

TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA DE LEITES LÍQUIDOS

INOVAÇÃO, QUALIDADE E SUSTENTABILIDADE



FERNANDA ROBERT DE MELLO
ELANE SCHWINDEN PRUDENCIO

 Atena
Editora
Ano 2025

TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA DE LEITES LÍQUIDOS

INOVAÇÃO, QUALIDADE E SUSTENTABILIDADE



FERNANDA ROBERT DE MELLO
ELANE SCHWINDEN PRUDENCIO

 Atena
Editora
Ano 2025

2025 by Atena Editora

Copyright © 2025 Atena Editora

Copyright do texto © 2025, o autor

Copyright da edição © 2025, Atena Editora

Os direitos desta edição foram cedidos à Atena Editora pelo autor.

Open access publication by Atena Editora

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira Scheffer

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Yago Raphael Massuqueto Rocha



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

A Atena Editora tem um compromisso sério com a transparência e a qualidade em todo o processo de publicação. Trabalhamos para garantir que tudo seja feito de forma ética, evitando problemas como plágio, manipulação de informações ou qualquer interferência externa que possa comprometer o trabalho.

Se surgir qualquer suspeita de irregularidade, ela será analisada com atenção e tratada com responsabilidade.

O conteúdo do livro, textos, dados e informações, é de responsabilidade total do autor e não representa necessariamente a opinião da Atena Editora. A obra pode ser baixada, compartilhada, adaptada ou reutilizada livremente, desde que o autor e a editora sejam mencionados, conforme a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Cada trabalho recebeu a atenção de especialistas antes da publicação. A equipe editorial da Atena avaliou as produções nacionais, e revisores externos analisaram os materiais de autores internacionais.

Todos os textos foram aprovados com base em critérios de imparcialidade e responsabilidade.

TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA DE LEITES LÍQUIDOS: INOVAÇÃO, QUALIDADE E SUSTENTABILIDADE

| Autores:

Fernanda Robert de Mello
Elane Schwinden Prudencio

| Revisão:

As autoras

| Diagramação:

Thamires Gayde

| Capa:

Yago Raphael Massuqueto Rocha

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M527 Mello, Fernanda Robert de
Tecnologias emergentes na indústria de leites líquidos:
inovação, qualidade e sustentabilidade / Fernanda
Robert de Mello, Elane Schwinden Prudencio. –
Ponta Grossa - PR: Atena, 2025.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-3783-3
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.833252312>

1. Leite e produtos lácteos. I. Mello, Fernanda
Robert de. II. Prudencio, Elane Schwinden. III. Título.
CDD 637.1

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

📞 +55 (42) 3323-5493

📞 +55 (42) 99955-2866

🌐 www.atenaeditora.com.br

✉ contato@atenaeditora.com.br

CONSELHO EDITORIAL

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^a Dr^a Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof^a Dr^a Ariadna Faria Vieira – Universidade Estadual do Piauí
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Cirênia de Almeida Barbosa – Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Cláudio José de Souza – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Prof^a Dr^a. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Elio Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof^a Dr^a Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Prof^a Dr^a Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Prof. Dr. Joachin de Melo Azevedo Sobrinho Neto – Universidade de Pernambuco
Prof. Dr. João Paulo Roberti Junior – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof^a Dr^a Juliana Abonizio – Universidade Federal de Mato Grosso
Prof. Dr. Julio Cândido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Prof^a Dr^a Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof. Dr. Sérgio Nunes de Jesus – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia
Prof^a Dr^a Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

SUMÁRIO

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 1

1.1 A importância do leite líquido no setor de alimentos	2
1.2 Desafios da indústria leiteira tradicional.....	3
1.3 Por que investir em tecnologias emergentes?	5
1.4 Objetivos do livro	7
Referências	7

CAPÍTULO 2 - PANORAMA DA INDÚSTRIA DE LEITE LÍQUIDO ...9

2.1 Cadeia produtiva do leite	9
2.1.1 Produção primária	10
2.1.2 Coleta e transporte	11
2.1.3 Processamento industrial	11
2.1.4 Comercialização.....	12
2.2 Processos convencionais de pasteurização e UHT	13
2.2.1 Pasteurização.....	13
2.2.2 UHT	15
2.3 Tendências de consumo e exigências do mercado	16
Referências	19

CAPÍTULO 3 – TECNOLOGIAS DE PROCESSAMENTO NÃO TÉRMICO 22

3.1 Introduções aos métodos não térmicos	22
3.2 Processamento por Alta Pressão Hidrostática (HPP).....	23
3.3 Campos Elétricos Pulsados (PEF)	24
3.4 Ultrassom de Alta Intensidade (US).....	26
3.5 Avaliação da eficiência e impactos na qualidade nutricional	28
Referencias	30

SUMÁRIO

SUMÁRIO

CAPÍTULO 4 – TECNOLOGIAS DE PRESERVAÇÃO E EXTENSÃO DE VIDA DE PRATELEIRA	36
4.1 Nanotecnologia aplicada à conservação.....	36
4.2 Microfiltração e ultrafiltração.....	39
4.2.1 Microfiltração	41
4.2.2 Ultrafiltração	42
4.3 Uso de aditivos naturais e bioconservantes.....	43
4.4 Comparações com técnicas térmicas tradicionais.....	45
Referencias	46
CAPÍTULO 5 – SEGURANÇA ALIMENTAR E CONTROLE DE QUALIDADE	51
5.1 Detecção rápida de patógenos com biossensores.....	51
5.2 <i>Blockchain</i> para segurança e rastreabilidade	53
5.3 Monitoramento em tempo real da cadeia fria.....	56
5.4 Conformidade com normas nacionais e internacionais	58
Referencias	59
CAPÍTULO 6 – PERSPECTIVAS FUTURAS E CONCLUSÕES	65
6.1 Inovações em desenvolvimento	65
6.2 Barreiras à adoção de novas tecnologias.....	68
6.3 O papel da pesquisa e da universidade	68
CONSIDERAÇÕES FINAIS	71



CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A indústria de leites líquidos representa um setor estratégico no contexto alimentar e econômico, sendo essencial para a nutrição de milhões de pessoas e para a cadeia produtiva de diversos derivados lácteos. Nos últimos anos, contudo, este setor tem enfrentado desafios significativos, decorrentes tanto de mudanças no perfil de consumo quanto das exigências crescentes em relação à qualidade, segurança e sustentabilidade dos produtos. O consumidor moderno demanda alimentos mais seguros, nutritivos, de fácil rastreabilidade e produzidos com menor impacto ambiental.

Neste cenário, a adoção de tecnologias emergentes surge como uma estratégia crucial para a modernização da indústria de leites líquidos. Processos não térmicos, métodos avançados de preservação, biossensores, blockchain para rastreabilidade e nanotecnologia aplicada à conservação são exemplos de inovações que permitem ampliar a vida útil dos produtos, preservar suas características nutricionais, garantir a segurança alimentar e reduzir o desperdício, ao mesmo tempo em que promovem eficiência e sustentabilidade na produção.

O presente livro propõe uma análise abrangente dessas tecnologias, contextualizando seu desenvolvimento científico, sua aplicação industrial e os impactos práticos na cadeia de produção de leites líquidos. A obra se estrutura em capítulos que abordam desde a introdução à importância do leite líquido e os desafios da indústria tradicional, passando pelo panorama produtivo, as tecnologias de processamento e preservação, até as perspectivas futuras e a avaliação das barreiras à adoção de inovações.

Ao reunir informações teóricas e práticas e tendências de mercado, esta obra busca oferecer subsídios valiosos para estudantes, pesquisadores, profissionais da indústria e gestores, incentivando a reflexão sobre como a tecnologia pode transformar a indústria de leites líquidos, tornando-a mais competitiva, segura, sustentável e alinhada às demandas contemporâneas.

1.1 A importância do leite líquido no setor de alimentos

O leite é uma das commodities agropecuárias mais importantes do mundo e todos os dias, bilhões de pessoas consomem leite no mundo, nas suas mais diversas formas. Ele apresenta importância econômica como fonte de renda e sobrevivência para grande parte da população mundial, além de ser uma fonte vital de nutrição (SIQUEIRA, 2019).

O leite desempenha um papel crucial tanto na esfera econômica quanto na nutricional e tecnológica. Sua ingestão está intrinsecamente ligada ao cenário econômico, onde nações com alto Produto Interno Bruto (PIB) per capita geralmente apresentam um elevado consumo per capita de leite, e aquelas com baixo PIB per capita têm índices de consumo mais baixos, um padrão que se repete em produtos de origem animal (VIEIRA, 2009).

Segundo estimativas da Food and Agricultural Organization (FAO) a produção total de leite de todas as espécies no mundo em 2024 foi de 940 bilhões de quilos, representando um crescimento de 1,5% sobre a produção do ano anterior. O rebanho de gado de leite no mundo alcança 270 milhões de cabeças e ocupa 20% das terras agrícolas do planeta. Mais de um bilhão de pessoas estão ligados de alguma forma com a cadeia produtiva dos lácteos, dos quais 600 milhões vivem nas propriedades onde se produz leite e mais 400 milhões estão ligadas a atividades que dão suporte à cadeia produtiva, como fornecimento de insumos, conhecimento, logística, processamento e distribuição. O número total de empregos diretos gerados pelo setor no mundo está estimado em 240 milhões, dos quais mais de 80 milhões são mulheres. Existem 133 milhões de propriedades rurais que se dedicam à produção de leite, das quais, 37 milhões são liderados por mulheres (GLOBAL DAIRY PLATFORM, 2020).

No ranking de produção de leite total dos seis maiores países produtores se destacam a Índia, com 22% da produção mundial, o bloco da União Europeia com 27 países em segundo lugar, os Estados Unidos da América (EUA) em terceiro, seguido de Paquistão, China e Brasil em quarto, quinto e sexto lugares, respectivamente. Encontramos muitas divergências nas estatísticas da produção mundial de leite em função da grande participação do leite informal no abastecimento de países populosos como a Índia, China e Paquistão. Nos EUA também encontramos o melhor índice de produtividade média, atingindo mais de 10 mil litros/vaca/ano (SPIES, 2023).

Devido às políticas de comércio internacionais, apenas cerca de 8% da produção mundial de lácteos é comercializada internacionalmente. Mesmo grandes produtores, como o Brasil e a Índia têm dificuldades quanto à exportação. Isso ocorre devido às políticas de comércio praticadas pelos países desenvolvidos, como os Estados Unidos, que priorizam o mercado interno, criando incentivos aos produtores e dificultando a importação de derivados lácteos. Essas são medidas criadas para proteger os produtores nacionais dos produtos concorrentes (EMBRAPA, 2020).

A produção de leite e derivados constitui um dos principais braços do agronegócio brasileiro. De acordo com dados disponibilizados pelo IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a produção de leite no Brasil alcançou 35,37 bilhões de litros em 2023, representando aumento de 2,38% em relação aos 34,55 bilhões de litros registrados em 2022. (EMBRAPA, 2025),

As regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul se destacam na produção, principalmente os estados de Minas Gerais, Goiás, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Juntos, esses cinco estados responderam por 68,63% da produção nacional, apresentando pequena redução na participação em comparação com 2022.

No Brasil, a indústria de laticínios ocupa o segundo lugar em importância na indústria de alimentos, ficando apenas atrás dos produtos derivados da carne. Ela supera os segmentos de beneficiamento de chá, café, cereais e açúcares. Embora o nível de consumo de leite no país seja considerado mediano, ele se mantém acima da média de muitos países vizinhos. Vale mencionar que, embora não haja uma recomendação oficial para o consumo de lácteos da Food and Agricultural Organization (FAO) ou da Organização Mundial da Saúde (OMS), o consumo per capita brasileiro se alinha às recomendações adotadas por vários países, que sugerem o consumo de 2 porções, equivalente a cerca de 480-500 ml de leite por dia (SIQUEIRA, 2019).

1.2 Desafios da indústria leiteira tradicional

A indústria leiteira tradicional enfrenta múltiplos desafios que comprometem sua competitividade no setor de alimentos. Entre os principais, destacam-se a elevada perecibilidade do leite, que exige rigorosos cuidados logísticos e de conservação, e as crescentes pressões relacionadas às questões ambientais, como emissões de gases de efeito estufa e uso intensivo de recursos naturais. Soma-se a esses fatores a mudança no perfil do consumidor, marcada pela crescente adesão a produtos de origem vegetal e, consequentemente, pela redução no consumo de alimentos de origem animal.

De acordo com Thaler Neto, André et al (2020) a produção de leite com boa qualidade é um dos principais desafios para a melhoria da competitividade dos produtos lácteos no mercado.

A perecibilidade do leite constitui um dos principais entraves para a indústria leiteira, pois sua composição rica em nutrientes cria um ambiente altamente favorável ao crescimento de microrganismos. Essa característica exige rigorosos cuidados higiênicos em todas as etapas da cadeia produtiva, desde a ordenha até a distribuição final. Qualquer falha nas práticas de higiene, no controle de temperatura ou no transporte pode comprometer a qualidade microbiológica e físico-química do

produto, reduzindo sua vida útil e colocando em risco a segurança alimentar do consumidor. Por isso, a manutenção de cadeias de refrigeração eficientes, associada à aplicação de boas práticas de fabricação e monitoramento constante, é fundamental para garantir a estabilidade e a aceitação do leite líquido no mercado.

As pressões ambientais sobre a indústria leiteira têm se intensificado, sobretudo em razão do impacto significativo que a produção de leite exerce sobre os recursos naturais e o clima. A atividade está associada a elevadas emissões de gases de efeito estufa, principalmente metano oriundo da fermentação entérica dos ruminantes, além do consumo intensivo de água e da geração de resíduos orgânicos que exigem manejo adequado. Esses fatores colocam o setor no centro dos debates sobre sustentabilidade e mudanças climáticas, demandando soluções que minimizem seus efeitos negativos. Nesse cenário, cresce a exigência por práticas produtivas mais responsáveis, como o uso de tecnologias para redução de emissões, o reaproveitamento de efluentes e a busca por sistemas de produção integrados, capazes de conciliar eficiência econômica com responsabilidade ambiental.

Empresas que operam no setor de laticínios no Brasil estão cientes desses desafios e estabeleceram programas de incentivo à produção de leite com redução das emissões de gases de efeito estufa. Esses programas contemplam especialmente a assistência técnica direcionada às questões de emissões e de eficiência produtiva da propriedade, capacitando produtores e associando novos conhecimentos à produção. Ainda há nesses programas a possibilidade de modernização dos sistemas de produção pelo financiamento de novas tecnologias e também há um incentivo com pagamento adicional pelo leite produzido com adoção de práticas mitigadoras de gases de efeito estufa (EMBRAPA, 2025).

A mudança no perfil do consumidor representa também um desafio estratégicos para a indústria leiteira tradicional. Cresce, de forma consistente, a busca por alternativas alimentares de origem vegetal, motivada por fatores que vão desde preocupações com saúde, intolerâncias e alergias até questões éticas, ambientais e de bem-estar animal.

Nos últimos anos, tem-se observado a crescente demanda por produtos à base de plantas. Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Alimentos (ABIA), dados da Euromonitor indicam que o mercado “plant-based” cresceu 70% entre 2015 e 2020. Além disso, informações da Mintel apontam que o Brasil liderou o número de lançamentos de produtos desse segmento na América Central e do Sul (ABIA, 2021).

Esse movimento tem impulsionado a expansão do mercado de bebidas vegetais e derivados, que já não são vistos apenas como substitutos, mas como produtos com identidade própria e forte apelo mercadológico. Consequentemente, observa-se uma redução gradual no consumo de leite de origem animal em determinados segmentos

populacionais, sobretudo entre jovens e consumidores urbanos mais conscientes. Essa tendência pressiona a indústria a repensar seus modelos de produção, comunicação e inovação, sob pena de perder competitividade em um cenário de mudanças rápidas nas preferências alimentares.

Esse cenário representa um desafio importante para a indústria de leite tradicional, que precisa se adaptar às novas preferências de consumo e à competitividade desse mercado em expansão.

