

INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA QUALIDADE DO LEITE: FERMENTAÇÃO DE PRECISÃO E MÉTODOS INTELIGENTES DE ANÁLISES

Cleonice Quaresma Alves¹, Alica Antônia Dutra ², Bruna Camili Scopel², Daniel Angelo Longhi^{1,2}, Elisandra Rigo^{1,2}

¹Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade do Estado de Santa Catarina, Pinhalzinho, Santa Catarina, Brasil
(nyce.quaresma11@gmail.com)

²Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade do Estado de Santa Catarina, Pinhalzinho, Santa Catarina, Brasil

^{1,2}Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade do Estado de Santa Catarina, Pinhalzinho, Santa Catarina, Brasil

Resumo: Diante das crescentes exigências por alimentos seguros, nutritivos e produzidos de forma sustentável, faz-se necessária a adoção de inovações tecnológicas voltadas a melhoria da qualidade do leite, com destaque para a fermentação de precisão e os métodos inteligentes de análise. A integração de tecnologias, possibilita maior rastreabilidade, controle em tempo real e eficiência dos processos, contribuindo para a redução de perdas e para o desenvolvimento de produtos.

Palavras-chave: Qualidade do leite; fermentação de precisão; métodos de análise; leite; produtos lácteos.

INTRODUÇÃO

O leite é amplamente reconhecido como um dos alimentos mais completos do ponto de vista nutricional, sendo fonte de proteínas de alto valor biológico, lipídios, lactose, vitaminas e minerais essenciais (Singh *et al.*, 2024). Em escala global, projeta-se que em torno de 2050 haverá mais 2,3 bilhões de pessoas no mundo, ao mesmo tempo em que a escassez de recursos ambientais aumenta progressivamente, tornando o setor de lácteos um ponto de articulação fundamental para a segurança alimentar global (FAO, 2023).

O Brasil destaca-se como o quarto maior produtor mundial de leite, com produção histórica de 35,7 bilhões de litros em 2024 e valor de produção de R\$ 87,5 bilhões, com a atividade presente em cerca de 98% dos municípios brasileiros (IBGE, 2025). Apesar dos avanços produtivos, o desafio central passa a ser a qualidade, avaliada por indicadores como contagem de células somáticas, contagem bacteriana total, presença de resíduos de antibióticos, adulterações e composição físico-química (Brasil, 2018). Ainda que existam marcos regulatórios como a Instrução Normativa nº 77/2018 persistem desafios quanto à sua efetiva implementação ao longo da cadeia produtiva (Embrapa, 2022; Brasil, 2018).

A cadeia produtiva do leite vive um momento de transformação acelerada, impulsionada pelo novo perfil do consumidor, cada vez mais exigente quanto à segurança, qualidade nutricional e impacto ambiental dos produtos (Brasil, 2022).

Nesse contexto, métodos tradicionais de controle de qualidade, baseados em análises laboratoriais pontuais, apresentam limitações quanto à rapidez, sensibilidade e capacidade de monitoramento contínuo, restringindo sua eficácia frente às demandas atuais (Patel *et al.*, 2026; Brasil, 2018).

As principais inovações tecnológicas aplicadas à análise da qualidade do leite incluem técnicas espectroscópicas, biossensores, inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT) e dispositivos portáteis, que possibilitam análises rápidas, não destrutivas e em tempo real, capazes de detectar fraudes, identificar contaminações e monitorar alterações físico-químicas ao longo da cadeia produtiva (Sharma *et al.*, 2026; Fizza *et al.*, 2025; Pan *et al.*, 2024). Paralelamente, a fermentação de precisão, processo biotecnológico que utiliza microrganismos geneticamente modificados para produzir proteínas do leite e produtos lácteos sem origem animal, emerge como inovação disruptiva intrinsecamente ligada ao uso dessas tecnologias de monitoramento e análise (Obayomi *et al.*, 2026; Verma *et al.*, 2025).

Diante disso, o presente artigo tem como objetivo analisar de forma integrada as inovações tecnológicas aplicadas à qualidade do leite, com ênfase na fermentação de precisão e nos métodos inteligentes de análise, avaliando sua contribuição para a modernização e sustentabilidade da indústria de laticínios.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração do presente trabalho de revisão de literatura, de caráter qualitativo e descritivo, com o objetivo de analisar as principais inovações tecnológicas aplicadas à qualidade do leite, realizou-se levantamento bibliográfico por meio da consulta a artigos científicos, livros e normativas técnicas. As buscas foram conduzidas em bases de dados como Portal de Periódicos CAPES, ScienceDirect, Scopus e documentos normativos oficiais.

Os trabalhos foram selecionados por meio de pesquisa avançada, considerando principalmente publicações dos últimos 10 anos, em razão da constante atualização das normativas e dos avanços tecnológicos na área, considerou-se estudos publicados nos idiomas inglês e português, disponíveis na íntegra e relacionados ao tema proposto.

Para a estratégia de busca, utilizaram-se palavras-chave em inglês, organizadas em seis combinações principais: “milk quality”, “dairy quality control”, “dairy industry”, “milk safety”, “dairy processing” e “precision fermentation”.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fermentação de precisão

Atualmente, a busca por sistemas alimentares que sejam mais sustentáveis, levam ao desenvolvimento de tecnologias para a produção de ingredientes de origem animal, sem a criação convencional de rebanhos. A fermentação de precisão foi nomeada como tendência alimentar emergente na quarta Revolução Industrial para a indústria alimentar (Liu *et al.*, 2024). Foi facilitada pela biologia sintética e outras ferramentas que envolvem IA, bioinformática, biologia de sistemas e biologia computacional (Shukla *et al.*, 2026).

