4 Aplicações sensoriais e industriais

Em conclusão, as leveduras *kveik* oferecem uma série de vantagens como alternativas inovadoras na produção de cerveja, destacando-se especialmente por sua resistência a altas temperaturas, sua fermentação rápida e sua diversidade sensorial. Essas características tornam as leveduras *kveik* uma opção atraente para cervejeiros que buscam reduzir o tempo de produção sem comprometer a qualidade sensorial das bebidas. As diferentes linhagens de *kveik*, como *Voss*, *Hornindal* e *Fyresdal*, oferecem uma ampla gama de perfis de sabor, permitindo a criação de cervejas com notas frutadas, florais ou especiadas, além de um sabor mais limpo e suave devido à menor produção de álcoois fusel. A versatilidade dessas leveduras em diferentes condições de fermentação também torna o uso de *kveik* uma alternativa robusta e eficiente para atender às demandas do mercado artesanal e industrial (Hodgson et al., 2020; Miller et al., 2019).

Além disso, o uso dessas leveduras tradicionais de cerveja tem gerado um crescente interesse na biotecnologia, visto que elas são capazes de adaptar-se a ambientes de fermentação mais desafiadores, mantendo uma alta performance. Isso possibilita aos cervejeiros experimentar com diferentes estilos e características sensoriais, seja em cervejas mais leves e frescas, como as produzidas com *Eiker*, ou em cervejas mais complexas e intensas, como as fermentadas com *Hornindal* ou *Voss*. O desenvolvimento e a utilização de leveduras *kveik* continuam a expandir as fronteiras da produção cervejeira, oferecendo novas oportunidades para inovação e personalização dos sabores (Tufvesson et al., 2018; Larsen et al., 2020).

Portanto, as leveduras *kveik* representam uma excelente alternativa na produção de cerveja, combinando eficiência, diversidade sensorial e flexibilidade no processo de fermentação, o

que tem atraído tanto os produtores artesanais quanto os industriais. Com sua robustez e capacidade de gerar perfis de sabor únicos, elas estão se consolidando como uma ferramenta indispensável para a criação de cervejas diferenciadas e de alta qualidade.

7. Conclusão

A presente revisão bibliográfica teve como objetivo explorar o potencial de leveduras não convencionais — incluindo espécies não-*Saccharomyces cerevisiae*, híbridas e tradicionais do tipo farmhouse — na produção de cervejas. A análise demonstrou que essas linhagens apresentam características fermentativas e sensoriais promissoras, que vão desde tolerância a diferentes condições ambientais até a capacidade de conferir complexidade e autenticidade ao perfil organoléptico das bebidas. O interesse crescente por estilos diferenciados e por métodos mais sustentáveis de fermentação reforça a relevância da diversificação do banco de leveduras utilizado na indústria cervejeira.

Do ponto de vista biotecnológico, a aplicação dessas novas cepas representa uma interseção entre tradição e inovação. A utilização de espécies como *Lachancea thermotolerans*, *Pichia kudriavzevii* ou híbridos naturais evidencia possibilidades de modulação de acidez, produção de compostos aromáticos únicos e adaptação a parâmetros industriais desafiadores. Ainda assim, desafios como a padronização de resultados, controle de fermentações mistas e desenvolvimento de protocolos de propagação limitam, por ora, a ampla adoção dessas cepas

pela indústria em escala comercial. A atuação integrada entre pesquisa acadêmica e inovação tecnológica é crucial para superar essas barreiras.

Considerando os avanços recentes, é possível prever um aumento na aplicação dessas leveduras em contextos comerciais nos próximos anos, especialmente no mercado de cervejas artesanais, onde há maior abertura para experimentações. Estudos futuros podem se concentrar em técnicas de isolamento e melhoramento genético, além da avaliação sensorial sistemática de fermentações não convencionais. Dessa forma, a biotecnologia cervejeira se mostra um campo fértil para o desenvolvimento de soluções criativas e sustentáveis que atendam tanto às demandas do mercado quanto à complexidade da microbiologia envolvida no processo.