Além disso deve-se considerar que a cadeia produtiva do leite no Brasil passa por grandes desafios para se equiparar em competitividade com a produção de lácteos dos principais países exportadores mundiais, especialmente com os vizinhos Uruguai e Argentina, amparados no Acordo de Mercosul. As frequentes crises do setor são o reflexo da ação de forças concorrentiais que atuam sobre os diversos elos da cadeia. Em cada crise os gargalos que geram custos maiores na produção brasileira ficam mais evidentes (SPIES, 2023).

O Brasil vem passando por um período de profundo ajuste em sua produção de leite, o que ajuda a explicar a elevação do nível de importação e o aumento do déficit da balança de pagamentos de lácteos. Houve expressiva redução do número produtores, da ordem de 13% entre os anos de 2006 e 2017, e o processo está em andamento. Além deste fator, houve também forte redução do número de vacas ordenhadas, vindo de um pico em 2011 de 23,23 milhões de cabeças para 15,66 milhões em 2023, redução de 33%. Importante ainda considerar o aumento da produtividade animal no período de 2000 a 2023, que cresceu 104% ao atingir 2.254 litros/vaca/ano. Isto tem mantido a produção em situação de oscilação com desempenho pouco expressivo (EMBRAPA, 2025)

Nesse cenário, a indústria leiteira tradicional precisa investir em inovação tecnológica, eficiência produtiva e estratégias de comunicação para manter sua relevância e atender às novas demandas do mercado.

1.3 Por que investir em tecnologias emergentes?

Tecnologias emergentes são inovações científicas ou técnicas que estão em fase de desenvolvimento ou adoção inicial e que têm o potencial de causar mudanças significativas em processos, produtos ou mercados. Elas se caracterizam por oferecer soluções novas ou aprimoradas, muitas vezes rompendo com métodos tradicionais, aumentando a eficiência, melhorando a qualidade, reduzindo impactos ambientais ou criando novas oportunidades de negócio.

Na indústria de leites líquidos, essas tecnologias incluem métodos de processamento não térmico, nanotecnologia, biossensores e sistemas avançados de rastreabilidade, oferecendo maior eficiência, qualidade, segurança alimentar e sustentabilidade

De acordo com Thaler Neto, André et al (2020) A cadeia produtiva do leite passa por um momento de grandes mudanças no país, com potencial de se destacar como um dos principais produtos na economia nacional. Observa-se um importante processo de profissionalização de parcela considerável dos produtores de leite, nos seus mais diversos aspectos

A agropecuária brasileira tem se transformado pelo empreendedorismo dos produtores, por políticas públicas de apoio e, fundamentalmente, pelo desenvolvimento de ciência, tecnologia e inovação. Este último fator, além de promover contínuos ganhos de produtividade que pouparam terra, tem permitido substituir a força de trabalho por meio da mecanização, automação e robotização da produção, o que demanda trabalhadores cada vez mais qualificados (EMBRAPA, 2025)

A nova fronteira tecnológica, que busca maior controle sobre os processos produtivos, converge para a agricultura e a produção de precisão, combinando biotecnologia, nanotecnologia e ciência da informação. Essas tecnologias disruptivas, que trazem ganhos significativos de produtividade e impactam a forma e o local de produção, exigem conhecimentos complexos e estão impulsionando o desenvolvimento de uma agropecuária brasileira pujante e competitiva no cenário global (EMBRAPA, 2025)

Investir em tecnologias emergentes na cadeia produtiva do leite é fundamental para enfrentar os limites do modelo tradicional e responder às novas demandas do mercado global. A adoção de ferramentas como sensores inteligentes para monitoramento da qualidade, automação da ordenha, blockchain para rastreabilidade e biotecnologias voltadas ao controle sanitário não apenas aumenta a eficiência e a transparência do processo produtivo, como também reduz perdas e custos operacionais.

Além disso, tais inovações contribuem para a sustentabilidade ambiental, ao otimizar o uso de água, energia e insumos, mitigando impactos negativos frequentemente associados à produção intensiva.

Do ponto de vista estratégico, investir em tecnologias emergentes permite que a indústria leiteira amplie sua competitividade diante da pressão de alternativas vegetais e atenda às expectativas de consumidores mais exigentes quanto a qualidade, segurança alimentar e responsabilidade socioambiental.

Assim, a inovação tecnológica deixa de ser apenas uma opção e passa a constituir um requisito para a sobrevivência e renovação da cadeia produtiva do leite.

1.4 Objetivos do livro

O presente livro tem como objetivo analisar o papel das tecnologias emergentes na indústria de leites líquidos, discutindo de forma crítica suas contribuições para a inovação, a qualidade e a sustentabilidade ao longo da cadeia produtiva. Busca-se apresentar os avanços científicos e tecnológicos aplicáveis ao setor, avaliar seus impactos na segurança e no valor nutricional do leite, bem como refletir sobre os desafios socioeconômicos e ambientais que permeiam a adoção dessas inovações.

Além disso, a obra pretende contextualizar a importância do leite líquido dentro do setor de alimentos, destacando seu papel estratégico na economia e na saúde pública, e abordar os desafios enfrentados pela indústria tradicional, como perdas pós-coleta, limitações nos processos térmicos convencionais e mudanças nos hábitos de consumo. Ao explorar tecnologias de processamento não térmico, métodos de preservação inovadores e ferramentas avançadas de controle de qualidade, o livro oferece uma visão abrangente das alternativas disponíveis para aumentar a eficiência produtiva, reduzir impactos ambientais e atender às exigências regulatórias.

Outro objetivo fundamental é apresentar uma análise crítica das tendências de mercado, bem como o papel da pesquisa científica e da colaboração entre universidades e empresas no desenvolvimento de soluções inovadoras. Com isso, a obra busca fornecer subsídios teóricos e práticos para estudantes, pesquisadores, profissionais da indústria, gestores e tomadores de decisão interessados em compreender as transformações que moldam o presente e o futuro do setor lácteo.

Por fim, o livro também pretende servir como referência para a formulação de políticas, estratégias industriais e programas de capacitação, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis e a integração de tecnologias emergentes que promovam não apenas a competitividade do setor, mas também a segurança alimentar e a valorização nutricional do leite.

Referências

ABIA. Associação Brasileira da Indústria de Alimentos. Consumo de alimentos “plant based” avança 70%. 2021. Disponível em: <https://www.abia.org.br/noticias/consumo-de-alimentos-plant-based-avanca-70>. Acesso em: 3 out. 2025.

BARBOSA, N. E. A. et al. Intolerância à lactose: revisão sistemática. Pará Research Medical Journal, v. 4, n. 33, p. 1–10, 2020.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da Pecuária Municipal 2023. Brasília, DF: IBGE, 2023. ISSN 0101-4234.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Produção de leite e as mudanças climáticas. Anuário Leite 2025. Edição digital. Disponível em: <https://www.embrapa.br/gado-de-leite>. Acesso em: 3 out. 2025.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Circular Técnica: O comércio internacional do agronegócio do leite. Juiz de Fora, MG: Embrapa Gado de Leite, 2020. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/217973/1/Circular-tecnica-121.pdf>. Acesso em: 3 out. 2025.

GLOBAL DAIRY PLATFORM. Annual Review 2016. Rosemont, IL, [2017]. Disponível em: <https://www.globaldairyplatform.com>. Acesso em: 22 out. 2025.

GLOBAL DAIRY PLATFORM. Página institucional. Disponível em: <https://www.globaldairyplatform.com>. Acesso em: 30 set. 2025.

HEMME, T. (ed.). IFCN Dairy Report 2018. Kiel, Germany: IFCN, 2018.

SIQUEIRA, K. B. O mercado consumidor de leite e derivados. Juiz de Fora, MG: Embrapa Gado de Leite, 2019.

SPIES, A. Propostas da Aliança Láctea Sul-Brasileira para alcançar 10 objetivos estratégicos que resultarão na competitividade global dos produtos lácteos. Aliança Láctea Sul-Brasileira, 2023. Disponível em: <https://spiesagro.com/wp-content/uploads/2025/07/PLANO-DE-DESENVOLVIMENTO-DA-COMPETITIVIDADE-DO-LEITE-SUL-BRASILEIRO-ALSB-v-junho-2025.pdf>. Acesso em: 30 set. 2025.

SILVA, R. T. et al. Alergias alimentares na infância: sistema imunológico e fatores envolvidos. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 9, p. 66324–66342, 2020.

THALER NETO, A. et al. Qualidade do leite. Curitiba: SENAR-AR/PR, 2020. 125 p.

VIEIRA, A. C. P. A percepção do consumidor diante dos riscos alimentares: a importância da segurança dos alimentos. 2009. Disponível em: <[link não informado]>. Acesso em: 9 out. 2025.



CAPÍTULO 2 - PANORAMA DA INDÚSTRIA DE LEITE LÍQUIDO

2.1 Cadeia produtiva do leite

A cadeia produtiva pode ser conceituada como um conjunto de relações comerciais e financeiras que estabelecem, entre todos os estados de transformação, um “fluxo de troca, situado de montante a justante, entre fornecedores e clientes” (BRUM, 2012). Trata-se de uma “sequência de operações interdependentes que tem por objetivo produzir, modificar e distribuir um produto” (ZYLBERSZTAJN, 2000). Engloba os fornecedores de insumos e serviços, processamento e transformação, agentes de distribuição e comercialização, além dos consumidores finais (CASTRO, 2001).

A cadeia produtiva do leite é uma das mais complexas e relevantes do setor agroindustrial, envolvendo uma ampla rede de atores, processos e tecnologias que se interligam. Nesta cadeia, o início se dá com a produção de insumos, da qual fazem parte empresas fabricantes de matéria prima, equipamentos, crédito, serviços e pesquisa (BRUM & KELM, 2015).

No Brasil, a cadeia produtiva leiteira destaca-se como uma das principais atividades econômicas, com forte efeito na geração de emprego e renda. Presente em quase todos os municípios brasileiros, a produção de leite envolve mais de um milhão de produtores no campo, além de gerar outros milhões de empregos nos demais segmentos da cadeia. Em 2019, o valor bruto da produção primária de leite atingiu quase R\$ 35 bilhões, o sétimo maior dentre os produtos agropecuários nacionais (BRASIL, 2020). Já na indústria de alimentos, esse valor mais do que duplica, com o faturamento líquido dos laticínios atingindo R\$ 70,9 bilhões, atrás apenas dos setores de derivados de carne e beneficiados de café, chá e cereais (ABIA, 2020).

A cadeia produtiva brasileira de leite ainda tem um enorme potencial a ser explorado. Exemplo disso é a sua tímida participação no mercado exportador de lácteos, no qual o Brasil se caracteriza como importador líquido de lácteos. Na média dos últimos 20 anos foi necessário importar cerca de 5% da produção nacional inspecionada para suprir o consumo interno, o que equivale recentemente a entrada de dois bilhões de litros de leite, provenientes da Argentina e do Uruguai, principalmente (ROCHA, 2020).

Essa cadeia se destaca não apenas por sua importância econômica e social, mas também por sua contribuição nutricional e papel estratégico na segurança alimentar.

De forma geral, a cadeia do leite pode ser dividida em quatro grandes etapas: (a) produção primária; (b) coleta e transporte; (c) processamento industrial e (d) comercialização.

2.1.1 Produção primária

Na produção primária, estão incluídas as atividades desenvolvidas nas propriedades rurais, como o manejo do rebanho, alimentação, ordenha, controle sanitário e armazenamento do leite cru. A qualidade da matéria-prima obtida nessa etapa é determinante para o sucesso das etapas subsequentes, sendo fortemente influenciada por fatores como bem-estar animal, condições higiênico-sanitárias e adoção de boas práticas agropecuárias.

De acordo com a Instrução Normativa, n° 77 de 2018 (BRASIL, 2018) as boas práticas agropecuárias: conjunto de atividades, procedimentos e ações adotadas na propriedade rural com a finalidade de obter leite de qualidade e seguro ao consumidor e que englobam desde a organização da propriedade, suas instalações e equipamentos, bem como formação e capacitação dos responsáveis pelas tarefas cotidianas realizadas;

O Brasil detém o segundo maior rebanho de vacas ordenhadas do mundo, atrás apenas da Índia (FAO, 2019). Apesar de o Brasil estar nas primeiras posições nos rankings mundiais de produção de leite e de rebanho de vacas ordenhadas, quando se trata de produtividade animal a situação é bem diferente. Nessa lista, o Brasil é apenas o número 84 do mundo com produtividade cinco vezes inferior aos dois primeiros colocados (Israel e Estados Unidos) que ultrapassam 10 mil litros/vaca no ano (FAO, 2019).

O segmento da produção é composto basicamente por um grande número de pequenos produtores, que atuam de forma dispersa no mercado. A literatura cita, com freqüência que aproximadamente 70% dos produtores são responsáveis por apenas 20% da produção nacional, onerando assim o custo de coleta do leite e da assistência técnica, dificultando o investimento na atividade e o armazenamento do produto, comprometendo a qualidade da matéria prima (ALCIMAR, 2002).

2.1.2 Coleta e transporte

A coleta e o transporte constituem o elo entre o campo e a indústria. Nessa fase, a manutenção da cadeia do frio é essencial para evitar a proliferação de microrganismos e garantir a integridade físico-química do leite. O uso de tanques de refrigeração e veículos isotérmicos é uma exigência técnica e regulatória que visa preservar a qualidade até o recebimento na unidade processadora.

Atualmente, o leite é armazenado nas propriedades rurais e transportado sob refrigeração, podendo, ainda, ser mantidos e transportados em temperatura ambiente, em latões de 50 litros, desde que a indústria aceite trabalhar com esse tipo de matéria-prima, que ele atenda aos padrões estabelecido para leite cru refrigerado e que chegue na indústria no máximo até duas horas após a conclusão da ordenha. (VIDAL, SARAN NETTO, 2018).

Além do monitoramento da temperatura do leite, é importante que seja feita a limpeza e sanitização rigorosa das superfícies do tanque e das conexões logo após a coleta do produto, de forma a assegurar a produção de leite de alta qualidade (VIDAL, SARAN NETTO, 2018).

De acordo com a Instrução Normativa nº 77/2018 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, o leite cru refrigerado deve ser armazenado em tanques isotérmicos e transportado em veículos devidamente higienizados, que garantam o cumprimento da cadeia do frio até sua chegada à indústria (BRASIL, 2018). A utilização de tanques de expansão direta e caminhões isotérmicos permite preservar as características sensoriais e nutricionais do leite, assegurando que o produto atenda aos padrões estabelecidos pela legislação vigente (VIDAL; SARAN NETTO, 2018). Além disso, a eficiência logística, a periodicidade da coleta e o controle de temperatura são fatores diretamente relacionados à sustentabilidade e à competitividade da cadeia produtiva, uma vez que influenciam custos operacionais e reduzem perdas pós-colheita (GUIMARÃES et al., 2020).

2.1.3 Processamento industrial

No processamento industrial, o leite passa por etapas de padronização, pasteurização, homogeneização e envase, podendo ser direcionado tanto ao consumo direto (leite pasteurizado e UHT) quanto à fabricação de derivados, como queijos, iogurtes e manteiga. Com o avanço da ciência e da tecnologia, surgem novas abordagens, como os métodos de processamento não térmico, que buscam reduzir perdas nutricionais e ampliar a vida útil sem comprometer a segurança do produto.

O processamento do leite tem como principal objetivo garantir a segurança microbiológica, a estabilidade físico-química e a conservação da qualidade nutricional do produto. Desta forma, o aquecimento destaca-se como uma das principais etapas do processo.

A pasteurização e o tratamento UHT (Ultra High Temperature) são métodos amplamente utilizados na indústria, pois inativam microrganismos patogênicos e deteriorantes, prolongando a vida útil sem comprometer significativamente as características sensoriais do leite (VIDAL; SARAN NETTO, 2018).

2.1.4 Comercialização

Na etapa de comercialização e distribuição envolve a logística, o controle de qualidade e as estratégias de marketing que conectam a indústria ao consumidor final. Nessa fase, ganham destaque temas como rastreabilidade, certificações de qualidade, sustentabilidade e inovação em embalagens.

A comercialização do leite representa a etapa final da cadeia produtiva e envolve um conjunto de processos logísticos, regulatórios e mercadológicos que asseguram a chegada do produto ao consumidor com qualidade e segurança. Nessa fase, são fundamentais o cumprimento das normas sanitárias, a manutenção da cadeia do frio e o controle de qualidade durante o transporte, armazenamento e distribuição.