A fermentação de precisão se destaca como uma das principais inovações da agricultura celular. É um processo biotecnológico capaz de produzir proteínas alimentares semelhantes às de origem animal, utilizando leveduras, bactérias, fungos ou microalgas (Keppler e Boom, 2025).

Essa tecnologia, permite que se obtenham proteínas com estruturas semelhantes às encontradas no leite bovino, preservando as propriedades nutricionais, ao mesmo tempo que reduz a dependência do sistema pecuário tradicional (Kossmann *et al.*, 2025). A fermentação de precisão, também é apontada como uma estratégia promissora para atender à crescente demanda mundial por proteínas de qualidade, minimizando impactos ambientais (Eastham e Leman, 2024; Nielsen *et al.*, 2024; Knychala *et al.*, 2024).

A combinação da engenharia genética, da biologia sintética e de diferentes técnicas de fermentação compõem a fermentação de precisão, que permite a produção microbiana precisa de compostos (Mirsalami e Mirsalami, 2025; Verma *et al.*, 2025). Os principais produtos que são estudados para aplicação da fermentação de precisão são as proteínas do leite;

as proteínas do ovo; e componentes específicos análogos da carne (Nielsen *et al.*, 2024).

As proteínas do soro do leite apresentam valor significativo e demonstram versatilidade, sendo utilizado como aditivos alimentares, devido as suas características funcionais e nutricionais. As proteínas vegetais enfrentam dificuldades para substituir as proteínas do soro do leite e derivados devidos as características estruturais distintas que contribuem para a excepcional atividade do soro do leite (Shukla *et al.*, 2026).

O processo de fermentação de precisão está ilustrado pela Figura 1. Inicialmente ocorre a seleção de um organismo hospedeiro e da proteína-alvo, em seguida ocorre a introdução do gene responsável por sua síntese. Durante a fermentação, os microrganismos utilizam nutrientes presentes no meio de cultivo que expressa a proteína desejada, essa pode ser produzida intracelularmente ou extracelularmente. Após, inicia-se o processo de downstream, que envolve operações como centrifugação, microfiltração, ultrafiltração, precipitação e secagem, para recuperar e purificar as proteínas produzidas (Keppler e Boom, 2025; Shukla *et al.*, 2025).



Figura 1. Fluxograma simplificado da produção de proteínas lácteas por fermentação de precisão. Adaptado pelas autoras, 2026.

Entre os principais produtos obtidos através dessa técnica, destacam-se as proteínas lácteas, como caseínas e proteínas do soro, como a β -lactoglobulina e a α -lactoalbumina. Essas proteínas são fundamentais para a formação de textura, estabilidade, capacidade de formação de espuma e, coagulação dos produtos lácteos (Nielsen *et al.*, 2024). A produção recombinante dessas proteínas representa um dos mais avançados segmentos quando se trata de fermentação de precisão, pois permite a elaboração de ingredientes com características funcionais semelhantes às que são observadas em produtos derivados do leite obtido através da forma convencional. Essa elevada similaridade estrutural, possibilita que essas proteínas sejam utilizadas na fabricação de iogurtes,



formulações destinadas a produção de queijos, sobremesas e ingredientes proteicos especializados (Eastham e Leman, 2024; Nielsen *et al.*, 2024).

As caseínas, possuem grande importância devido a sua estrutura em derivados lácteos. Elas se organizam naturalmente na forma de micelas, que são estruturas responsáveis pela estabilidade coloidal do leite pelo processo de coagulação durante a fabricação de queijos. Avanços na fermentação de precisão, demonstram a possibilidade de produzir micelas artificiais de caseína a partir de proteínas recombinantes. A formação dessas micelas representa um passo fundamental para produção de alternativas lácteas, que são capazes de reproduzir atributos tecnológicos que são associados a produtos de origem animal (Antuma *et al.*, 2024).

Purba e Sangsawad (2025), destacam que a reprodução de estruturas conhecidas como supramoleculares do leite, constituem um dos principais desafios para a próxima geração de produtos lácteos obtidos a partir da biotecnologia. Estudos apontam que a fermentação de precisão apresenta potencial para diminuir de forma significativa a utilização de recursos naturais, se comparada com a produção de leite convencional.

As principais vantagens mencionadas sobre essa tecnologia são: a redução da emissão de gases de efeito estufa, do consumo de água e da ocupação de terras agrícolas. O aumento da produção de proteínas recombinantes, substituindo aos poucos as obtidas através da produção animal, pode contribuir para sistemas alimentares mais sustentáveis. Esses benefícios tornam a fermentação de precisão relevante para a construção de cadeias produtivas que alinham princípios de sustentabilidade, com a economia de baixo carbono (Knychala *et al.*, 2025; Kossmann *et al.*, 2025).

Produtos oriundos de fermentação de precisão não podem ser rotulados como organismos geneticamente modificados, desde que sejam equivalentes aos da natureza e que o produto não contenha organismos modificados ou ácidos nucleicos de organismos utilizados. Essa tecnologia minimiza a formação de subprodutos e é um substituto potencial para a fermentação tradicional (Liu *et al.*, 2024).

Os avanços observados são iminentes, mas existem desafios tecnológicos que ainda limitam a ampla adoção da fermentação de precisão na indústria de lácteos. Obter elevados rendimentos fermentativos, reduzir custos de produção, desenvolver processos eficientes de purificação e reproduzir a complexidades estrutural do leite ainda são considerados obstáculos para a consolidação comercial da tecnologia (Purba e Sangsawad, 2025; Nielsen *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2024).

Diante do cenário apresentado, embora a fermentação de precisão represente uma das mais promissoras inovações para o setor lácteo, sua consolidação em

larga escala ainda depende de avanços simultâneos entre biotecnologia, engenharia e processos de regulamentação.