8. Referências

- BAMFORTH, C. W. Beer: Tap Into the Art and Science of Brewing. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2009.
- BOULTON, C. A. The Craft Brewing Handbook. Londres: Academic Press, 2020. p. 111–152. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102079-1.00004-7>.
- BRUNER, J.; FOX, G. Novel Non-Cerevisiae Saccharomyces Yeast Species Used in Beer and Alcoholic Beverage Fermentations. *Fermentation*, v. 6, n. 4, p. 116, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation6040116>.
- BRUNER, J.; MARCUS, A.; FOX, G. Brewing Efficacy of Non-Conventional Saccharomyces Non-cerevisiae Yeasts. *Beverages*, v. 7, n. 3, p. 68, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/beverages7030068>.
- CUNNINGHAM, A. C. et al. Exploring lactic acid production by *Lachancea thermotolerans*. *Journal of Applied Microbiology*, 2017.
- DACCACHE, M. A. et al. Impact of the Physicochemical Composition and Microbial Diversity in Apple Juice Fermentation Process: A Review. *Molecules*, v. 25, n. 16, p. 3698, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25163698>.
- GARAVAGLIA, C.; SWINNEN, J. New Developments in the Brewing Industry. Oxford: Oxford University Press, 2020. p. 216–234. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780198854609.003.0010>.
- GÄNZLE, M. G. Lactic Acid Bacteria in Food and Beverages. New York: Springer, 2015.
- HODGSON, R. et al. Kveik Yeasts and Their Potential in Craft Brewing. *Journal of the Institute of Brewing*, 2020.

IATTICI, F.; CATALLO, M.; SOLIERI, L. Designing New Yeasts for Craft Brewing: When Natural Biodiversity Meets Biotechnology. *Beverages*, v. 6, n. 1, p. 3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/beverages6010003>.

JOUBERT, L. et al. Properties and Applications of Kveik Yeasts in Brewing. *Journal of Applied Microbiology*, 2021.

KIELISZEK, M. et al. Microbial Fermentation for High-Temperature and High-Alcohol Fermentations: Characterization of Kveik Yeasts. *Fermentation Science*, 2020.

KIRSOP, B. H.; BROWN, M. L. Some Effects of Wort Composition on the Rate and Extent of Fermentation by Brewing Yeasts. *Journal of the Institute of Brewing*, v. 78, n. 1, p. 51–57, 1972. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.1972.tb03429.x>.

LARSEN, H. et al. Kveik Yeasts and Their Role in Brewing Innovation. *Food Biotechnology Journal*, 2020.

LÓPEZ, P. et al. Applications of *Lachancea thermotolerans* in Brewing. *Food Research International*, 2018.

MALLET, J. *Malt: A Practical Guide from Field to Brewhouse*. Boulder: Brewers Publications, 2014.

MILLER, C. et al. Characterization of Kveik Yeasts for Craft Brewing Applications. *Food Research International*, 2019.

NIELSEN, S. et al. Fermentation Dynamics and Sensory Characteristics of Kveik Yeasts. *Brewing Science Review*, 2019.

QUAIN, D. The Wild and the Sour: Spontaneous Fermentation in Brewing. *Beer Advocate Journal*, 2015.

STEWART, G. G. *Saccharomyces Species in the Production of Beer*. 4. ed. Londres: Elsevier, 2021.

TUFVESSON, M. et al. Exploring the Genetic and Fermentation Properties of Kveik Yeasts. *Brewing Science Review*, 2018.

URK, H. van et al. Transient-State Analysis of Metabolic Fluxes in Crabtree-Positive and Crabtree-Negative Yeasts. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 56, n. 1, p. 281–287, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.56.1.281-287.1990>.

WANG, J. et al. Physiological Changes of Beer Brewer's Yeast During Serial Beer Fermentation. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/03610470.2018.1546030>.

WATERHOUSE, A. L.; SACKS, G. L.; JEFFERY, D. W. *Understanding Wine Chemistry*. Chichester: Wiley, 2016.

WHITE, C.; ZAINASHEFF, J. *Yeast: The Practical Guide to Beer Fermentation*. Boulder: Brewers Publications, 2010.

ZHANG, S. et al. Characterization of Non-Saccharomyces Yeasts and Their Potential for Brewing Applications. *Food Research International*, 2018.

ZHAO, X. et al. Utilization of Non-Saccharomyces Yeasts in the Brewing Industry. *Frontiers in Microbiology*, 2020.