O mercado de leite líquido no Brasil é caracterizado por uma ampla diversidade de produtos — pasteurizado, UHT e tipos A e C —, que se diferenciam pelo grau de processamento e pelas exigências de conservação (VIDAL; SARAN NETTO, 2018).

Além dos aspectos técnicos, a comercialização do leite também é influenciada por fatores econômicos, sazonais e de consumo, destacando-se a crescente demanda por produtos com maior valor agregado, como leites especiais, enriquecidos e de origem controlada, refletindo as tendências de inovação e diferenciação no setor lácteo (ABIA, 2021).

A cadeia produtiva do leite é, portanto, um sistema dinâmico e interdependente, no qual cada elo influencia diretamente a qualidade e o valor do produto final. A incorporação de tecnologias emergentes em todas as etapas — do manejo ao processamento e à distribuição — representa uma oportunidade concreta para elevar os padrões de eficiência, segurança e sustentabilidade do setor. Dessa forma, compreender a estrutura e os desafios dessa cadeia é fundamental para promover uma indústria láctea mais moderna, competitiva e alinhada às demandas do século XXI.

2.2 Processos convencionais de pasteurização e UHT

Os processos convencionais de tratamento térmico aplicados ao leite, como a pasteurização e o processamento UHT (Ultra High Temperature), constituem etapas fundamentais na indústria de laticínios, pois garantem a segurança microbiológica e a estabilidade do produto ao longo da vida de prateleira.. Eses processos térmicos representam marcos tecnológicos na indústria de leites líquidos, pois asseguram produtos seguros, estáveis e com ampla distribuição comercial, sendo continuamente aperfeiçoados para minimizar perdas nutricionais e melhorar a qualidade sensorial.

2.2.1 Pasteurização

De acordo com o Art. 255 do RIISPOA, “entende-se por pasteurização o tratamento térmico aplicado ao leite com objetivo de evitar perigos à saúde pública decorrentes de micro-organismos patogênicos eventualmente presentes, e que promove mínimas modificações químicas, físicas, sensoriais e nutricionais” (BRASIL, 2017).

A pasteurização é um tipo de tratamento térmico que pode ser realizado por um longo tempo a baixa temperatura (entre 63 e 65 °C/30 minutos) ou a mais alta temperatura por um período de tempo menor. Nesse caso, a temperatura deve ser elevada de 72 a 75 °C por 15 a 20 segundos, seguido de resfriamento em temperatura não superior à 4 °C (BRASIL, 2017). Esse processo tem sua eficiência determinada pela inativação da enzima fosfatase alcalina (BYLUND, 1995). Além da fosfatase alcalina inativa, o leite deve apresentar a enzima lactoperoxidase ativa. Essa enzima é mais termorresistente do que a fosfatase alcalina (85 °C/20 segundos) e assegura que o leite não foi submetido a uma pasteurização drástica (ORDÓNEZ ET AL., 2005).

Na pasteurização, o binômio tempo/temperatura é suficiente para tornar o produto microbiologicamente seguro por ser eficiente na eliminação de microrganismos patogênicos, como *Mycobacterium tuberculosis*, *Salmonella* spp., *E. coli*, *Campylobacter jejuni*, e *Listeria monocytogenes*. Além disso, microrganismos deteriorantes como coliformes, bactérias mesofílicas do ácido lático e psicrotróficos presentes no leite cru são inativados. Alguns microrganismos podem sobreviver ao processo de pasteurização do leite, como os micrococos resistentes ao calor (*Microbacterium* spp.) e esporos bacterianos. Embora algumas cepas de *Staphylococcus aureus* também possam sobreviver ao tratamento térmico, elas não crescem a ponto de formar quantidades de toxinas que sejam um risco a saúde (WALSTRA; WOUTERS; GEURTS, 2006). Os esporos de *Bacillus cereus* são os principais patógenos que sobrevivem à pasteurização e conseguem crescer à baixa temperatura, podendo produzir sabor amargo e deterioração do leite. A intoxicação por esse patógeno, geralmente, não é observada pois neste nível o leite já estaria impróprio ao consumo (LEWIS, 2003).

Na pasteurização lenta, o leite é processado em tanques de dupla parede, equipados com camisa de aquecimento, agitador mecânico e termômetro de controle. O aquecimento é feito de forma indireta, por meio da circulação de água quente ou vapor entre as paredes do tanque, atingindo cerca de 63 °C por 30 minutos, seguido de resfriamento gradual até 4 °C. Esse sistema é comumente utilizado em pequenas propriedades, laboratórios e queijarias artesanais, por ser de fácil operação e manutenção, embora tenha menor eficiência energética (VIDAL; SARAN NETTO, 2018).

Por outro lado, a pasteurização rápida utiliza equipamentos de fluxo contínuo, como o trocador de calor a placas, composto por um conjunto de placas metálicas finas e corrugadas que permitem a transferência térmica entre o leite e a água quente ou o vapor. O processo ocorre com o leite sendo aquecido rapidamente a 72–75 °C por 15 a 20 segundos e, em seguida, resfriado de forma instantânea a 4 °C em um circuito fechado e automatizado. Esse sistema é altamente eficiente, garantindo uniformidade térmica, menor risco de recontaminação e economia de energia, além de permitir a integração com outros equipamentos, como tubulações sanitárias, bombas centrífugas, válvulas automáticas e sistemas de controle de temperatura e fluxo (BRASIL, 2018; VIDAL; SARAN NETTO, 2018).

No Brasil, a diferenciação entre os tipos de leite pasteurizado está definida pela Instrução Normativa nº 77/2018 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2018). O leite pasteurizado tipo A refere-se ao produto obtido a partir de rebanhos com manejo sanitário rigoroso e produção exclusiva em pequena escala, geralmente diretamente na fazenda. Esse leite é processado na própria propriedade ou em laticínios localizados próximos, sendo submetido a pasteurização rápida e envase sob condições sanitárias controladas, garantindo maior padrão de qualidade e frescor. Já o leite pasteurizado tipo C, conhecido como leite comum, é produzido em grande escala e industrializado, podendo ser oriundo de diferentes propriedades e rebanhos. Esse leite é submetido a pasteurização, geralmente em sistemas industriais contínuos, atendendo às exigências de segurança e qualidade estabelecidas pela legislação, mas com menor controle direto sobre a origem individual do leite cru.

O leite pasteurizado apresenta características que refletem tanto a qualidade da matéria-prima quanto a eficiência do processamento térmico empregado. Do ponto de vista sensorial, este leite mantém cor branca característica, sabor levemente adocicado e aroma fresco, similar ao leite cru.

Em relação às propriedades físico-químicas, a acidez titulável deve variar entre 0,14 e 0,18 g de ácido láctico/100 mL, refletindo a estabilidade do leite e a ausência de fermentação excessiva. A densidade relativa, medida a 15 °C, deve apresentar valores

entre 1,028 e 1,034 g/mL para o leite integral e 1,028 a 1,036 g/mL para os leites semidesnatado ou desnatado, indicando composição consistente em sólidos totais e equilíbrio entre água e componentes sólidos (BRASIL, 2018). O **índice crioscópico** do leite pasteurizado deve situar-se entre -0,530°H e -0,555°H, correspondendo a temperaturas de congelamento de -0,512 °C a -0,536 °C, parâmetro utilizado para detectar adições de água ou alterações na composição do leite. Quanto aos sólidos não gordurosos, o teor mínimo exigido é de 8,4 g/100 g para o leite integral (BRASIL, 2018).

O teor mínimo de proteína total é de 2,9 g/100 g, enquanto a lactose anidra deve ser igual ou superior a 4,3 g/100 g, parâmetros que refletem a integridade nutricional do leite. Finalmente, os testes enzimáticos complementam a avaliação da eficácia do processamento térmico: a prova da fosfatase deve ser negativa, confirmando a destruição adequada da enzima indicadora de leite cru, enquanto a prova da peroxidase deve ser positiva, atestando a preservação de certas enzimas resistentes ao calor e garantindo a qualidade do processamento (BRASIL, 2018).

Do ponto de vista microbiológico, o leite pasteurizado deve atender aos limites estabelecidos pela legislação, que prevê contagem máxima de microrganismos mesófilos totais e ausência de patógenos como *Salmonella* spp. e *Escherichia coli* (BRASIL, 2018).

2.2.2 UHT

O tratamento térmico UHT tem como objetivo a utilização de um processo térmico rápido, visando a eliminação de microrganismos em fase vegetativa e esporulada, mantendo as características nutricionais do leite com mínimas alterações (FRANCO et al. 2008; JELEN, 1983).

Conforme definido no Art. 256 do RIISPOA, “entende-se por processo de ultra-alta temperatura - UAT ou UHT o tratamento térmico aplicado ao leite a uma temperatura entre 130 °C (cento e trinta graus Celsius) e 150 °C (cento e cinquenta graus Celsius), pelo período de dois a quatro segundos, mediante processo de fluxo contínuo, imediatamente resfriado a temperatura inferior a 32 °C (trinta e dois graus Celsius) e envasado sob condições assépticas em embalagens esterilizadas e hermeticamente fechadas” (BRASIL, 2017).

Antes de alcançar a temperatura de esterilização (130 – 150 °C), o leite passa pelo processo de pré-aquecimento, que consiste no aquecimento do leite a uma temperatura de 80 a 95 °C por 30 a 60 segundos. O pré-aquecimento tem como função estabilizar a β -lactoglobulina, de modo que não ocorra a deposição desta proteína, presente no soro, na seção posterior de aquecimento a alta temperatura (DATTA; DEETH, 2001).

O aquecimento do leite pode ser realizado de forma indireta, por meio de trocadores de calor ou de forma direta por injeção de vapor ou infusão de leite no vapor seguido de resfriamento, por expansão a vácuo. Quando o vapor é injetado no leite, sua temperatura é elevada quase instantaneamente para 140 a 150 °C, o leite é mantido nessa temperatura de acordo com o tempo de tratamento UHT e, em seguida, ocorre o resfriamento instantâneo, em uma câmara de expansão em que um vácuo parcial é mantido por uma bomba. O vácuo é controlado para garantir que a mesma quantidade de vapor colocada no leite seja retirada (BYLUND, 1995; WALSTRA; WOUTERS; GEURTS, 2006).

A legislação determina que o leite UHT deve manter suas características sensoriais que são: cor, aspecto líquido, sabor característico, isento de sabor e odor, além das características físico-químicas de acordo com os seguintes requisitos: matéria gorda em % integral (min. 3,0), semidesnatado (0,6 a 2,9). Desnatado (máx. de 0,5); Extrato seco desengordurado em % integral (min. 8,2), semidesnatado (min. 8,3) e desnatado (min. 8,4); Acidez em °D integral (14 a 18) semidesnatado (14 a 18) e desnatado (14 a 18) e Estabilidade ao etano 68% integral (estável), semidesnatado (estável) e desnatado (estável) (BRASIL, 2018).

O tratamento térmico e o envase asséptico do leite UHT garantem a manutenção das principais propriedades organolépticas e nutritivas, sem a utilização de conservantes e da refrigeração, facilitando o transporte e armazenamento, o que traz vantagens em relação ao leite pasteurizado, gerando um aumento de consumo do leite UHT, e a necessidade de um maior controle de qualidade (OLIVEIRA et.al., 2015).

2.3 Tendências de consumo e exigências do mercado

O segmento de alimentação vem passando por profundas transformações, motivado por mudanças sociais, culturais, tecnológicas e econômicas que vem redefinindo as preferências e prioridades dos consumidores. E isso se reflete também no setor lácteo. Essas alterações estão diretamente ligadas a tendências globais, como maior preocupação com a saúde, sustentabilidade, inovação tecnológica e conveniência no consumo (SIQUEIRA, 2024).

A saúde tem sido apontada como a tendência mais relevante e impulsionadora da inovação no mercado de alimentos e bebidas em nível global (Meziane, 2007). Todavia, apesar de os consumidores expressarem avaliações positivas sobre essas opções mais saudáveis, suas intenções de compra nem sempre correspondem ao que afirmam. Existem diferenças de percepção entre a adição de ingredientes (por exemplo, fibra) e a redução de ingredientes (por exemplo, açúcar), sendo que as primeiras são mais valorizadas que as segundas (Hanson & Yun, 2018).

Os consumidores têm atribuído maior valor a alimentos naturais, com características de frescor, qualidade nutricional e rastreabilidade de origem. Essa tendência reflete uma crescente conscientização sobre a relação entre alimentação e saúde, impulsionando a demanda por produtos com menor teor calórico, reduzido processamento industrial e enriquecidos com compostos bioativos capazes de promover o bem-estar e contribuir para a prevenção de doenças crônicas não transmissíveis. Essa transformação no perfil de consumo impõe novos desafios à indústria de alimentos, que deve alinhar inovação tecnológica, segurança e sustentabilidade às expectativas de um público cada vez mais informado e exigente (ABIA, 2021; MINTEL, 2020).

Na indústria de leites e derivados, observa-se um movimento em direção ao desenvolvimento de produtos com menor teor de gordura, açúcar e aditivos artificiais, além da inclusão de ingredientes funcionais, como proteínas de alto valor biológico, probióticos, prebióticos, ômega-3 e compostos bioativos.

Além disso, observa-se um crescimento significativo do público com restrições ou preferências alimentares específicas, que tem buscado produtos capazes de atender às suas necessidades nutricionais e, simultaneamente, promover o bem-estar físico e emocional.

Nesse cenário, a indústria de leites e derivados tem se adaptado para atender às novas demandas de consumo, desenvolvendo produtos voltados a públicos com restrições alimentares, intolerâncias ou preferências específicas. Entre esses, destacam-se os leites sem lactose, que possibilitam o consumo seguro por indivíduos com intolerância à lactose; os leites e iogurtes com teores reduzidos de gordura e açúcar, direcionados a consumidores que buscam o controle calórico e o equilíbrio nutricional; e os produtos enriquecidos com proteínas, fibras, probióticos e vitaminas, que visam promover benefícios adicionais à saúde intestinal e imunológica. Além disso, observa-se o crescimento dos leites vegetais e bebidas mistas — como as combinações de leite com aveia ou amêndoas — que ampliam o portfólio da indústria e reforçam seu compromisso com a inovação e a inclusão alimentar (VIDAL; SARAN NETTO, 2018; ABIA, 2021).

A preocupação ambiental, especialmente entre os consumidores mais jovens, também continua forte e impulsiona a busca por práticas mais sustentáveis. Empresas que adotarem processos produtivos com menor impacto ambiental, como redução de emissões de carbono e uso consciente de recursos naturais, terão vantagem competitiva. No entanto, os consumidores estão ficando mais exigentes com relação a isso: a transparência durante todo o processo produtivo tem ganhado força como motivador de compra. Assim, a transparência na cadeia produtiva, destacando a origem dos insumos e práticas de responsabilidade ambiental, será essencial para conquistar a confiança do público ((SIQUEIRA, 2024))

O setor lácteo é reconhecido por sua elevada demanda de recursos naturais — especialmente água e energia — e pela geração de efluentes e resíduos orgânicos. Diante desse cenário, empresas e instituições de pesquisa têm desenvolvido estratégias de mitigação de impacto ambiental, buscando alinhar produtividade, inovação e sustentabilidade.

Outro aspecto importante a ser considerado na mudança do comportamento do consumidor é a busca por experiências gastronômicas diferenciadas, sabores exóticos, ingredientes raros e diferenciados, que proporcionem maior exclusividade aos produtos.

Entre os exemplos mais evidentes está o crescimento do mercado de queijos especiais, como os maturados artesanais, queijos de leite cru com denominação de origem e os queijos finos com fungos específicos, como Brie, Camembert e Gorgonzola. Esses produtos são valorizados por consumidores que buscam sabores complexos, texturas diferenciadas e identidade regional, aspectos que remetem ao conceito de *terroir* e autenticidade (VIDAL & SARAN NETTO, 2018).

A praticidade permanece como um dos principais fatores que orientam o comportamento do consumidor há várias décadas e continua exercendo forte influência sobre a escolha dos produtos alimentícios. Observa-se uma preferência crescente por embalagens funcionais e de fácil manuseio, bem como por produtos prontos para o consumo e porções individualizadas, que atendem às demandas de conveniência e à dinâmica dos estilos de vida modernos. Essa tendência reforça a necessidade de a indústria investir em inovações em processamento e embalagem, capazes de aliar praticidade, qualidade e segurança alimentar.