Impactos na qualidade do leite

A fermentação de precisão pode influenciar diretamente a qualidade tecnológica dos produtos lácteos. A produção controlada de proteínas bioidênticas permite maior padronização da composição dos ingredientes utilizados pela indústria, isso reduz variações que estão ligadas a fatores genéticos, nutricionais e ambientais que estão presentes nos sistemas convencionais de produção leiteira. Proteínas recombinantes, como caseínas e β -lactoglobulina, podem apresentar propriedades funcionais semelhantes às que são encontradas no leite bovino, isso inclui a capacidade de emulsificação, formação de gel e a estabilidade coloidal. São propriedades fundamentais para obter produtos com textura, viscosidade e comportamento reológico adequado se aplicado em queijos, iogurtes e bebidas proteicas. Mas estruturas mais complexas como micelas de caseína e membranas do glóbulo de gordura do leite, ainda representam um desafio para que os produtos obtidos por fermentação de precisão reproduzam de forma integral, todas as funcionalidades que os lácteos convencionais demonstram (Purba e Sangsawad, 2025; Nielsen *et al.*, 2024; Antuma *et al.*, 2024).

O objetivo da fermentação de precisão não é apenas produzir proteínas idênticas às do leite, mas também preservar suas propriedades funcionais anteriormente apresentadas, que são fundamentais para a qualidade tecnológica dos derivados lácteos (Keppler e Boom, 2025).

A fermentação de precisão possui alto potencial para manter e aprimorar atributos de qualidade do leite e demais produtos lácteos, pois possibilita a produção de caseínas e proteínas do soro com propriedades que a indústria alimentícia necessita. Mas a qualidade final depende da manutenção das características estruturais proteicas durante a sua produção e processamento, pois alterar a conformação molecular pode comprometer a funcionalidade tecnológica nos produtos (Eastham e Leman, 2024).

Métodos rápidos de análise

A crescente preocupação com a adulteração e contaminação do leite tem impulsionado o desenvolvimento de métodos analíticos rápidos, não destrutivos e de baixo custo, capazes de substituir ou complementar técnicas convencionais que demandam preparo laboratorial complexo, tempo prolongado e operadores especializados (Li *et al.*, 2026). Nesse contexto, espectroscopia vibracional, biossensores, sistemas de percepção artificial e técnicas moleculares emergem como plataformas complementares para o



controle de qualidade láctea ao longo de toda a cadeia produtiva.

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) permite análises qualitativas e quantitativas do leite sem preparo prévio de amostra, baseando-se na absorção de radiação entre 780 e 2500 nm por ligações moleculares presentes nos seus componentes (Padmasri e Bama, 2026). Associada a algoritmos de pré-processamento espectral e modelos quimiométricos como PLS-DA, SIMCA, KNN e SVM, a NIR possibilita a detecção de adulterantes como água, uréia, melamina e amido com elevada acurácia. Em leite bubalino, modelos PLS-DA alcançaram acurácia superior a 93,7% e modelos SIMCA sensibilidade acima de 91,3% (Gullifa *et al.*, 2025). A miniaturização dos espectrômetros NIR, com dispositivos como MicroNIR, SciO e NeoSpectra, possibilitou análises em campo em menos de um minuto, sem uso de solventes, integrando-se a aplicativos móveis e plataformas de nuvem (Gullifa *et al.*, 2025). O imageamento hiperespectral visível-NIR (Vis-NIR-HSI) representa uma extensão avançada, combinando informação espectral com resolução espacial, com modelos KNN alcançando 98,5% de acurácia na classificação de leite com diferentes níveis de adulteração por amido (Padmasri e Bama, 2026).

A espectroscopia Raman complementa a NIR ao gerar impressões digitais químicas altamente específicas de proteínas, lipídeos, carboidratos e adulterantes (Acharya *et al.*, 2026). A versão amplificada por superfície (SERS), com substratos nanoestruturados de prata ou ouro, supera limitações de sensibilidade e fluorescência, atingindo limites de detecção de 1 mg/L para melamina, 5 mg/dL para uréia e 0,03 mg/L para tiocianato em matrizes de leite. Modelos de aprendizado profundo aplicados a dados Raman de 3000 amostras alcançaram acurácia de 94,6% na detecção simultânea de múltiplos adulterantes (Acharya *et al.*, 2026).

Os biossensores combinam elementos de reconhecimento biológico com transdutores eletroquímicos ou óticos, oferecendo alta sensibilidade e velocidade de detecção para aplicações em campo (Sangubotla *et al.*, 2026).

O nariz eletrônico (E-nose) e a língua eletrônica (E-tongue) constituem abordagens não destrutivas complementares, baseadas respectivamente em sensores de gases e eletroquímicos, para avaliação da qualidade e autenticidade do leite. A combinação dessas plataformas com algoritmos de inteligência artificial como Random Forest e SVM tem possibilitado a detecção de adulterantes, distinção entre marcas e estimativa do tempo de armazenamento do leite, com Random Forest alcançando desempenho de 1,000 em tarefas de classificação (Gómez *et al.*, 2026). A integração desses sistemas com IoT representa uma tendência emergente para

monitoramento em tempo real ao longo da cadeia láctea (Singh *et al.*, 2025).