Diante das transformações no perfil do consumidor e das exigências crescentes do mercado, torna-se evidente que a indústria de leites e derivados precisa adotar uma postura cada vez mais inovadora, sustentável e orientada pela qualidade. As tendências atuais apontam para a valorização de produtos mais naturais, funcionais e transparentes quanto à origem e ao processo produtivo, refletindo uma demanda por confiança e responsabilidade socioambiental. Nesse contexto, as empresas do setor lácteo que investem em tecnologias emergentes, práticas sustentáveis e comunicação clara com o consumidor consolidam-se de forma competitiva, acompanhando as novas dinâmicas de um mercado em constante evolução. Assim, compreender e atender a essas tendências não é apenas uma estratégia comercial, mas uma necessidade para garantir a relevância e a sustentabilidade da indústria no futuro (ABIA, 2021; VIDAL; SARAN NETTO, 2018).

Referências

ABIA. Associação Brasileira das Indústrias de Alimentação. Números do setor – faturamento. São Paulo: ABIA, 2019.

ABIA. Associação Brasileira das Indústrias de Alimentos. Relatório de mercado plant-based. São Paulo: ABIA, 2021.

ABIA. Associação Brasileira das Indústrias de Alimentação. Tendências de consumo e inovação no setor de alimentos. São Paulo: ABIA, 2021.

ALCIMAR, L. J. As transformações na cadeia produtiva do leite. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2002.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto n.º 9.013, de 29 de março de 2017. Dispõe sobre a inspeção industrial e sanitária de produtos de origem animal. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 29 mar. 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.º 77, de 26 de novembro de 2018. Estabelece os critérios e procedimentos para a produção, acondicionamento, conservação, transporte, seleção e recepção do leite cru refrigerado, do leite pasteurizado e do leite pasteurizado tipo A. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 230, p. 9–14, 30 nov. 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.º 76, de 26 de novembro de 2018. Aprova os regulamentos técnicos que fixam a identidade e as características de qualidade que devem apresentar o leite cru refrigerado, o leite pasteurizado e o leite pasteurizado tipo A. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 nov. 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Valor Bruto da Produção Agropecuária. Brasília, DF: MAPA, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/vbp-e-estimado-em-r-689-97-bilhoes-para-2020/202003VBPelaspeyresagropecuariapdf.pdf>. Acesso em: 6 out. 2025.

BRUM, A. L. Mercado e cadeias produtivas. In: SIEDENBERG, D. (org.). Desenvolvimento sob múltiplos olhares. Ijuí: Ed. Unijuí, 2012. p. 187–206.

BRUM, A. L.; KELM, M. A cadeia produtiva do leite: um estudo contextual entre o Rio Grande do Sul (Brasil) e Buenos Aires (Argentina). 2014. Disponível em: <https://arquivofee.rs.gov.br/wp-content/uploads/2014/05/201405277eeg-mesa19-cadeiaprodutivaleite.pdf>. Acesso em: 6 out. 2025.

BYLUND, G. *Dairy processing handbook*. Lund, Sweden: Tetra Pak Processing Systems AB, 1995.

CASTRO, A. M. G. *Prospecção de cadeias produtivas e gestão da informação*. Revista Transinformação, Campinas, v. 13, n. 2, p. 55–72, dez. 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/tinf/a/cQVTmN9DYzm7kPfhqvMpGzS/?lang=pt>. Acesso em: 6 out. 2025.

DATTA, N.; DEETH, H. C. *Age gelation of UHT milk: a review*. Food and Bioproducts Processing: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C, v. 79, n. 4, p. 197–210, 2001.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAOSTAT – Livestock Primary. Rome, 2019. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat>. Acesso em: 28 out. 2015.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Pecuária Municipal 2018*. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 27 out. 2025.

FOX, P. F.; MCSWEENEY, P. L. H. *Dairy Chemistry and Biochemistry*. London: Blackie Academic & Professional, 1998.

FRANCO, B. D. G. M.; LANDGRAF, M. *Microbiologia dos alimentos*. São Paulo: Atheneu, 2008. 182 p.

GUIMARÃES, J. T. et al. *Non-thermal processing of milk and dairy products: emerging technologies and perspectives*. Food Research International, v. 134, p. 109–120, 2020.

HANSON, N.; YUN, W. *Should “big food” companies introduce healthier options? The effect of new product announcements on shareholder value*. Marketing Letters, v. 29, n. 1, p. 1–12, 2018.

JELEN, P. *Review of basic technical principles and current research in UHT processing of foods*. Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, v. 6, p. 159–166, 1983.

LEWIS, M. *Improvements in the pasteurisation and sterilisation of milk*. In: SMIT, G. (ed.). *Dairy processing: improving quality*. Boca Raton: CRC Press, 2003.

MEZIANE, Z. *Future innovations in food and drinks to 2012: NPD, trend convergence and emerging growth opportunities*. 2007. Disponível em: <https://www.yumpu.com/en/document/read/21520800/future-innovations-in-foodand-drinks-to-2012-research-store>. Acesso em: 6 out. 2025.

MINTEL. Global Food and Drink Trends 2020. London: Mintel Group Ltd., 2020.

OLIVEIRA, A. L. et al. Avaliação das características físico-químicas, microbiológicas e rotulagem de leite pasteurizado comercializado na microrregião de Ubá – Minas Gerais. Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes, v. 70, n. 6, p. 301–315, 2015.

ORDÓÑEZ, J. A. et al. Tecnologia de alimentos: alimentos de origem animal. Porto Alegre: Artmed, 2005.

ROCHA, D. T. Cadeia produtiva do leite no Brasil: produção primária. Circular Técnica 123. Juiz de Fora, MG: Embrapa Gado de Leite, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1124858/1/CT-123.pdf>. Acesso em: 6 out. 2025.

SIQUEIRA, K. B. Tendências para o setor lácteo em 2025. Juiz de Fora, MG: Embrapa Gado de Leite, 2024.

VIDAL, A. M. C.; SARAN NETTO, A. Obtenção e processamento do leite e derivados. Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, 2018. 220 p.

WALSTRA, P.; WOUTERS, J. T. M.; GEURTS, T. J. *Dairy Science and Technology*. 2. ed. Netherlands: CRC Press, 2006.

ZYLBERSZTAJN, D. Conceitos gerais, evolução e apresentação do sistema agroindustrial. In: ZYLBERSZTAJN, D.; NEVES, M. F. (orgs.). *Economia e gestão dos negócios agroalimentares*. São Paulo: Pioneira, 2000.



CAPÍTULO 3 – TECNOLOGIAS DE PROCESSAMENTO NÃO TÉRMICO

3.1 Introduções aos métodos não térmicos

O processamento não térmico de alimentos tem recebido destaque nos últimos anos e diferentes tecnologias emergentes estão em estudo para avaliar o seu potencial como uma alternativa aos tratamentos térmicos convencionais. Tradicionalmente, a grande maioria dos alimentos é processada utilizando temperaturas entre 60°C e 100°C por um determinado tempo. Porém, os processos térmicos, em função da enorme quantidade de energia transferida para o alimento, podem provocar alterações indesejáveis nas características sensoriais, nutricionais e físicas do alimento (OPAS, 2019)

A utilização de processos não térmicos minimiza as alterações indesejáveis no alimento, uma vez que utilizam temperaturas inferiores àquelas usadas nos tratamentos térmicos. Cada tecnologia tem uma aplicação específica: algumas são mais interessantes para o processamento de líquidos e outras se destinam ao tratamento de alimentos sólidos. Em cada caso, é necessário avaliar o potencial da tecnologia no processamento do produto, visando minimizar alterações na qualidade nutricional, físico-química e sensorial (OPAS, 2019)

Comparados com os processos térmicos, os processos não térmicos oferecem as vantagens de baixa temperatura de processamento, baixa utilização de energia e a retenção de nutrientes e de sabor semelhante ao produto fresco, enquanto elimina esporos de microorganismos e inativa enzimas (VEGA-MERCADO et al., 1997)

Entre as tecnologias não térmicas que têm ganhado cada vez mais visibilidade, podemos citar a Alta Pressão Hidrostática (High Hydrostatic Pressure – HHP), Campo Elétrico Pulsado (Pulsed Electric Field – PEF) e Ultrassom de Alta Intensidade (High Intensity Ultrasound – HIUS), , uma vez que, os produtos processados por estas tecnologias emergentes podem apresentar características mais próximas às percebidas nos produtos frescos (LEPAUS et al., 2023; ROOBAB et al., 2023).

3.2 Processamento por Alta Pressão Hidrostática (HPP)

A tecnologia de alta pressão (HPP, do inglês High Pressure Processing) é uma técnica não térmica baseada na aplicação de pressões elevadas, na faixa de 100-800 MPa a alimentos sólidos ou líquidos por um curto período de tempo, entre 3-15 minutos (SIMON-SARKADI, 2012; MA et al., 2022).

A pressão é transmitida de forma uniforme e quase instantânea ao produto através de um meio transmissor de pressão não compressível, normalmente água, a baixa ou temperatura ambiente, evitando a perda de componentes termolábeis (SIMON-SARKADI, 2012; MA et al., 2022). Essa tecnologia pode ser aplicada no alimento já embalado ou não, e permite a redução do uso de conservantes no produto (NUNES & TAVARES, 2019).

A aplicação deste método possibilita um aumento na vida de prateleira, ao mesmo tempo em que mantém as características sensoriais e o valor nutricional do produto. Em alguns alimentos, ocorre também, uma melhoria das propriedades funcionais. Além disso, esse processo possui potencial para auxiliar em processos de congelação e descongelamento (FELLOWS, 2019).

A aplicação da alta pressão tem como principal objetivo inativar microrganismos patogênicos e deteriorantes presentes no produto. A eficácia na inativação microbiana depende principalmente do nível de pressão aplicado, do tempo de processamento, das características dos microrganismos e da composição da matriz alimentar (SIMON-SARKADI, 2012; MA et al., 2022). Essa tecnologia apresenta maior eficácia na eliminação de fungos, leveduras e bactérias gram-negativas (AYDAR et al., 2020).

As altas pressões causam danos na membrana celular, desnaturação de enzimas e proteínas, e alterações nas organelas. O aumento da pressão promove a cristalização de fosfolipídeos presentes na membrana celular dos microrganismos. Assim, a maior permeabilidade da membrana permite uma maior troca de estrutura iônica, inibindo as funções celulares ou promovendo a lise do microrganismo. Além disso, o processamento de alta pressão modifica as características morfológicas dos microrganismos.

Os tratamentos de alta pressão apresentam várias vantagens em relação aos tratamentos de pasteurização convencionais. A principal vantagem está associada aos impactos mínimos dessa tecnologia emergente nas características sensoriais e nutricionais do produto. Os tratamentos de alta pressão não promovem o rompimento das ligações covalentes de proteínas, vitaminas, antioxidantes e compostos voláteis dos produtos.

Outras vantagens incluem: tempos de processamento curtos, consumo mínimo de energia e ausência de efluentes. Uma vantagem significativa das altas pressões em relação a outros métodos de processamento é que o tamanho e a forma das embalagens não são fatores importantes na determinação das condições do processo. Isso soluciona problemas de falta de uniformidade no processamento encontrados, por exemplo, no aquecimento por condução ou convecção, aquecimento por micro-ondas e radiofrequência ou aquecimento por irradiação.

Por não utilizar calor como principal agente de preservação, a HPP é considerada uma tecnologia sustentável, pois reduz o consumo energético e minimiza o impacto ambiental quando comparada aos processos térmicos convencionais (VIDAL; SARAN NETTO, 2018).

Por outro lado, as principais limitações são os custos relativamente elevados de capital e a incapacidade de processar alimentos secos ou que contenham ar ocluso, devido às elevadas pressões envolvidas (FELLOWS, 2019). Além disso, a tecnologia de HPP apresenta uma desvantagem em relação aos tratamentos térmicos convencionais pois o processamento é realizado em lotes ou semicontínuo, enquanto os tratamentos convencionais são realizados em modo contínuo. Assim, os tratamentos térmicos tradicionais processam um volume de produto maior em menos tempo.

Na indústria de leites, a HPP tem se destacado como uma das principais inovações não térmicas. Além de contribuir para o aumento da vida útil e segurança microbiológica, o método também tem sido explorado para melhorar a funcionalidade proteica, facilitar a formação de géis e espumas e otimizar a digestibilidade das proteínas do soro e da caseína (GUIMARÃES et al., 2020). Desta forma, a aplicação da alta pressão no setor lácteo representa uma alternativa promissora para a produção de leites líquidos e produtos derivados de maior qualidade, segurança e valor agregado, alinhados às demandas atuais do mercado consumidor.

3.3 Campos Elétricos Pulsados (PEF)

O estudo da utilização de campos elétricos pulsados (Pulsed Electric Fields - PEF), em alimentos teve início a partir dos anos 60 (BENDICHO et al., 2002). Esse tipo de tratamento não térmico consiste em submeter o produto repetidas vezes a campos elétricos de alta intensidade em um curto intervalo de tempo (PETTIT; RITZ; FEDERIGHI et al., 2002).

Esta tecnologia pode ser aplicada em alimentos líquidos e homogêneos, com a finalidade de inativar enzimas e destruir microrganismos, podendo ser utilizada sozinha ou em combinação com outros métodos. (GÓMEZ et al., 2019; LEBOVKA; PRAPORSCIC; VOROBIEV et al., 2004; ZHANG et al., 2018).

A câmara utilizada para o tratamento do alimento consiste em dois eletrodos entre os quais o produto passa e os pulsos de alta intensidade e de curta duração (μ s) são aplicados com energia entre 20 a 80 KV/cm (DUNN, 1996). Esses pulsos elétricos são capazes de danificar as membranas das células dos microrganismos definitivamente ou temporariamente, de acordo com a condição e intensidade do tratamento (RIBEIRO et al., 2021), num fenômeno conhecido como eletroporação.

Uma aplicação dos pulsos de alta tensão promove, inicialmente, a indução de um potencial transmembrana. Esse potencial, em valores críticos, resulta na formação de poros na membrana celular de microrganismos (NOVICKIJ et al., 2020). Dependendo da intensidade do campo elétrico e da duração dos pulsos, a eletroporação pode ser reversível ou irreversível (GABRIĆ et al., 2017; GOLBERG et al., 2016). A eletroporação é considerada reversível se o aumento na permeabilidade da membrana é de natureza transitória. Nesse caso, a célula sobrevive, e a membrana recupera sua permeabilidade. A destruição de microorganismos é causada por mudanças estruturais irreversíveis, como a formação de poros e, consequentemente a destruição da barreira semipermeável da membrana celular (CASTRO et al., 1993; DUNN, 1996; MARQUEZ et al., 1997).

Portanto, o tempo de permanência do produto dentro da câmara, o número de repetições ou freqüência dos pulsos, e a duração e intensidade determinam o nível do tratamento (DUNN, 1996).

Há diversas vantagens associadas ao uso de PEF em comparação com as abordagens convencionais de processamento. Estas incluem a redução do tempo de processamento e dos custos de energia, a minimização da degradação de compostos sensíveis ao calor, e aprimoramentos no processo de extração de compostos (RIBEIRO et al., 2021). Esta tecnologia parece ter futuro promissor, visto que origina produtos estáveis e de qualidade melhorada, por assegurar maior retenção de sabor, aroma, cor, valor nutricional, melhor funcionalidade das proteínas, eliminação dos danos às emulsões, aumento da vida de prateleira, melhor controle das fermentações (DUNN, 1996) e eliminação dos resistentes esporos bacterianos (MARQUEZ et al., 1997).

Porém, ainda apresenta alguns entraves, como a necessidade inicial de alto investimento de capital (GÓMEZ et al., 2019; SITZMANN; VOROBIEV; LEBOVKA, 2016). O custo inicial de investimento dessa tecnologia varia de €75.000 a €40.000, dependendo das necessidades energéticas e da escala de produção (PUÉRTOLAS & BARBA, 2016). No entanto, o investimento inicial é compensado por seu menor gasto energético, relacionado ao tempo de processamento mais curto e maior eficiência energética (MORALES-DE LA PEÑA et al., 2023).