A tecnologia CRISPR/Cas emergiu como abordagem revolucionária para detecção rápida de patógenos no leite, superando as limitações dos métodos de cultura convencional que demandam 24 a 72 horas (Liberty *et al.*, 2025). Sistemas baseados em Cas12 e Cas13, combinados com amplificação isotérmica como RAA e LAMP, eliminam a necessidade de termocicladores e possibilitam plataformas portáteis de baixo custo. A detecção de *Salmonella typhi* em leite utilizando CRISPR/Cas12a combinado com SERS alcançou limites de 3 a 4 UFC/mL em apenas 45 minutos (Xie *et al.*, 2024), e sistemas RAA-CRISPR/Cas12a demonstraram detecção sensível de *Listeria monocytogenes* com alta especificidade (Yang *et al.*, 2024). A integração de CRISPR com ensaios de fluxo lateral (CRISPR-LFA) possibilita diagnósticos de campo sem infraestrutura laboratorial (Sun *et al.*, 2025).

Os ensaios de fluxo lateral (LFA) constituem plataformas de triagem consolidadas, fornecendo resultados em menos de 15 minutos. Formatos multiplex com nanopartículas de ouro possibilitam detecção simultânea de múltiplas classes de antibióticos, com limites visuais de 0,3 a 100 ng/mL compatíveis com os limites máximos de resíduos regulatórios (Maksin *et al.*, 2025). Para confirmação analítica, técnicas como HPLC, UHPLC e LC-MS/MS permanecem como padrão-ouro regulatório, com avanços recentes em automação e microextração reduzindo tempos de análise para aproximadamente 14 minutos em métodos multirresíduos (Dluhošová *et al.*, 2024). A combinação de triagem por LFA com confirmação por LC-MS/MS representa a estratégia mais custo-efetiva para vigilância em larga escala de contaminantes no leite.

A tendência mais relevante no campo é a convergência de múltiplas plataformas em sistemas de monitoramento inteligentes. A fusão de dados espectrais de NIR e Raman com informações de biossensores e percepção artificial possibilita caracterização mais robusta da qualidade láctea do que qualquer técnica isolada (Acharya *et al.*, 2026; Padmasri e Bama, 2026). A incorporação dessas plataformas a sistemas IoT com rastreabilidade por blockchain alinha-se aos princípios da Qualidade Alimentar 4.0, embora custos de implementação e ausência de protocolos padronizados ainda representem obstáculos para adoção ampla (Padmasri e Bama, 2026). O desenvolvimento de inteligência artificial explicável (XAI) emerge como necessidade crítica para garantir aceitação regulatória, vinculando resultados analíticos a características moleculares quimicamente significativas e proporcionando a transparência exigida pelos sistemas de controle de qualidade alimentar (Acharya *et al.*, 2026).



Inteligência artificial e sensores

A crescente complexidade da cadeia produtiva do leite tem impulsionado a integração de inteligência artificial (IA) e sistemas de sensores como ferramentas estratégicas para o controle de qualidade láctea, permitindo a detecção de adulterantes, predição de parâmetros de qualidade e automação de processos decisórios em tempo real (Sharma *et al.*, 2026; Pan *et al.*, 2024).

Os algoritmos de aprendizado de máquina (ML) e aprendizado profundo (DL) têm desempenhado papel central na interpretação de dados espectrais, sensoriais e físico-químicos gerados pelos sistemas de análise do leite, superando abordagens estatísticas convencionais especialmente em cenários de adulteração múltipla e alta variabilidade de matriz (Acharya *et al.*, 2026). Entre os algoritmos mais empregados destacam-se Random Forest, SVM, KNN e XGBoost, aplicados tanto para classificação, distinguindo leite puro de adulterado, quanto para regressão, predizendo concentrações de gordura, proteína, lactose e adulterantes específicos (Padmasri e Bama, 2026). Em tarefas de classificação, Random Forest alcançou desempenho de 1,000, enquanto SVM atingiu 0,9565 na detecção de adulterantes em leite (Gómez *et al.*, 2026).

No âmbito do DL, redes neurais convolucionais (CNN) e redes de atenção espaço-temporal têm demonstrado capacidade superior de extração automática de características espectrais. Modelos baseados em atenção espaço-temporal aplicados a dados Raman de 3000 amostras alcançaram acurácia de 94,6% e F1-score de 93,0 na detecção simultânea de melamina, uréia e água, superando CNN e SVM convencionais (Acharya *et al.*, 2026). Redes neurais artificiais (ANN) aplicadas a espectros VIS-NIR de bebidas lácteas demonstraram valores de R^2 entre 0,946 e 0,989, superando modelos PLS na predição de propriedades físico-químicas (Padmasri e Bama, 2026).

A Internet das Coisas (IoT) possibilita a interconexão de sensores e dispositivos analíticos em redes inteligentes capazes de coletar, transmitir e processar dados em tempo real ao longo de toda a cadeia produtiva láctea (Padmasri e Bama, 2026). Sistemas NIR integrados a plataformas IoT têm sido implementados em sistemas automáticos de ordenha, permitindo análise contínua da composição do leite sem interrupção do processo produtivo (Li *et al.*, 2026). Plataformas como o Milk PIT demonstram o potencial de adoção em larga escala quando integradas a IA, computação em nuvem e blockchain, suportando diagnósticos preditivos de saúde animal e monitoramento contínuo de qualidade (Padmasri e Bama, 2026). A computação de borda (*edge computing*) emerge como abordagem complementar, processando dados diretamente na fonte sem depender de conectividade contínua,

reduzindo latência e melhorando a velocidade das avaliações de qualidade em regiões com infraestrutura limitada (Padmasri e Bama, 2026).

O desenvolvimento de sensores portáteis e miniaturizados representa um dos vetores mais dinâmicos de inovação para o controle de qualidade do leite, com espectrômetros NIR de mão, biossensores eletroquímicos portáteis e plataformas SERS miniaturizadas possibilitando análises em campo com desempenho próximo ao laboratorial (Padmasri e Bama, 2026; Drisya *et al.*, 2025). Plataformas integradas que combinam múltiplos sensores com lógica de classificação por IA têm sido desenvolvidas para análise simultânea de parâmetros físico-químicos e de adulteração, incluindo soluções de baixo custo baseadas em Arduino viáveis para contextos de recursos limitados (Eshwari *et al.*, 2026).