A aplicação potencial na indústria alimentícia se destaca para alimentos líquidos, principalmente leite, iogurtes, sucos de frutas, ovos líquidos e sopas (QIN et al., 1995; ZHANG et al., 1995; VEGA-MERCADO, 1997).

Na indústria de leites o campo elétrico pulsado é considerado uma das mais promissoras técnicas não térmicas, pois permite a inativação microbiana e a preservação das propriedades nutricionais e sensoriais do produto sem o uso de calor intenso. Desta forma, essa tecnologia apresenta grande potencial para substituir ou complementar a pasteurização tradicional, resultando em produtos com maior frescor, vida útil prolongada e sabor mais natural. Além disso, o PEF tem demonstrado eficiência na redução de bactérias psicrotróficas e patogênicas e na melhoria da estabilidade físico-química do leite, sem causar desnaturação proteica relevante (CASTRO; DÍAZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2019). Por operar em temperaturas moderadas, o processo contribui ainda para a eficiência energética e sustentabilidade ambiental da indústria láctea, alinhando-se às tendências globais de inovação e produção limpa.

3.4 Ultrassom de Alta Intensidade (US)

A utilização do ultrassom (US) como método de tecnologia no processamento de alimentos é uma abordagem inovadora dentro dos sistemas de tecnologias emergentes. Trata-se de uma tecnologia emergente não térmica que consiste na propagação de ondas sonoras de frequências acima da audição humana (20-40 kHz) através de um meio líquido, sólido ou gasoso, gerando campos de cisalhamento, agitação, turbulência, vibração, pressão e fluxo acústico (RODRÍGUEZ, 2022; GALVAN et al., 2018).

Os processos de ultrassom aplicados em alimentos e bebidas são caracterizados de acordo com a frequência do ultrassom empregado, sendo de baixa frequência (16 - 100 kHz) e alta frequência (100 kHz - 1 MHz) (SORIA & VILLAMIEL, 2010). As ondas de alta intensidade são capazes de romper as células e desnaturar enzimas, enquanto ondas de baixa intensidade são capazes de modificar o metabolismo das células (CHEMAT et al., 2017).

O ultrassom de baixa intensidade é geralmente utilizado para avaliação de qualidade não destrutiva, e o ultrassom de alta intensidade para modificação da estrutura dos alimentos, como em aplicações de extração, homogeneização, modificação de viscosidade, pasteurização, descascação, congelamento, esterilização, inativação de enzimas, emulsificação, filtração e amaciamento (NAIK et al., 2022; RAO et al., 2021; SENGAR et al., 2020).

A aplicação de ultrassom de alta intensidade induz efeitos físicos e químicos desejáveis que geralmente melhoram a eficiência de vários processos na indústria de alimentos, visando aumentar a transferência de massa (NOWACKA, 2016). O efeito físico consiste na cavitação acústica, um fenômeno em que a energia sonora (ultrassom) se propaga em um meio líquido por meio de compressões e refrações. Dessa forma, microbolhas de cavitação se formam em níveis elevados de energia durante a refração, concentrando-se à medida que o processo avança, gerando um acúmulo de gases ou vapores no meio (SILVA et al., 2015). Essas microbolhas eclodem em um valor crítico de frequência, promovendo tensão de cisalhamento no sistema. A tensão de cisalhamento nos sistemas promove aumentos na energia térmica, agitação dinâmica e turbulência no meio (LI et al., 2021). A cavitação promove a ruptura da membrana celular de microrganismos, o que leva à exposição de seu material genético e facilita sua inativação efetiva.

A aplicação do ultrassom é um método ecologicamente correto, com tempo de reação reduzido e o rendimento da reação maior em condições brandas em comparação aos métodos convencionais. Assim, seu uso oferece diversas vantagens, tais como, maior produtividade, rendimento e seletividade, com menor tempo de processamento, melhor qualidade, riscos químicos e físicos reduzidos (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011).

Apesar dos inúmeros benefícios tecnológicos associados ao ultrassom de alta intensidade (US) seu uso em alimentos ainda apresenta limitações e desafios relevantes. Um dos principais entraves está relacionado ao aquecimento localizado causado pela cavitação acústica, que pode provocar alterações indesejáveis nas propriedades sensoriais, como mudanças de sabor, cor e textura (CAMPOS et al., 2020). Além disso, a intensidade e a frequência das ondas ultrassônicas precisam ser rigorosamente controladas, pois níveis excessivos podem levar à desnaturação de proteínas, oxidação de lipídios e perda de compostos bioativos sensíveis ao calor. Outro aspecto limitante é o alto custo de implementação e manutenção dos equipamentos industriais, aliado à dificuldade de aplicação em larga escala, especialmente em produtos com alta viscosidade ou composição heterogênea, como o leite e seus derivados (GUIMARÃES et al., 2020). Ademais, a padronização dos parâmetros operacionais e a avaliação da estabilidade dos produtos processados por US ainda requerem estudos mais aprofundados para garantir segurança, reproduzibilidade e aceitação regulatória.

O Ultrassom de Alta Intensidade (US) tem se consolidado como uma tecnologia emergente promissora na indústria de leites e derivados, com aplicações voltadas à melhoria da qualidade, eficiência de processamento e segurança microbiológica. A técnica tem sido utilizada para melhorar a homogeneização do leite, aumentar a eficiência da pasteurização, reduzir o tamanho dos glóbulos de gordura e incrementar

a solubilidade das proteínas, resultando em produtos com melhor textura, estabilidade e valor nutricional. Além disso, sua aplicação tem mostrado potencial na valorização de subprodutos, como o soro de leite, e na intensificação de processos fermentativos na produção de iogurtes e queijos (CAMPOS et al., 2020).

Por operar em temperaturas moderadas e exigir menor consumo energético, o ultrassom é considerado uma alternativa sustentável e eficiente aos métodos térmicos convencionais, alinhando-se às demandas atuais de inovação e qualidade na indústria de leites líquidos.

3.5 Avaliação da eficiência e impactos na qualidade nutricional

A aplicação de tecnologias emergentes pode apresentar diversas vantagens, como a manutenção de maiores concentrações de compostos bioativos, o aumento das propriedades funcionais (geração de compostos antioxidantes, antidiabéticos e anti-hipertensivos) e o aumento e diversificação do número e concentração de compostos voláteis, tornando os alimentos mais atrativos. (GALANAKIS, 2021).

A avaliação da eficiência e dos impactos na qualidade nutricional das tecnologias de processamento de alimentos é um aspecto essencial para garantir a segurança, estabilidade e valor funcional dos produtos. Essa avaliação busca compreender em que medida os processos aplicados são capazes de inativar microrganismos patogênicos e enzimas deteriorantes, mantendo ao mesmo tempo a integridade dos nutrientes e compostos bioativos.

Tecnologias emergentes, como alta pressão hidrostática (HPP), campos elétricos pulsados (PEF) e ultrassom de alta intensidade (US), têm se destacado por oferecer eficiência microbiológica e menor degradação de vitaminas, proteínas e antioxidantes sensíveis ao calor, quando comparadas aos métodos convencionais (GUIMARÃES et al., 2020). No entanto, a eficácia e os efeitos nutricionais dessas tecnologias dependem de variáveis como intensidade do tratamento, tempo de exposição e composição da matriz alimentar, exigindo padronização e validação científica contínuas. Assim, a combinação entre inovação tecnológica e controle de qualidade é fundamental para o desenvolvimento de alimentos mais seguros, nutritivos e sustentáveis, capazes de atender às demandas de um mercado em constante evolução (CAMPOS et al., 2020; VIDAL; SARAN NETTO, 2018).

O principal benefício da tecnologia da alta pressão hidrostática (APH) é seu menor efeito deletério na composição, sabor e características nutricionais. O APH deixa intactas as ligações covalentes das moléculas pequenas, como a maioria das vitaminas, dos compostos antioxidantes e dos compostos voláteis, que conferem valor nutricional aos alimentos e sabor (POTHAKAMURY et al., 1995; SMELT, 1998). As ligações não-covalentes, responsáveis pela estrutura terciária das proteínas também

não são afetadas, produzindo características de qualidade muito importantes nos alimentos, melhorando as propriedades reológicas e funcionais dos alimentos em comparação com os métodos convencionais que utilizam calor. As mudanças sensoriais produzidas nos alimentos processados por altas pressões estão basicamente associados às modificações da textura, que por sua vez, são ocasionadas pelas modificações reológicas, afetando-se beneficamente as propriedades funcionais dos alimentos.

Por isso, a tecnologia é vantajosa e tem sido escolhida como método de conservação de alimentos, pois causa mínima degradação no flavor e nos nutrientes, se comparada ao tradicional método térmico da pasteurização; onde tanto ligações covalentes como não covalentes são afetadas, além de a aplicação dessa tecnologia em produtos de frutas e vegetais oferecer uma chance de produção de alimentos com alta qualidade, segura e com maior satisfação e incremento na qualidade de vida e saúde do ser humano (POLYDERA; NIKOLAUS; PETROS, 2004). Outro fator importante é a habilidade para conservar o alimento sem necessidade de utilização de aditivos químicos (DELIZA et al., 2005). O APH pode ainda ser utilizado à temperatura ambiente, para a extração de importantes metabólitos como os pigmentos (POTHAKAMURY et al., 1995).

O tratamento p Campos Elétricos Pulsados (PEF – Pulsed Electric Fields) tem se destacado como uma tecnologia não térmica eficiente na conservação de alimentos sem causar danos significativos à qualidade nutricional dos produtos. A aplicação PEF possibilita a inativação de microrganismos e enzimas, ao mesmo tempo em que se mantém ao máximo o sabor, a cor, a textura, as vitaminas, nutrientes e componentes funcionais termolábeis dos alimentos (ELEZ-MARTÍNEZ; MARTÍN-BELLOSO, 2007).

Muitos estudos têm relatado a vantagem da aplicação de CEP para a conservação de micronutrientes dos alimentos, pois se espera que as vitaminas termolábeis sejam conservadas, já que o pulso elétrico não constitui tratamento térmico (BINOTI et al., 2012). Dessa forma, há maior preservação de vitaminas termossensíveis, como as do complexo B e a vitamina C, bem como de proteínas, pigmentos naturais e compostos antioxidantes, que são frequentemente degradados por calor excessivo (CASTRO; DÍAZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2019). Outra vantagem desta tecnologia é provocar mínima ou nenhuma alteração nas características físicoquímicas dos alimentos.

Estudos indicam que o PEF também pode favorecer a extração de nutrientes e compostos bioativos em vegetais e sucos, devido ao aumento da permeabilidade celular, melhorando a biodisponibilidade de micronutrientes (GUIMARÃES et al., 2020). No entanto, os efeitos nutricionais dependem da intensidade do campo elétrico, tempo de exposição e composição do alimento, exigindo o controle rigoroso dos parâmetros operacionais para assegurar a estabilidade e o valor nutricional do

produto final. Assim, o PEF representa uma alternativa promissora para a preservação da qualidade nutricional em alimentos minimamente processados, alinhando segurança microbiológica e inovação tecnológica.

O Ultrassom de Alta Intensidade (US) tem se mostrado uma tecnologia promissora para o processamento e conservação de alimentos, especialmente por sua capacidade de reduzir a carga microbiana e intensificar processos físico-químicos sem comprometer, de forma significativa, o valor nutricional dos produtos. O mecanismo de ação do US baseia-se na cavitação acústica, fenômeno em que a formação e o colapso de microbolhas no meio líquido geram altas pressões e temperaturas localizadas, capazes de promover modificações estruturais em biomoléculas sem a necessidade de aquecimento global do sistema (CAMPOS et al., 2020). Essa característica permite maior preservação de nutrientes termossensíveis, como vitaminas hidrossolúveis e compostos antioxidantes, além de melhorar a biodisponibilidade de proteínas e minerais por meio da modificação da estrutura celular e da solubilização de componentes. Entretanto, quando aplicados em intensidades excessivas ou por períodos prolongados, os tratamentos ultrassônicos podem induzir oxidação lipídica e desnaturação proteica, reduzindo o valor nutricional e a estabilidade do alimento. Dessa forma, o controle adequado dos parâmetros operacionais, como frequência, amplitude e tempo de exposição, é essencial para equilibrar eficiência tecnológica e preservação nutricional, tornando o ultrassom uma ferramenta estratégica para o desenvolvimento de alimentos minimamente processados e de alta qualidade.

Na indústria de leites, os métodos como alta pressão hidrostática (HPP), campos elétricos pulsados (PEF) e ultrassom de alta intensidade (US) têm se mostrado eficientes na inativação de microrganismos patogênicos e enzimas deteriorantes, alcançando resultados comparáveis aos processos térmicos tradicionais, mas com menores perdas de vitaminas termossensíveis, como as do complexo B e a vitamina C, além de melhor preservação de proteínas e compostos bioativos (GUIMARÃES et al., 2020). Estudos recentes demonstram que o uso combinado de tecnologias não térmicas pode potencializar a qualidade nutricional e sensorial do leite, mantendo seu valor biológico e prolongando a vida útil de forma sustentável (CAMPOS et al., 2020; VIDAL; SARAN NETTO, 2018).

Referências

- AYDAR, E. F.; TUTUNCU, S.; OZCELIK, B. Plant-based milk substitutes: bioactive compounds, conventional and novel processes, bioavailability studies, and health effects. *Journal of Functional Foods*, v. 70, art. 103975, 2020.

BENDICHO, S.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; MARTÍN-BELLOSO, O. Milk processing by high intensity pulsed electric fields. *Food Science & Technology*, v. 13, n. 6, p. 195–204, 2002.

BINOTI, L. M. et al. Pulsed electric field. *Ciência Rural, Santa Maria*, v. 42, n. 5, p. 934–941, 2012.

BRIVIBA, K.; GRÄF, V.; WALZ, E.; GUAMIS, B.; BUTZ, P. Ultra-high pressure homogenization of almond milk: physico-chemical and physiological effects. *Food Chemistry*, v. 192, p. 82–89, 2016.

CAMPOS, R. C. et al. Ultrasound processing of milk and dairy products: effects on quality, safety and bioactive compounds. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 61, p. 104849, 2020.

CASTRO, A. J.; BARBOSA-CÁNOVAS, V.; SWANSON, B. G. Microbial inactivation of foods by pulsed electric fields. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 17, p. 47–73, 1993.

CASTRO, I.; DÍAZ, D.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Advances in the application of pulsed electric fields for milk and dairy products processing. *Trends in Food Science & Technology*, v. 88, p. 413–425, 2019.

CHEMAT, F.; ZILL-E-HUMA; KHAN, M. K. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 18, n. 4, p. 813–835, 2011.

CHEMAT, F. et al. Ultrasound-assisted extraction of food and natural products: mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications – a review. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 34, p. 540–560, 2017.

CHOUDHARY, R.; GAUTAM, D.; PEREZ-ALVARADO, G.; KINSEL, M. Effect of high intensity ultrasound treatment in reducing the allergenicity of isolated cow's milk and soy proteins. In: IFCON 2013, Mysore, India, 18–21 dez. 2013. Proceedings..., 2013.

DELIZA, R.; ROSENTHAL, A.; ABADIO, F. B. D.; SILVA, C. H. O.; CASTILLO, C. Application of high pressure technology in the fruit juice processing: benefits perceived by consumers. *Journal of Food Engineering*, v. 67, n. 3, p. 241–248, 2005.

DHAKAL, S. et al. Effect of high-pressure processing on the immunoreactivity of almond milk. *Food Research International*, v. 62, p. 215–222, 2014.

DUNN, J. Pulsed light and pulsed electric field for foods and eggs. *Poultry Science*, v. 75, p. 1133–1136, 1996.

ELEZ-MARTÍNEZ, P.; MARTÍN-BELLOSO, O. Effects of high-intensity pulsed electric field processing conditions on vitamin C and antioxidant capacity of orange juice. *European Food Research and Technology*, v. 226, n. 2, p. 263–271, 2007.

FELLOWS, P. J. *Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática*. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2019. 960 p.

GALANAKIS, C. M. *Functionality of food components and emerging technologies*. *Foods*, v. 10, n. 1, p. 128, 2021.

GALVÁN-D'ALESSANDRO, L.; CARCIOCHI, R. *Fermentation assisted by pulsed electric field and ultrasound: a review*. *Fermentation*, v. 4, n. 1, 2018.