Paralelamente, a adoção dessas tecnologias em contextos regulatórios exige não apenas desempenho preditivo, mas também transparência e interpretabilidade dos resultados. A inteligência artificial explicável (XAI) emerge como componente crítico nesse processo, vinculando classificações e predições a características moleculares quimicamente significativas e proporcionando a auditabilidade exigida pelos sistemas de controle de qualidade alimentar (Acharya *et al.*, 2026). A perspectiva futura aponta para plataformas analíticas autônomas, operando continuamente ao longo da cadeia láctea com transmissão em nuvem, rastreabilidade por blockchain e alertas automáticos de não conformidade, representando o caminho mais promissor para superar as limitações dos métodos tradicionais e garantir a segurança e autenticidade do leite em escala global (Padmasri e Bama, 2026; Li *et al.*, 2026).

Desafios e perspectivas

A regulamentação é um dos principais desafios para a expansão da fermentação de precisão aplicada à produção de proteínas lácteas. Embora essa tecnologia possibilite a obtenção de ingredientes funcionalmente semelhantes aos encontrados no leite convencional, os processos de aprovação regulatória ainda diferem entre os países (Purba e Sangsawad, 2025). Nos Estados Unidos, esses produtos podem ser avaliados por meio do sistema GRAS (Generally Recognized as Safe), enquanto na União Europeia estão sujeitos à regulamentação de Novel Foods, que exige avaliações rigorosas de segurança antes da comercialização. Além disso, questões relacionadas à nomenclatura e à rotulagem dos produtos obtidos por fermentação de precisão ainda permanecem em discussão, influenciando diretamente sua inserção no mercado (Purba e Sangsawad, 2025; Knychala *et al.*, 2024).

A aceitação do consumidor é considerada um fator determinante para o sucesso comercial dos produtos



obtidos por fermentação de precisão. Apesar do crescente interesse por alimentos sustentáveis e alternativas às proteínas de origem animal, muitos consumidores ainda apresentam dúvidas relacionadas à segurança, naturalidade e utilização de biotecnologia nos processos produtivos (Banovic *et al.*, 2024). Estudos demonstram que a percepção positiva aumenta quando os benefícios ambientais, nutricionais e éticos da tecnologia são adequadamente comunicados. Entretanto, a falta de conhecimento sobre o processo produtivo ainda representa uma barreira para sua ampla aceitação, tornando fundamentais as estratégias de educação e comunicação científica (Banovic *et al.*, 2024; Banovic e Grunert, 2023).

Os elevados custos de produção constituem uma das principais limitações para a consolidação da fermentação de precisão no setor alimentício. A necessidade de biorreatores de grande escala, meios de cultivo específicos, processos de purificação e infraestrutura tecnológica avançada resulta em altos investimentos iniciais. Além disso, desafios relacionados à escalabilidade industrial e à eficiência produtiva ainda dificultam a competitividade econômica desses produtos em comparação aos lácteos convencionais (Purba e Sangsawad, 2025; Knychala *et al.*, 2024).

A utilização de métodos rápidos de análise para monitoramento da qualidade do leite tem crescido significativamente devido à necessidade de obtenção de resultados em tempo real e maior eficiência no controle de qualidade. No entanto, a implementação dessas tecnologias ainda enfrenta desafios regulatórios relacionados à validação dos métodos, padronização dos protocolos analíticos e comprovação da equivalência em relação aos métodos laboratoriais convencionais (Poghossian *et al.*, 2019). Órgãos reguladores exigem que novos sensores, biossensores e sistemas automatizados apresentem confiabilidade, precisão e reprodutibilidade antes de serem incorporados aos programas oficiais de controle de qualidade, garantindo a segurança dos produtos lácteos e a proteção do consumidor (Darwesh *et al.*, 2025).

A adoção de métodos rápidos de análise, associados à inteligência artificial e à Internet das Coisas (IoT), pode contribuir para o aumento da segurança alimentar, da rastreabilidade e da transparência na cadeia produtiva do leite. Entretanto, a aceitação dessas tecnologias depende da confiança dos consumidores e dos próprios agentes do setor produtivo (Mhapsekar *et al.*, 2025). Sistemas inteligentes capazes de monitorar continuamente parâmetros físico-químicos e microbiológicos tendem a ser mais bem aceitos quando seus benefícios são claramente comunicados, especialmente em relação à segurança dos alimentos, redução de fraudes e melhoria da qualidade dos produtos. Dessa forma, a

divulgação científica e a transparência sobre o funcionamento dessas tecnologias tornam-se fundamentais para ampliar sua aceitação no mercado (Mhapsekar *et al.*, 2025; Petrokolou *et al.*, 2025).

Os custos de implementação representam uma das principais limitações para a adoção de métodos rápidos de análise em larga escala. A aquisição de sensores, biossensores, equipamentos espectroscópicos, sistemas de transmissão de dados e plataformas baseadas em inteligência artificial requer investimentos consideráveis, principalmente para pequenos produtores e laticínios de menor porte (Poghossian *et al.*, 2019). Apesar disso, estudos indicam que essas tecnologias podem reduzir custos operacionais a longo prazo por meio da diminuição de perdas produtivas, da detecção precoce de contaminações e da automação dos processos de monitoramento. Além disso, o desenvolvimento de sensores de baixo custo e sistemas inteligentes tende a favorecer a expansão dessas ferramentas na cadeia leiteira nos próximos anos (Fizza *et al.*, 2025; Visciano *et al.*, 2020).