GABRIĆ, D. et al. *Pulsed electric fields as an alternative to thermal processing for preservation of nutritive and physicochemical properties of beverages: a review*. *Journal of Food Process Engineering*, v. 41, n. 1, 2017.

GÓMEZ, B. et al. *Application of pulsed electric fields in meat and fish processing industries: an overview*. *Food Research International*, v. 123, p. 95–105, 2019.

GOLBERG, A. et al. *Energy-efficient biomass processing with pulsed electric fields for bioeconomy and sustainable development*. *Biotechnology for Biofuels*, v. 9, n. 1, 2016.

GUIMARÃES, J. T. et al. *Non-thermal processing of milk and dairy products: emerging technologies and perspectives*. *Food Research International*, v. 134, p. 109–120, 2020.

HANSON, N.; YUN, W. *Should “big food” companies introduce healthier options? The effect of new product announcements on shareholder value*. *Marketing Letters*, v. 29, n. 1, p. 1–12, 2018.

JELEN, P. *Review of basic technical principles and current research in UHT processing of foods*. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, v. 6, p. 159–166, 1983.

LEBOVKA, N.; PRAPORSCIC, I.; VOROBIEV, E. *Effect of moderate thermal and pulsed electric field treatments on textural properties of carrots, potatoes and apples*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 5, n. 1, p. 9–16, 2004.

LEPAUS, B. M. et al. *Impact of ultrasound processing on the nutritional components of fruit and vegetable juices*. *Trends in Food Science & Technology*, v. 138, p. 752–765, 2023.

LI, W.; GAMALATH, C. J.; PATHAK, R.; MARTIN, G. J. O.; ASHOKKUMAR, M. *Ultrasound – the physical and chemical effects integral to food processing*. In:

KNOERZER, K.; MUTHUKUMARAPPAN, K. (eds.). *Innovative Food Processing Technologies*. Oxford: Elsevier, 2021. p. 329–358.

LI, W.; GAMLATH, C. J.; PATHAK, R.; MARTIN, G. J. O.; ASHOKKUMAR, M. Ultrasound – the physical and chemical effects integral to food processing. In: KNOERZER, K.; MUTHUKUMARAPPAN, K. (eds.). *Innovative food processing technologies: a comprehensive review*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2021. p. 329–358.

MA, J. et al. Purified saponins in *Momordica charantia* treated with high hydrostatic pressure and ionic liquid-based aqueous biphasic systems. *Foods*, v. 11, art. 1930, 2022.

MAGHSOUDLOU, Y.; ALAMI, M.; MASHKOUR, M.; SHAHRAKI, M. H. Optimization of ultrasound-assisted stabilization and formulation of almond milk. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 40, p. 828–839, 2016.

MANZOOR, M. F. et al. Impact of pulsed electric field on rheological, structural, and physico-chemical properties of almond milk. *Journal of Food Process Engineering*, v. 42, n. 8, 2019.

MARQUEZ, V. O.; MITTAL, G. S.; GRIFFITHS, M. W. Destruction and inhibition of bacterial spores by high-voltage pulsed electric field. *Journal of Food Science*, v. 62, n. 2, p. 399–401, 1997.

MARTÍNEZ-MONTEAGUDO, S. I.; RATHNAKUMAR, K. High-pressure processing: fundamentals, misconceptions, and advances. Elsevier, 2021. p. 19–38.

MORALES-DE LA PEÑA, M.; MIRANDA-MEJÍA, G. A.; MARTÍN-BELLOSO, O. Recent trends in fermented beverages processing: the use of emerging technologies. *Beverages*, v. 9, p. 51, 2023.

NAIK, M.; NATARAJAN, V.; MODUPALLI, N.; THANGARAJ, S.; RAWSON, A. J. L. Pulsed ultrasound-assisted extraction of protein from defatted bitter melon seeds (*Momordica charantia* L.) meal: kinetics and quality measurements. *LWT – Food Science and Technology*, v. 155, art. 112997, 2022

NOWACKA, M.; WEDZIK, M. Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. *Applied Acoustics*, v. 103, p. 163–171, 2016.

NOVICKIJ, V. et al. Effects of pulsed electric fields on microbial inactivation and quality of liquid foods: a review. *Food Control*, v. 113, p. 107–130, 2020.

NUNES, L.; TAVARES, G. M. Thermal treatments and emerging technologies: impacts on the structure and techno-functional properties of milk proteins. *Trends in Food Science & Technology*, v. 90, p. 88–89, 2019.

OPAS – ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. *Tecnologias de conservação aplicadas à segurança de alimentos*. Washington, D.C.: OPAS, 2019. 220 p.

PETTIT, B.; RITZ, M.; FEDERIGHI, M. Nouveaux traitements physiques de conservation des aliments: revue bibliographique. *Revue de Médecine Vétérinaire*, v. 53, p. 547–556, 2002.

PICART-PALMADE, L.; CUNAULT, C.; CHEVALIER-LUCIA, D.; BELLEVILLE, M.-P.; MARCHESEAU, S. Potentialities and limits of some non-thermal technologies to improve sustainability of food processing. *Frontiers in Nutrition*, v. 5, jan. 2019.

POLYDERA, A. C.; NIKOLAUS, G. S.; PETROS, S. T. The effect of storage on the antioxidant activity of reconstituted orange juice which had been pasteurized by high pressure or heat. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 39, p. 783–791, 2004.

POTHAKAMURY, U. R. et al. The pressure builds for better food processing. *Chemical Engineering Progress*, v. 91, n. 3, p. 43–53, 1995.

PUÉRTOLAS, E.; KOUBAA, M.; BARBA, F. J. An overview of the impact of electrotechnologies for the recovery of oil and high-value compounds from vegetable oil industry: energy and economic cost implications. *Food Research International*, v. 80, p. 19–26, 2016.

QIN, B. L. et al. Food pasteurisation using high-intensity pulsed electric fields. *Food Technology*, v. 49, n. 12, p. 55–60, 1995.

RAO, M. V.; SENGAR, A. S.; C. K, S.; RAWSON, A. Ultrasonication – a green technology extraction technique for spices: a review. *Trends in Food Science & Technology*, v. 116, p. 975–991, 2021.

RIBEIRO, N.; ROCHA, R. S.; CRUZ, A. G. da. Tecnologias emergentes aplicadas na América Latina. *Alimentos: Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente*, v. 2, n. 7, 2021.

RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, M. Incorporation of microencapsulated iron in dried chili mangoes (*Mangifera indica* L. var. Ataulfo) with ultrasound pre-treatment. Master's Thesis – Tecnológico de Monterrey, Querétaro, Mexico, 2022.

ROOBAB, U. et al. An updated overview of ultrasound-based interventions on bioactive compounds and quality of fruit juices. *Journal of Agriculture and Food Research*, v. 14, 2023.

SENGAR, A. S.; RAWSON, A.; MUTHIAH, M.; KALAKANDAN, S. K. Comparison of different ultrasound-assisted extraction techniques for pectin from tomato processing waste. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 61, 2020.

SILVA, E. K.; ROSA, M. T. M. G.; MEIRELES, M. A. A. Ultrasound-assisted formation of emulsions stabilized by biopolymers. *Current Opinion in Food Science*, v. 5, p. 50–59, 2015.

SIMON-SARKADI, L.; PÁSZTOR-HUSZÁR, K.; DALMADI, I.; KISKÓ, G. **Effect** of high hydrostatic pressure processing on biogenic amine content of sausage during storage. *Food Research International*, v. 47, p. 380–384, 2012.

SITZMANN, W.; VOROBIEV, E.; LEBOVKA, N. Applications of electricity and specifically pulsed electric fields in food processing: historical backgrounds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 37, p. 302–311, 2016.

SMELT, J. P. P. Recent advances in microbiology of high-pressure processing. *Trends in Food Science & Technology*, v. 9, n. 4, p. 152–158, 1998.

SORIA, A. C.; VILLAMIEL, M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends in Food Science & Technology*, v. 21, p. 323–331, 2010.

TÉLLEZ-MORALES, J. A.; HERNÁNDEZ-SANTO, B.; RODRÍGUEZ-MIRANDA, J. Effect of ultrasound on the techno-functional properties of food components/ingredients: a review. *Ultrasound Sonochemistry*, v. 61, art. 104787, 2020.

VEGA-MERCADO, H. et al. Non-thermal food preservation: pulsed electric fields. *Trends in Food Science & Technology*, v. 8, p. 151–156, 1997.

VIDAL, A. M. C.; SARAN NETTO, A. Obtenção e processamento do leite e derivados. Pi-
rassununga: Faculdade de Zootecnia e Eng. de Alimentos da Universidade de São Paulo,
2018. 220 p.

ZHANG, Q.; QIN, B. L.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; SWANSON, B. G. Inactivation of *E. coli* for food pasteurisation by high-strength pulsed electric fields. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 19, p. 103–118, 1995.

ZHANG, Z. H. et al. Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, v. 54, n. 1, p. 1–13, 2018.



CAPÍTULO 4 – TECNOLOGIAS DE PRESERVAÇÃO E EXTENSÃO DE VIDA DE PRATELEIRA

As tecnologias de preservação e extensão da vida de prateleira de leites desempenham papel essencial na garantia da segurança, qualidade e estabilidade desse alimento altamente perecível. Devido à sua composição rica em nutrientes, o leite é um excelente meio para o crescimento microbiano e para a ocorrência de reações químicas indesejáveis, o que exige o uso de métodos tecnológicos que retardem esses processos.

Entre as principais estratégias empregadas destacam-se os tratamentos térmicos, como a pasteurização e o processo UHT, a refrigeração, o uso de embalagens assépticas e, mais recentemente, a aplicação de tecnologias emergentes.

As tecnologias modernas de preservação de alimentos têm evoluído significativamente, oferecendo alternativas às técnicas térmicas tradicionais. Entre elas, destaca-se a nanotecnologia, aplicada na conservação por meio de nanoencapsulação de compostos bioativos e embalagens ativas que prolongam a vida útil; a microfiltração e ultrafiltração, que utilizam membranas para remover microrganismos e partículas indesejadas sem comprometer as propriedades sensoriais; e o uso de aditivos naturais e bioconservantes, como extratos vegetais e compostos bioativos, que mantêm a qualidade e segurança dos alimentos de forma sustentável.

Essas abordagens, além de aumentarem a eficiência da preservação, permitem a manutenção das características nutricionais e sensoriais dos produtos, representando uma evolução em relação aos métodos térmicos tradicionais, como pasteurização e esterilização.

4.1 Nanotecnologia aplicada à conservação

O termo nanotecnologia é derivado do prefixo grego “nannos”, que significa anão, e de “techne” e “logos”, correspondendo a ofício e conhecimento, respectivamente (FERNANDES & OLIVEIRA, 2019). É a utilização de partículas nanométricas – bilionésima parte do metro – na escala de 1 a 100 nm (BARROS, 2011), que apresentam comportamento diferenciado quando comparadas à macropartículas da mesma substância, principalmente pela maior superfície de contato nas nanoestruturas (AGUIAR et al., 2021; MARTINS et al., 2016).

Há diferentes tipos de produção de nanopartículas, como nanoemulsões, nanocápsulas e nanocompósitos (MARTINS et al., 2016). As nanoemulsões são formadas a partir de uma fração aquosa e uma lipídica e diferentes tipos de homogeneização (ASSIS et al., 2011). Já as nanocápsulas são produzidas para que a substância de interesse fique aprisionada em um núcleo protegido por uma parede estável (OZKAN et al., 2019). Os nanocompósitos são formados por materiais bifásicos, sendo que apenas uma das fases possui escala nanométrica (MASSON & BELINO, 2021). As nanopartículas lipídicas sólidas, por sua vez, são coloides responsáveis pela proteção externa de componentes com propriedades funcionais (GONÇALVES, 2018).

A aplicação da nanotecnologia em alimentos é nova em comparação com a área biomédica e as indústrias de tecnologia de informação, nas quais a nanotecnologia já é utilizada na fabricação de materiais. No entanto, já existem inúmeras oportunidades que podem ser exploradas, como a elaboração de produtos com características funcionais e nutracêuticas, o desenvolvimento de processos e as embalagens inteligentes (ASSIS, 2012).

Uma das áreas que tem sido mais avaliada em nanotecnologia quando se trata de alimentos é, sem dúvida, a do desenvolvimento de nanopartículas para a liberação controlada de agentes ativos. Tecnologias de encapsulamento têm sido desenvolvidas para a formação de uma matriz orgânica, com capacidade de reter o composto ativo, seja por imobilização superficial, seja por retenção interna por períodos determinados de tempos (JELINSKI, 1999).

A eficiência desses sistemas está baseada em diversos fatores, como a inexistência de interações fortes entre as nanopartículas e a matriz (alimento), sua alta afinidade com os agentes a serem retidos, assim como a facilidade de sua posterior liberação. Essa tecnologia está diretamente relacionada à etapa de processamento, embora os demais segmentos possam também fazer uso da inserção de nanopartículas. Em suma, benefícios poderão ser trazidos pelo desenvolvimento de nanopartículas ativas como: a produção de novos materiais funcionais com presença de enzimas ou biopolímeros com ações catalíticas que acelerem ou alterem reações; o processamento em escalas reduzidas e com alto controle da composição, reprodutibilidade e qualidade, e novas combinações ou inserções, gerando novos produtos com sabores diferenciados, valores nutricionais distintos, enriquecidos, funcionais ou nutracêuticos. A descrição de detalhes técnicos que elucidem todos esses processos estaria além do escopo deste texto, embora informações específicas possam ser localizadas com facilidade na internet.

Outra aplicação da nanotecnologia inclui os ingredientes ou aditivos nanoestruturados/nanoencapsulados que, dependendo de sua função podem ser adicionados diretamente ao alimento ou a sua embalagem com o intuito de

prevenir oxidação, crescimento bacteriano, mascarar o sabor ou a textura do alimento, intensificar o flavor, promover a liberação sustentada ou direcionamento de bioativos (vitaminas minerais, enzimas, etc) e melhorar a estabilidade ou inibir o crescimento de microorganismos (FAO & WHO, 2009).

O leite, em especial, frequentemente é citado como um alimento nano, visto que, quase a totalidade de seus componentes apresentam alguma arquitetura ou estrutura em nanoescala. Como exemplo, encontramos as caseínas que possuem diâmetro variando entre 50 e 500 nm e o glóbulo de gordura que em algumas espécies chegam a atingir dimensões inferiores a 1000 nm (GROVES & TITORIA, 2009; SOZER & KOKINI, 2009). Por sua vez, esses componentes podem ser desorganizados e reorganizados em estruturas com tamanhos e funções bem definidas.

Tal condição faz do leite uma excelente fonte de matéria-prima para confecção de nanoestruturas, tanto para uso na indústria de alimentos quanto para a farmacêutica e de cosméticos, cujos novos produtos nanoestruturados não devem sofrer rejeição por consumidores, uma vez que, o leite é rotineiramente utilizado como fonte de alimento em todo o mundo (BRANDAO, 2025).

Por outro lado, a nanotecnologia tem sido aplicada na indústria de leites e derivados com o objetivo de melhorar as características sensoriais, o valor nutricional e também aperfeiçoar os processos convencionais de conservação.

Os produtos lácteos funcionais, ao abraçarem a nano encapsulação, transcendem as expectativas tradicionais, tornando-se portadores de probióticos resilientes. Pesquisas aprofundadas (Costa et al., 2018) indicam que essa inovação não apenas preserva a viabilidade dos microrganismos benéficos durante o processo digestivo, mas também redefine o cenário da saúde intestinal. Os lácteos não são apenas fontes de nutrição; tornam-se aliados da saúde digestiva.

Erfanian et al. (2017), avaliaram a influência da redução nanométrica do cálcio, em leite pó, em relação a absorção e disponibilidade. Entre os resultados foi verificada a maior disponibilidade do cálcio com maior presença detectada nos tecidos ósseos do grupo alimentado com o produto nanotecnológico. Quando compararam a biodisponibilidade do cálcio nanométrico em dois tipos diferentes de leites enriquecidos, constataram maior absorção do mineral em escala nano. Maurya e Aggarwal (2019), elaboraram uma bebida à base de leite com nanoestruturas encapsuladas de vitamina D3. Os autores observaram melhor aceitação sensorial do produto com vitamina encapsulada do que a amostra controle não encapsulada e não nanométrica.