A utilização de inteligência artificial (IA) e sensores inteligentes na cadeia leiteira tem ampliado as possibilidades de monitoramento em tempo real da qualidade do leite, da saúde animal e dos processos industriais. No entanto, a adoção dessas tecnologias ainda enfrenta desafios regulatórios relacionados à validação dos algoritmos, confiabilidade dos sensores, segurança dos dados e padronização dos sistemas utilizados (Mhapsekar *et al.*, 2025). Além disso, órgãos reguladores precisam estabelecer critérios para garantir que os resultados gerados por sistemas automatizados apresentem precisão e rastreabilidade equivalentes aos métodos convencionais de monitoramento e controle de qualidade (Khanashyam *et al.*, 2025).

CONCLUSÃO

As inovações tecnológicas aplicadas à cadeia leiteira vêm promovendo transformações significativas na produção, monitoramento e garantia da qualidade dos produtos lácteos. Entre essas tecnologias, a fermentação de precisão destaca-se pelo potencial de produzir proteínas bioidênticas às encontradas no leite bovino, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas alimentares mais sustentáveis e menos dependentes da produção pecuária convencional. Além dos benefícios ambientais associados à redução do consumo de recursos naturais e das emissões de gases de efeito estufa, essa tecnologia apresenta perspectivas promissoras para a obtenção de ingredientes com propriedades funcionais adequadas à fabricação de diversos derivados lácteos.

Paralelamente, o avanço dos métodos rápidos de análise, aliado ao uso de sensores inteligentes, espectroscopia, biossensores e ferramentas moleculares, tem possibilitado avaliações mais



rápidas, precisas e acessíveis da qualidade do leite. A integração dessas tecnologias com inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT) e sistemas de monitoramento em tempo real amplia a capacidade de detecção de adulterações, contaminantes e variações na composição do leite, fortalecendo a rastreabilidade e a segurança alimentar ao longo da cadeia produtiva. Entretanto, apesar dos avanços observados, desafios importantes ainda precisam ser superados. Aspectos relacionados à regulamentação, validação de métodos, aceitação dos consumidores, interpretabilidade dos algoritmos e custos de implementação continuam limitando a adoção ampla dessas tecnologias. No caso da fermentação de precisão, a redução dos custos produtivos e o aperfeiçoamento das estruturas proteicas produzidas representam etapas fundamentais para sua consolidação comercial. Da mesma forma, a padronização de protocolos analíticos e o desenvolvimento de sistemas inteligentes mais acessíveis são essenciais para ampliar a aplicação dos métodos rápidos de análise e da inteligência artificial na indústria láctea.

A convergência entre biotecnologia, automação, inteligência artificial e sistemas avançados de monitoramento configura uma das principais tendências para o futuro do setor leiteiro. O contínuo investimento em pesquisa, inovação e desenvolvimento tecnológico será fundamental para garantir produtos mais seguros, sustentáveis, rastreáveis e de elevada qualidade, atendendo às demandas crescentes dos consumidores e fortalecendo a competitividade da cadeia produtiva do leite.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao apoio do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC.

REFERÊNCIAS

ACHARYA, B. S.; NAIR, S.; SALAM, A. A. A. Quality Analysis and Detection of Adulterants and Contaminations in Milk/Milk Powder by Raman Spectroscopy. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v.25, n. e70403, p. 1-28, 2026. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70403>.

ANTUMA, L. J.; STADLER, M.; GARAMUS, V. M.; BOOM, R. M.; KEPPLER, J. K. Casein micelle formation as a calcium phosphate phase separation process: Preparation of artificial casein micelles through vacuum evaporation and membrane processes. **Innovative Food Science and Emerging Technologie**, v. 92, p. 103582, 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Mapa do Leite**. Brasília: MAPA, 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/agricultura/pt-](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/mapa-do-leite)

[br/assuntos/producao-animal/mapa-do-leite](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/mapa-do-leite). Acesso em: 23 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 77, de 26 de novembro de 2018**. Estabelece os critérios e procedimentos para a produção, acondicionamento, conservação, transporte, seleção e recepção do leite cru em estabelecimentos registrados no serviço de inspeção oficial. Brasília: MAPA, [2018]. Disponível em: in.gov.br. Acesso em: 23 abr. 2026.

BANOVIC, M.; LEARDINI, D.; GRONHOJ, A.; ASCHEMANN-WITZEL, J. **Moo-ving towards the future: consumer acceptance of precision fermentation technology and animal-free dairy proteins**. 2024. Disponível em: https://www.foodbiocluster.dk/Files/Files/FBCD/Viden/Moo-ving%20towards%20the%20future_Consumer%20acceptance%20of%20precision%20fermentation%20technology.pdf?utm. Acesso em: 22 jun. 2026.

BANOVIC, M.; GRUNERT, K. G. Consumer acceptance of precision fermentation technology: a cross-cultural study. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 89, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103435>.

DARWESH, O. M.; MOSTAFA, A.; EL-SAYED, H. S.; MATTER, I. A. Recent technologies for detection of milk contaminants. **Discover Food**, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44187-025-00423-5?utm>

DLUHOŠOVÁ, S.; BARTÁKOVÁ, K.; VORLOVÁ, L.; NAVRÁTILOVÁ, P.; HANUS, O.; SAMKOVÁ, E. Dairy Chain Safety in the Context of Antibiotic Residues—Current Status of Confirmatory Liquid Chromatography Methods: A Review. **Antibiotics**, v. 13, p. 1038, 2024. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13111038>.

EASTHAM, J.L.; LEMAN, A. R. Precision fermentation for food proteins: ingredient innovations, bioprocess considerations, and outlook — a mini-review. **Current Opinion in Food Science**, v. 58, p.101194, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101194>.