O enriquecimento de produtos lácteos pelos sistemas de micro/nanoencapsulação pode fornecer propriedades funcionais a estes alimentos porque os óleos vegetais são fontes de ácidos graxos essenciais, como ácido docosahexaenoíco, eicosapentaenoíco e α -linolênico (DELSHADI et al., 2020). Iogurte, leite pasteurizado e queijo, podem ser enriquecidos por esta técnica. Também podem ser utilizados como antimicrobianos naturais em produtos alimentícios (BEDOYA-SERNA et al., 2018), conferindo propriedades funcionais a estes tipos de alimentos.

Outras aplicações na nanotecnologia estão sendo avaliadas para lácteos como a nanoemulsão de gordura em queijo cheddar (SHARMA KHANAL et al., 2019), queijo pasteurizado com aplicação de óleo de chia (*Salvia hispanica*) (CARDOSO et al., 2020), leite pasteurizado com aplicação do óleo de canela (*Cinnamomum sp*) (BASHIRI et al., 2020).

Além disso, a nanotecnologia tem sido amplamente estudada na indústria de laticínios para o desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes, capazes de prolongar a vida útil e monitorar a qualidade dos produtos durante o armazenamento e distribuição. Também vem sendo aplicada em processos de tratamento de efluentes, visando à remoção eficiente de contaminantes orgânicos e inorgânicos, e no controle microbiológico, por meio da utilização de nanopartículas metálicas, como as de prata, zinco e dióxido de titânio, reconhecidas por suas propriedades antimicrobianas. Essas abordagens emergentes têm demonstrado potencial significativo para melhorar a segurança microbiológica, reduzir perdas e agregar valor tecnológico aos produtos lácteos, tornando-se uma estratégia promissora para a modernização sustentável do setor. (AYELÉN VÉLEZ et al., 2017)

4.2 Microfiltração e ultrafiltração

Os processos de separação por membranas (PSM) vêm sendo muito estudados no último século, tendo inúmeras aplicações nas mais diversas áreas, como química, biotecnológica, farmacêutica, alimentícia, tratamento de efluentes, medicina, entre outras. A principal vantagem frente a outros processos de separação é a especificidade dos componentes extraídos e o baixo consumo de energia (PETRUS E TESSARO, 2015).

Esta tecnologia consiste em uma técnica físico-química baseada na passagem seletiva de componentes de uma mistura através de uma barreira semipermeável, denominada membrana, impulsionada por um gradiente de pressão, concentração ou potencial elétrico. Essa tecnologia permite a separação, concentração, purificação ou fracionamento de solutos e solventes, sem a necessidade de mudanças de fase, preservando as características físico-químicas e sensoriais dos produtos.

Para que ocorra o transporte de uma espécie através de uma membrana é necessária a existência de uma força motriz agindo sobre a mesma, a qual costuma ser o gradiente de potencial químico ou potencial elétrico (HABERT, BORGES E NOBREGA, 2006). Como o potencial químico é uma grandeza difícil de mensurar em um processo, pode-se equivaler, sem perda de precisão, ao gradiente de concentração ou pressão, quando a temperatura é mantida constante.

Os PSM são divididos de acordo com a aplicação industrial. Os quatro processos mais utilizados na indústria de laticínios são a microfiltração (MF), a ultrafiltração (UF), a nanofiltração (NF) e a osmose inversa (OI). Esses processos fazem o uso da pressão como força motriz de acordo com o diâmetro de poro e permeabilidade da membrana (HABERT et al., 2006; PINTO; BERNARDO, 2016).

Segundo Snape e Nakajima (1996) são utilizadas na microfiltração pressões inferiores a 0,2 Mpa, separando moléculas entre 0,025 e 10 μm . A ultrafiltração envolve pressões superiores a 1 MPa e separação de partículas com peso molecular entre 1 e 300 Kda. Na nanofiltração são utilizadas pressões entre 1 e 4 MPa para separação de partículas com peso molecular entre 350 e 1000 Da. Já na osmose reversa são utilizadas pressões entre 4 e 10 MPa e concentração de partículas com peso molecular menor que 350 Da.

A microfiltração (MF) se diferencia das demais técnicas de separação por membranas principalmente pelo diâmetro de poro e pela pressão operacional empregada. Enquanto a microfiltração atua com poros variando entre 0,1 e 10 μm , sendo eficiente na remoção de microrganismos, células e partículas em suspensão, a ultrafiltração (UF) utiliza poros menores (0,01 a 0,1 μm) e pressões moderadas, permitindo a retenção de macromoléculas como proteínas e polissacarídeos. Já a nanofiltração (NF) apresenta poros ainda mais finos (1 a 10 nm) e é aplicada na separação parcial de sais e moléculas de baixo peso molecular, atuando como um processo intermediário entre a ultrafiltração e a osmose reversa (OR). Esta última, por sua vez, opera com membranas praticamente não porosas, sob altas pressões (acima de 20 bar), sendo capaz de rejeitar íons e solutos dissolvidos, resultando em um permeado de elevada pureza.

Por meio desses processos, é possível, por exemplo, concentrar proteínas do soro, remover microrganismos e esporos, ajustar o teor de sais minerais e recuperar água de reuso com alto grau de pureza. Assim, a separação por membranas representa uma alternativa eficiente, sustentável e de baixo consumo energético em comparação com métodos térmicos convencionais, contribuindo para a melhoria da qualidade, segurança e valor agregado dos produtos lácteos.

4.2.1 Microfiltração

As membranas de microfiltração possuem tamanho de poros entre 50 a 10000 nm, gradiente de pressão de 0,1 a 2 bar (MULDER, 1986; HABERT et al., 2006). A eficácia da capacidade de retenção da microfiltração está intrinsecamente ligada à pressão aplicada durante o processo. Possui capacidade de reter partículas com tamanhos entre 0,1 µm e 10 µm, sendo essa faixa determinada, em grande medida, pela magnitude da pressão empregada. A relação é diretamente proporcional, indicando que um aumento na pressão resulta em uma maior passagem de partículas. Em outras palavras, quanto maior a pressão aplicada, maior a probabilidade de moléculas com tamanhos quase equivalentes aos poros conseguirem atravessar o sistema de filtração (FILHO (2017).

A microfiltração pode ser empregada como uma alternativa não térmica aos tratamentos convencionais, promovendo a redução microbiana e a clarificação de líquidos sem causar alterações sensoriais ou nutricionais significativas. O processo preserva as características originais do produto, como sabor, aroma, cor e valor nutricional, frequentemente degradadas em etapas que envolvem aquecimento. Além disso, a microfiltração contribui para o aumento da vida útil de prateleira, ao reduzir de forma eficiente a carga de microrganismos e partículas indesejáveis, resultando em maior estabilidade físico-química e microbiológica. Por operar sob baixas pressões e temperaturas, a técnica apresenta menor consumo energético e reduzido impacto ambiental, sendo considerada uma solução tecnológica sustentável e de alta eficiência para processos de separação, purificação e conservação de alimentos líquidos, bebidas e outros produtos biotecnológicos.

Quando comparada a outros processos de separação por membrana, a microfiltração é considerada a etapa mais “branda”, sendo ideal para operações de clarificação, desbacterização e remoção de sólidos suspensos, enquanto as demais técnicas são direcionadas a processos de concentração, purificação e dessalinização. Essa hierarquia de seletividade e pressão faz com que os sistemas de membranas possam ser combinados em arranjos integrados, formando processos sequenciais de separação altamente eficientes e sustentáveis.

Desta forma, a microfiltração deve ser utilizada antes da ultrafiltração (FILHO, RENOSTO E BALESTRIN (2021) como uma etapa inicial devido às dimensões discretas dos poros dos filtros, nos quais o solvente e todo o material solúvel permeiam. Portanto, trata-se de um pré-tratamento do processo de ultrafiltração (JESUS, 2019), que proporciona a remoção de partículas maiores e assim evita a obstrução das membranas da ultrafiltração.

Na indústria de laticínios, a microfiltração tem se destacado como uma tecnologia inovadora e eficiente para a remoção de microrganismos, esporos e partículas em suspensão. Além da clarificação e desbacterização do leite, na produção de queijos de alta qualidade, no fracionamento e concentração de proteínas do soro, e na recuperação de compostos bioativos de elevado valor agregado, como lactoferrina e imunoglobulinas.

Além de contribuir para a segurança microbiológica dos produtos, essa tecnologia possibilita redução do consumo energético, diminuição de etapas térmicas e maior vida de prateleira, favorecendo a sustentabilidade e a competitividade do setor lácteo. Assim, a microfiltração representa um importante avanço na modernização dos processos industriais, aliando eficiência tecnológica, qualidade e sustentabilidade na produção de derivados lácteos.

4.2.2 Ultrafiltração

A Ultrafiltração (UF) utiliza membranas poliméricas ou cerâmicas de poros assimétricos, com poros variando entre 1 a 100 nm e uma variação de pressão transmembrana entre 1 a 10 bar (MARQUES, 2017). Esta técnica opera em temperatura ambiente, dispensando a necessidade de uma fonte de calor externa para facilitar a operação unitária. Essa particularidade não apenas simplifica o processo, mas também reduz a dependência de recursos adicionais, tornando a ultrafiltração uma opção atrativa e economicamente viável em comparação com métodos que requerem fontes de calor externas.

Esta tecnologia pode ser considerada como uma das mais fascinantes, introduzidas na indústria de laticínios, pois ela torna possível melhorar a qualidade dos produtos lácteos tradicionais, criar novas categorias de produtos, utilizar subprodutos lácteos (como o soro de leite) em muito maior grau para a nutrição humana e preparar ingredientes lácteos para serem usados em toda a cadeia alimentar.

Trata-se de uma forma promissora que possibilita o aperfeiçoamento de produtos lácteos tradicionais e o reaproveitamento de coprodutos gerados na produção dos mesmos, para que sirvam como insumo na fabricação de outros lácteos e suplementos alimentares (LEIDENS, 2013),

A ultrafiltração é a opção de separação mais aconselhável para leites e soros, especialmente no que diz respeito às proteínas (BOSCHI, 2006). O aproximadamente 75% das membranas de ultrafiltração utilizadas na indústria são destinadas ao fracionamento das proteínas do soro de queijo (WEN-QIONG et al. (2019). Desta forma, com a ultrafiltração, é possível recuperar tanto a proteína como a gordura do soro porque ambas as moléculas ficam retidas na membrana em decorrência de seu tamanho, enquanto cinzas e a lactose atravessam a membrana, alcançando o

permeado. Posteriormente, o concentrado resultante passa por um procedimento de secagem em secadores de pulverização, transformando-o em uma forma em pó. Vale ressaltar que a eficácia desse processo está intrinsecamente ligada à composição específica do soro (YEE; WILEY; BAO, 2006).

A membrana usada no processo de concentração de proteína do soro do queijo é constituída por vários polímeros com capacidade de retenção de moléculas com pesos moleculares maiores que 20.000 a 30.000 Dalton. Nesse processo é possível chegar a uma concentração proteica de 25 a 35% (ANTUNES, 2003).

A ultrafiltração contribui para o desenvolvimento de produtos de alto valor nutricional, como bebidas proteicas, ingredientes funcionais e concentrados lácteos com propriedades tecnológicas específicas. Por operar em condições suaves de temperatura, o processo preserva as características físico-químicas e sensoriais dos constituintes do leite, ao mesmo tempo em que reduz o consumo energético e minimiza impactos ambientais. Assim, a ultrafiltração se consolida como uma ferramenta estratégica na modernização do setor lácteo, promovendo sustentabilidade, eficiência produtiva e diversificação de produtos com maior qualidade e valor agregado.

4.3 Uso de aditivos naturais e bioconservantes

Os aditivos são substâncias intencionalmente adicionadas aos alimentos com a finalidade de impedir alterações, manter, conferir ou intensificar seu aroma, cor e sabor, modificar ou manter seu estado físico desde que não prejudique seu valor nutritivo (BRASIL, 1965).

Os aditivos naturais são substâncias de origem vegetal, animal ou microbiana empregadas na indústria de alimentos com a finalidade de melhorar características sensoriais, tecnológicas e de conservação, sem o uso de compostos sintéticos. Esses aditivos incluem pigmentos naturais (como a betanina, a curcumina e a antocianina), antioxidantes (como os tocoferóis, ácido ascórbico e extratos de alecrim), e agentes antimicrobianos naturais, como óleos essenciais, extratos vegetais e compostos fenólicos.

Na indústria de laticínios, o uso de aditivos naturais tem ganhado destaque como uma alternativa segura e sustentável aos conservantes e estabilizantes sintéticos, com o objetivo de melhorar a qualidade, estabilidade e segurança microbiológica dos produtos.

Esses aditivos podem ser aplicados em leites, iogurtes, queijos e outros derivados. Além de inibir o crescimento de microrganismos deteriorantes e patogênicos, esses compostos atuam na redução da oxidação lipídica e na preservação das

características sensoriais dos produtos, mantendo o sabor, aroma e cor originais. Muitos desses aditivos também apresentam propriedades bioativas e funcionais, agregando valor nutricional e atendendo à demanda crescente por alimentos mais saudáveis

Dentro do grupo dos aditivos naturais, destacam-se os bioconservantes, que compreendem microrganismos benéficos ou substâncias produzidas por eles, empregados para inibir o crescimento de microrganismos deteriorantes e patogênicos nos alimentos.

Os bioconservantes atuam por meio de mecanismos naturais de competição e produção de metabólitos antimicrobianos, como bacteriocinas (por exemplo, nisina e pediocina), ácidos orgânicos, peróxido de hidrogênio e enzimas líticas, capazes de reduzir ou impedir a multiplicação microbiana indesejada.

Na indústria de laticínios, os bioconservantes são amplamente empregados na preservação de queijos, iogurtes e leites fermentados, ajudando a controlar o desenvolvimento de bactérias indesejáveis e fungos durante o armazenamento. O uso de cepas produtoras de bacteriocinas, como *Lactococcus lactis* e *Lactobacillus plantarum*, permite reduzir o uso de aditivos químicos, resultando em produtos mais naturais, seguros e estáveis.

As bactérias ácido-láticas (BAL) têm sido amplamente estudadas e aplicadas como agentes bioconservantes na indústria de laticínios, devido à sua capacidade natural de inibir o crescimento de microrganismos deteriorantes e patogênicos em leites e derivados. Essas bactérias, pertencentes principalmente aos gêneros *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus* e *Streptococcus*, produzem uma variedade de metabólitos antimicrobianos, como ácido lático, ácido acético, peróxido de hidrogênio e bacteriocinas, que reduzem o pH e criam um ambiente hostil ao desenvolvimento de contaminantes indesejáveis. Além de sua ação conservante, as BAL contribuem para a melhoria das propriedades sensoriais e funcionais dos produtos, participando de processos fermentativos e conferindo características típicas de sabor, aroma e textura (CANCELLA, 2024).

As BAL são cepas capazes de produzir bacteriocinas que são peptídeos ou proteínas antimicrobianas produzidos naturalmente por essas bactérias, com a capacidade de inibir o crescimento de microrganismos próximos ou relacionados filogeneticamente. Essas substâncias são sintetizadas durante o metabolismo microbiano e atuam de forma específica contra bactérias sensíveis, interferindo na integridade da membrana citoplasmática, provocando vazamento de íons essenciais e, consequentemente, a morte celular.

As bacteriocinas se destacam por serem substâncias naturais, biodegradáveis e seguras, não afetando as células eucarióticas nem a microbiota desejável dos alimentos. Entre as mais estudadas estão a nisina, produzida por *Lactococcus lactis*, e a pediocina, produzida por *Pediococcus acidilactici*, ambas amplamente utilizadas na indústria de alimentos por sua eficácia contra microrganismos Gram-positivos, incluindo *Listeria monocytogenes* e *Staphylococcus aureus*.

A principal vantagem do uso das bacteriocinas é a prevenção que elas promovem às perdas de nutrientes, causadas pelos tratamentos aplicados aos alimentos. A maioria das bacteriocinas apresenta estabilidade térmica e consegue sobreviver aos diferentes ciclos do processamento dos alimentos, algumas também conseguem se adaptar a pH e temperaturas baixas, sendo úteis no processamento de alimentos ácidos e armazenados a frio.