EMBRAPA GADO DE LEITE. **Anuário Leite 2022**: Pecuária Leiteira de Precisão. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/gado-de-leite/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1144110/anuario-leite-2022-pecuaria-leiteira-de-precisao>. Acesso em: 23 abr. 2026.



ESHWARI, K.; JOGI, P.; PRATHYUSHA, M.; GOUTHAMI, G.; IAHARI, S.; KADAM, D.; SYED, A. Low-Cost Arduino-Based Multi-Parameter Detection of Milk Adulteration. **International Journal of Current Science**, v. 16, n. 2, p. 145-151, 2026. <https://www.rjpn.org/ijcpub/papers/IJCS P26B1247.pdf>

FIZZA, K.; BANERJEE, A.; GEORGAKOPOULOS, D.; JAYARAMAN, P. P.; YAVARI, A.; DAWOD, A. An Inexpensive AI-Powered IoT Sensor for Continuous Farm-to-Factory Milk Quality Monitoring. **Sensors**, v. 25, n. 14, p. 4439, 16 jul. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s25144439>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Dairy Market Review**: overview of global dairy market and policy developments in 2022. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cc8217en/cc8217en.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2026.

GÓMEZ, J. K. C.; BURBANO, M. C. C.; BARRERA, L. D. P.; SOTO, O. A. F.; ACEVEDO, C. M. D.; FLORES-RAMÍREZ, R. Evaluation of Conventional Methods and Multisensory Systems for the Detection of Chemical Adulterants in Raw Milk. **Food Control**, v. 190, p. 112336, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2026.112336>

GULLIFA, G.; ALBERTINI, C.; AMORESANO, A.; PINTO, G.; ILLIANO, A.; DIRITO, P.; MATERAZZI, S.; RISOLUTI, R. A smart based screening system by MicroNIR and chemometrics for on-site authentication of buffalo milk in dairy industry. **Applied Food Research**, v. 5, p. 101159, 2025. <http://dx.doi.org/10.1016/j.afres.2025.101159>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Pecuária Municipal**: PPM. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: ibge.gov.br. Acesso em: 23 abr. 2025.

KHANASHYAM, A. C.; JAGTAP, S.; AGRAWAL, T. K.; THORAKKATTU, P.; MALAV, O. P.; TROLLMAN, H.; HASSOUN, A.; RAMESH, B.; MANOJ, V.; RATHNAKUMAR, K.; BEKHIT, A. E. A.; NIRMAL, N. Applications of artificial intelligence in the dairy industry: from farm to consumer. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 2025. Disponível em: <https://dSPACE.lib.cranfield.ac.uk/bitstreams/99e67507-47f6-48dd-8241-90742f5576f4/download?utm>. Acesso em: 22 jun. 2026.

KEPPLER, J.K.; BOOM, R.M. Downstream Processing of Food Proteins from Precision Fermentation. **Annual Review Of Food Science And Technology**, v. 17, p. 459-474, 28 abr. 2026. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-food-060424-091647>.

KNYCHALA, M.; BOING, L. A.; IENCZAK, J. L.; TRICHEZ, D.; STAMBUK, B. U. Precision Fermentation as an Alternative to Animal Protein, Review. **Fermentation**, v.10, p. 315, 2024. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060315>

KOSSMANN, H.; KARSLIOGLU, Ö. Ö.; BREUNIG, P. From Moo to Microbes: pathways for precision fermentation in recombinant protein production. **Journal Of Agriculture And Food Research**, v. 22, p. 102056, 2025. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102056>.

LI, T.; LI, N.; WANG, R.; JU, N.; ZHANG, D.; MA, X.; ZHU, N.; MA, J.; WANG, S.; JU, N.; ZHANG, Z. Graduate Student Literature Review: A review on near-infrared spectroscopy for rapid detection of hazardous substances in milk and dairy products. **Journal of Dairy Science**, v. 109, p. 49-47, 2026. 10.3168/jds.2025-27462.

LIU, Y.; AIMUTIS, W. R.; DRAKE, M. Dairy, Plant, and Novel Proteins: scientific and technological aspects. **Foods**, v. 13, p. 1010, 2024. <http://dx.doi.org/10.3390/foods13071010>

LIBERTY, J. T.; BROMAGE, S.; PETER, E.; IHEDIOHA, O. C.; ALSALMAN, F. B.; ODOGWU, T. S. CRISPR Revolution: Unleashing Precision Pathogen Detection to Safeguard Public Health and Food Safety”. **Methods**, v. 240, p. 180–94, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2025.04.018>.

DRISYA RAJ M. P.; ROOPA SHRI B.; CHINTA SUNEETHA; KANIMOZHI N.V.; SONALI L.; PAVITHRA R.; ASHOK KUMAR S.; PALPANDI RAJA R.; SUKUMAR M. Next-Generation Biosensors for Real-Time Quality Monitoring in the Food Industry. **Food Bioengineering**, v. 4, P. 564-588, 2025. <https://doi.org/10.1002/fbe2.70035>. MHAPSEKAR, R.; KILBANE, D.; DAVY, S.; ABRAHAM, L.; FENELON, M.; O'SHEA, N. A systematic review of the internet of things and artificial intelligence applications in milk quality monitoring and analysis. **International Journal of Dairy Technology**, 2025.

MAKSIN, I. V.; KUANDYKOVA, A.; POLYAKOVA, D. I.; KESAREVA, V. A.; LUZYANIN, T. A.; IVANOV, V. S.; SIMONOVA,



E. I.; KHUNTEEV, G. A.; KIRILLOVA, Y. G. Development of a Multiplex Lateral Flow Immunoassay for the Detection of Antibiotics in Milk Utilizing Lyophilized Gold Nanoparticle Conjugates. **Biosensors**, v. 15, p. 592, 2025. <https://doi.org/10.3390/bios15090592>.

MIRSALAMI, S. M.; MIRSALAMI, M. Advances in genetically engineered microorganisms: transforming food production through precision fermentation and synthetic biology. **Future Foods**, v. 11, p. 100601, 2025. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100601>.

NIELSEN, M. B.; MEYER, A. S.; ARNAU, J. The Next Food Revolution Is Here: Recombinant Microbial Production of Milk and Egg Proteins by Precision Fermentation. **Annu. Rev. Food Sci. Technol.**, v. 15, p. 173-187, 2024. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023-034256>.

OBAYOMI, O. V.; MALOMO, A. A.; OLANIRAN, A. F.; OSEMWEGIE, O. O.; OLOJEDE, A. O.; BEYIOKU, O. E.; ADEYEMI, O. S. Transition from fermentation to precision fermentation: role in sustainable food system. **Biotechnology Reports**, v. 50, p. 00952, 2026. <http://dx.doi.org/10.1016/j.btre.2026.e00952>.

PADMASRI, P.; BAMA, B. Sathya. Recent advances in near infrared spectroscopy and chemometric modeling for milk quality assessment: A comprehensive review. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 34, p. 3-25, 2026. <https://doi.org/10.1177/09670335261416167>.

PAN, Y.; LIU, J.; WANG, J.; GAO, Y.; MA, N. Invited review: application of biosensors and biomimetic sensors in dairy product testing. **Journal Of Dairy Science**, v. 107, p. 7533-7548, 2024. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2024-24666>.

PATEL, S. S.; BAINS, A.; KAUSHIK, R.; DHULL, S. B.; NAGRAIK, R.; FAREED, M.; JANGHU, S.; CHAWLA, P. Leveraging smart technologies to enhance safety in milk and milk-based products. **Food Control**, v. 182, p. 111871, 2026. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111871>.

PETROKOLOU, A.; TZIA, C.; KOUTINAS, A. A. Machine learning applications in dairy production. **Systems and Control Transactions**, v. 4, p. 2454-2459, 2025.

POGHOSSIAN, A.; GEISLER, H.; SCHÖNING, M. J. Rapid methods and sensors for milk quality

monitoring and spoilage detection. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 140, p. 111272, 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31170654/>.

PURBA, R. A. P.; SANGSAWAD, P. Biotechnology Approaches to Dairy Alternatives Through Precision Fermentation and Cellular Agriculture. **Food Science of Animal Resources**, v. 45, p. 1221-1250, 2025. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2025.e33>

SANGUBOTLA, R.; MASTAN, A.; KIM, J. Recent Advances in Electrochemical Biosensors for the Detection of Milk Adulterants. **Biosensors**, v. 16, p. 92, 2026. <https://doi.org/10.3390/bios16020092>.

SHARMA, A.; YADAV, M.; KUMAR, N.; CHANDU, G.; JANA, R.; PANDEY, P.; KUMAR, R. Rapid detection of milk adulteration using AI-driven portable colorimetric spectroscopy. **Discover Food**, v. 6, p. 1-23, 2026. <http://dx.doi.org/10.1007/s44187-026-00855-7>.

SHUKLA, A. D.; RAI, S.; RAMACHANDRAN, P.; SANGEETA, S.; TIWARI, A.; TIWARI, A. Precision fermentation: pioneering the future of sustainable and alternative animal protein production. **Applied Food Research**, v. 6, p. 102015, 2026. <http://dx.doi.org/10.1016/j.afres.2026.102015>.

SINGH, A. B.; BHAKAR, V.; GAURAV, G.; KHANDELWAL, C.; SARKAR, P.; SINGH, H.; DANGAYACH, G. S. Environmental sustainability of milk production: a comparative environmental impact analysis and sustainability evaluation. **Frontiers in Sustainability**, v. 5, 2024.

SINGH, P.; HABIBA, U.; SHAFI, Z.; NOOR, A.; PANDEY, V. K.; SINGH, R. Understanding the Concepts of Smart E-Nose Technology in Combination with Machine Learning for New Era of Food Safety: An Advanced Review. **Food Safety and Health**, v. 3, p. 518-34, 2025. <https://doi.org/10.1002/fsh3.70029>.

SUN, Y.; ZHONG, K.; NIE, L.; XU, Y.; WANG, Y.; YUAN, J.; JIANG, S.; LI, X.; ZHANG, Z.; LI, X.; JIANG, L. State-of-the-art in Food Safety: The Potential of CRISPR/Cas-based Lateral Flow Assay Technology in the Field of Food Analysis. **Food Safety and Health**, v. 3, p. 155-71, 2025. <https://doi.org/10.1002/fsh3.12082>.

VERMA, K.; DUHAN, P.; PAL, D.; VERMA, P.; BANSAL, P. Precision fermentation for the next generation of food ingredients: opportunities and challenges. **Future Foods**, v. 12, p.



100750, 2025. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100750>.

VISCIANO, P.; SCHIRONE, M. Rapid methods for assessing food safety and quality. **Foods**, v. 9, n. 4, p. 533, 2020.

XIE, S.; YUE, Y.; YANG, F. Recent Advances in CRISPR/Cas System-Based Biosensors for the Detection of Foodborne Pathogenic Microorganisms. **Micromachines**, v. 15, p. 1329, 2024. <https://doi.org/10.3390/mi15111329>.

YANG, Y.; KONG, X.; YANG, J.; XUE, X.; NIU, B.; CHEN, Q. Rapid Nucleic Acid Detection of *Listeria monocytogenes* Based on RAA-CRISPR Cas12a System. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, p. 3477, 2024. <https://doi.org/10.3390/ijms25063477>.