Em termos nutricionais, essas moléculas apresentarem natureza proteica, durante a passagem pelo trato gastrointestinal, as bacteriocinas são inativadas por proteases e, portanto, se utilizadas em alimentos não causam alteração na ecologia do trato digestivo e não resultam em risco relacionado ao uso de antibióticos comuns (VERMA et al., 2014).

A integração dos conhecimentos sobre bactérias láticas, suas bacteriocinas e o uso de aditivos naturais consolida uma abordagem moderna e sustentável para a bioconservação de alimentos, especialmente na indústria de laticínios. As bactérias láticas, amplamente reconhecidas por sua capacidade de produzir compostos antimicrobianos naturais representam uma alternativa eficaz aos conservantes sintéticos, atuando de forma seletiva e segura contra microrganismos indesejáveis. Quando associadas a aditivos naturais de origem vegetal, como extratos e óleos essenciais, essas culturas e seus metabólitos promovem efeitos sinérgicos que intensificam a estabilidade microbiológica, prolongam a vida útil dos produtos e preservam suas características sensoriais. Essa combinação de biotecnologia e naturalidade reflete a evolução do setor lácteo em direção a processos mais limpos, eficientes e sustentáveis, evidenciando o papel dos bioconservantes como elementos-chave na produção de alimentos seguros, funcionais e alinhados às exigências do consumidor contemporâneo.

4.4 Comparações com técnicas térmicas tradicionais

O desenvolvimento de tecnologias emergentes no processamento de alimentos atende às necessidades específicas do consumidor em relação a alimentos seguros, saudáveis e minimamente processados. Esses processos inovadores também resultam em técnicas de fabricação de alimentos ecologicamente corretas e sustentáveis, com uso reduzido de energia e de água, o que supera algumas limitações dadas pelas práticas atuais de processamento de alimentos (CRISTIANINI, ET.al., 2023).

As abordagens modernas de conservação, como a nanotecnologia, a ultrafiltração, a microfiltração e o uso de aditivos naturais e bioconservantes, representam uma evolução significativa em relação às técnicas tradicionais de conservação do leite, baseadas predominantemente em tratamentos térmicos e no uso de conservantes químicos.

Enquanto métodos convencionais como a pasteurização e a esterilização são eficazes na eliminação microbiana, eles podem causar alterações sensoriais e nutricionais no produto, como a degradação de proteínas sensíveis e vitaminas. Em contraste, as técnicas de separação por membranas — micro e ultrafiltração — permitem a remoção física de microrganismos e partículas sem comprometer o valor nutricional, resultando em produtos com maior frescor e estabilidade.

Já a nanotecnologia surge como uma ferramenta inovadora, com potencial para o desenvolvimento de embalagens ativas, sensores de qualidade e sistemas de liberação controlada de compostos antimicrobianos, promovendo uma conservação mais inteligente e prolongada.

Complementarmente, o uso de aditivos naturais e bioconservantes, como extratos vegetais, bacteriocinas e culturas protetoras, oferece uma alternativa ecológica e livre de resíduos químicos, garantindo segurança microbiológica por meio de mecanismos biológicos e naturais.

Dessa forma, essas novas tecnologias e estratégias naturais não apenas preservam a qualidade nutricional e sensorial do leite, mas também refletem a transição da indústria láctea para processos mais sustentáveis, eficientes e alinhados às demandas por alimentos saudáveis e de rótulo limpo.

Referências

AGUIAR, J.; ARAÚJO, M.; DURÇO, B. B.; PORTEL, C. S.; PAGANI, M. M.; MACHADO, M. T.; FILHO, E. R. T.; ESMERINO, E. A. Emprego da nanotecnologia como mecanismo de inovação tecnológica na indústria de alimentos: aplicações e desafios. *Alimentos: Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente*, v. 1, n. 12, p. 1-12, 2021.

ANTUNES, A. J. Funcionalidade de proteínas do soro de leite bovino. 1. ed. Barueri, SP: Manole, 2003.

ASSIS, O. B. G. Potenciais aplicações de nanotecnologia em alimentos. Embrapa Instrumetação – INFOTECA-E, 2011.

ASSIS, L. M. Revisão: características de nanopartículas e potenciais aplicações em alimentos. *Campinas*, v. 15, n. 2, p. 99–109, abr./jun. 2012.

AYELÉN VÉLEZ, M.; PEROTTI, M. C.; SANTIAGO, L.; GENNARO, A. M.; HYNES, E. Bioactive compounds delivery using nanotechnology: design and applications in dairy food. *Nutrient Delivery*, p. 221–250, 2017.

BARROS, R. M. S. Nanoalimentos e nanotecnologias aplicadas a alimentos – riscos potenciais, necessidades regulatórias e proposta de instrumento para verificar opiniões sobre riscos potenciais à saúde e ao meio ambiente. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências na Saúde Pública) – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2011.

BASHIRI, S.; GHANBARZADEH, B.; AYASEH, A.; DEHGHANNYA, J.; EHSANI, A. Preparation and characterization of chitosan-coated nanostructured lipid carriers (CH-NLC) containing cinnamon essential oil for enriching milk and antioxidant activity. *Food Science and Technology*, v. 119, n. 11, p. 1–7, 2020.

BAYDA, S. et al. The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical-physical applications to nanomedicine. *Molecules*, v. 25, n. 1, p. 112, 2020.

BEDOYA-SERNA, C. M.; DACANAL, G. C.; FERNANDES, A. M.; PINHO, S. C. Antifungal activity of nanoemulsions encapsulating oregano (*Origanum vulgare*) essential oil: in vitro study and application in Minas Padrão cheese. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 49, n. 8, p. 929–935, 2018.

BOSCHI, J. R. Concentração e purificação das proteínas do soro de queijo por ultrafiltração. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006.

BRANDÃO, H. M.; COSTA, F. F.; SILVA, S. R. Aplicações da nanotecnologia na produção de leite. Disponível em: [https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/878256/1/Brandaо-FEPALE-2010.pdf](https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/878256/1/Brandaو-FEPALE-2010.pdf). Acesso em: 6 nov. 2025.

BRASIL. Decreto nº 55.871, de 26 de março de 1965. Modifica o Decreto nº 50.040, de 24 de janeiro de 1961, referente a normas reguladoras do emprego de aditivos para alimentos, alterado pelo Decreto nº 691, de 13 de março de 1962. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 abr. 1965.

CANCELLA, M. J. Bactérias láticas como probióticas, bioconservantes de alimentos e produtoras de bacteriocinas: uma revisão. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes, Juiz de Fora*, v. 79, n. 1, p. 37–47, jan./mar. 2024.

CARDOSO, L. G.; JUNIOR, I. J. B.; SILVA, R. V.; MOSSMANN, J.; REINEHR, C. O.; BRIÃO, V. B.; COLLA, L. M. Processed cheese with inulin and microencapsulated chia oil (*Salvia hispanica*). *Food Bioscience*, v. 37, n. 1, p. 1–9, 2020.

COSTA, M. M. et al. Nanoencapsulação de probióticos em produtos lácteos: uma revisão crítica. *Journal of Food Science and Technology*, v. 55, n. 8, p. 2769–2780, 2018.

CRISTIANINI, M.; CRUZ, A. G.; PRUDÊNCIO, E. S.; ESMERINO, E. A.; RODRIGUES, S.; PIMENTEL, T. C. *Tecnologias emergentes no processamento de alimentos*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2023.

DELSHADI, R.; BAHRAMI, A.; TAFTI, A. G.; BARBA, F. J.; WILLIAMS, L. L. Micro and nano-encapsulation of vegetable and essential oils to develop functional food products with improved nutritional profiles. *Trends in Food Science & Technology*, v. 21, n. 7, p. 1–27, 2020.

ERFANIAN, A.; RASTI, B.; MANAP, Y. Comparing the calcium bioavailability from two types of nano-sized enriched milk using in-vivo assay. *Food Chemistry*, v. 214, p. 606–613, 2017.

FAO/WHO. Expert meeting on the application of nanotechnologies in the food and agriculture sectors: potential food safety implications. Meeting Report. Roma: FAO, 2009. 104 p.

FERNANDES, R. G.; OLIVEIRA, L. P. S. Entre riscos e desinformação: a utilização da nanotecnologia na indústria de alimentos. *Revista Jurídica da FA7*, v. 16, n. 2, p. 63–81, 2019.

FILHO, M. B. G. Análise da implementação do sistema de membranas ultrafiltrantes em uma ETA de ciclo completo a partir do estudo de caso da ETA Meia Ponte. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2017.

FILHO, G. A. B.; RENOSTO, N. F.; BALESTRIN, T. S. Produção de suplemento (whey protein) concentrado e isolado a partir do soro de leite. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2021.

GONÇALVES, R. A. S. Percepção do consumidor em relação à nanotecnologia. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2018.

GROVES, K.; TITORI, P. Nanotechnology and the food industry. *Food Science and Technology*, v. 23, n. 2, p. 18–20, 2009.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. *Processos de separação por membranas*. 1. ed. Rio de Janeiro: E-Papers, 2006.

JELINSKI, L. Biologically related aspects of nanoparticles, nanostructured materials and nanodevices. In: SIEGEL, R. W.; HU, E.; ROCO, M. C. (eds.). *Nanostructure science and technology: a worldwide study*. Washington: NSTC / IWGN, 1999.

JESUS, M. V. Uso de membranas de microfiltração e ultrafiltração para recuperação e concentração de amilase produzida em resíduo agroindustrial (manipueira) como substrato. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, SE, 2019.

LEIDENS, N. Concentração das proteínas do soro de leite de ovelha por ultrafiltração e determinação das propriedades funcionais dos concentrados proteicos. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2013.

MARQUES, I. R. Redução de incrustação proteica em membranas de ultrafiltração de poli(étersulfona) por deposição de dopamina e polietilenoinima. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2021.

MARTINS, V. C.; BRAGA, E. C. O.; GODOY, R. L. O.; BORGUINI, R. G.; PACHECO, S.; SANTIAGO, M. C. A.; NASCIMENTO, L. D. M. Nanotecnologia em alimentos: uma breve revisão. *Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia*, v. 7, n. 2, p. 25–42, 2016.

MASSON, T. J.; BELINO, W. V. L. Estudo das propriedades termomecânicas de nanocompósitos híbridos. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 4, p. 42618–42643, 2021.

MAURYA, V. K.; AGGARWAL, M. Fabrication of nano-structured lipid carrier for encapsulation of vitamin D₃ for fortification of “Lassi”: a milk-based beverage. *Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, v. 193, art. 105429, 2019.

MULDER, M. Basic principles of membrane technology. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. 564 p.

ÖZKAN, G.; FRANCO, P.; MARCO, I.; XIAO, J.; CAPANOGLU, E. A review of microencapsulation methods for food antioxidants: principles, advantages, drawbacks and applications. *Food Chemistry*, v. 272, n. 8, p. 494–506, 2019.

PETRUS, J. C. C.; TESSARO, I. C. Operações unitárias da indústria de alimentos: processos de separação com membranas. In: Operações unitárias na indústria de alimentos. [S.l.: s.n.], p. 251–299.

PINTO, G. H. A.; BERNARDO, A. Protocolo de avaliação do emprego de membranas em processo de separação. *Journal of Chemical Engineering and Chemistry*, v. 2, p. 146–160, 2016.

SHARMA KHANAL, B. K.; BUDIMAN, C.; HODSON, M. P.; PLAN, M. R.; PRAKASH, S.; BHANDARI, B.; BANSAL, N. Physico-chemical and biochemical properties of low-fat Cheddar cheese made from micron to nano-sized milk fat emulsions. *Journal of Food Engineering*, v. 242, p. 94–105, 2019.

SNAPE, J. B.; NAKAJIMA, M. Processing of agricultural fats and oils using membrane technology. *Journal of Food Engineering*, Essex, v. 30, p. 1–41, 1996.

SOZER, N.; KOKINI, J. L. Nanotechnology and its applications in the food sector. *Trends in Biotechnology*, v. 27, n. 2, 2009.

VERMA, A. K.; BANERJEE, R.; DWIVEDI, H. P.; JUNEJA, V. K. Bacteriocins: potential in food preservation. *Encyclopedia of Food Microbiology*, v. 1, p. 180–186, 2014.

WANG, W.-Q.; WA, Y.-C.; ZHANG, X.-F.; GU, R.-X.; LU, M.-L. Whey protein membrane processing methods and membrane fouling mechanism analysis. *Food Chemistry*, v. 289, p. 468–481, 2019.

YEE, K. W. K.; WILEY, D. E.; BAO, J. Whey protein concentrate production by continuous ultrafiltration: operability under constant operating conditions. *Biotechnology Advances*, v. 33, p. 756–774, 2006.



CAPÍTULO 5 – SEGURANÇA ALIMENTAR E CONTROLE DE QUALIDADE

5.1 Detecção rápida de patógenos com biossensores

O biosensor é um dispositivo analítico auto-suficiente que incorpora um material biologicamente ativo, colocando-o em contato com um elemento transdutor com o propósito de detectar (reversivelmente e seletivamente) a concentração ou atividade química de uma espécie em uma amostra qualquer. Desta forma, o objetivo de um biossensor é produzir um sinal elétrico proporcional, em magnitude ou frequência, à concentração do analito.

No contexto dos biossensores, o analito é o alvo de detecção — ou seja, a substância, molécula ou microrganismo que se deseja identificar ou quantificar. É o componente de interesse que interage especificamente com o elemento biológico sensível do biossensor (como uma enzima, anticorpo, aptâmero, célula ou receptor molecular). Essa interação é o ponto de partida do processo de reconhecimento biológico, resultando em uma resposta mensurável pelo transdutor.

O tipo de analito pode variar amplamente, dependendo da aplicação, os analitos mais comuns incluem microrganismos patogênicos (*Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp.), toxinas bacterianas, resíduos de antibióticos, pesticidas, açúcares, proteínas e metabólitos indicadores de deterioração.

O analito, contido na amostra, ao entrar em contato com o elemento de reconhecimento, provoca uma mudança físico-química (variação de calor, índice de refração, resistência elétrica, etc.) que pode ser identificado pelo transdutor.

O transdutor age como uma interface, processa e converte esse sinal químico em sinal mensurável. Na etapa seguinte, a unidade processadora de sinal irá amplificar o sinal e transferi-lo para um monitor ou dispositivo, onde a visualização de dados informará ao usuário se o analito foi ou não identificado e a sua concentração na amostra (WANG, 2000).

O biossensor deve possuir algumas características desejáveis como, por exemplo: seletividade, faixa de sensibilidade adequada, acurácia e precisão, tempo de vida útil maior possível, freqüência de amostragem também maior possível, reproduzibilidade, baixo custo e pequeno tamanho (ROSSATO, 2000).

Esses dispositivos se destacam por oferecerem rapidez na detecção e detalhes em tempo real durante todo o processo de produção (BARFIDOKHT, GOODING, 2014; TILTON et al., 2019). Desta forma, podem ser aplicados em diversas áreas, como monitoramento ambiental, controle de qualidade de alimentos, diagnóstico clínico e detecção de contaminantes microbiológicos.

Em especial na indústria alimentícia, os biosensores têm como função a determinação do grau de contaminação dos alimentos e controle “on line” dos processos de fermentação e produção (MELLO, 2002).

Mais especificamente, os biosensores são amplamente utilizados na identificação e detecção de bactérias e têm atraído grande interesse como um dos métodos mais eficientes e precisos de análise de alimentos e monitoramento de segurança alimentar (ROTARIU et.al, 2016; WISUTHIPHAET, 2019; LV, 2019). Porém, a função dos biosensores depende da interação entre agentes biologicamente ativos, o transdutor e uma unidade de conversão de sinal (HAMEED et al, 2018, ALI et al, 2017). Essa integração permite que os biosensores atuem como sistemas miniaturizados de diagnóstico, capazes de detectar microrganismos patogênicos, toxinas, resíduos antimicrobianos ou alterações metabólicas de forma rápida, seletiva e em tempo real) (IBRÍŠIMOVIĆ, 2015).

O biosensor reconhece um biomarcador alvo, característico de um patógeno específico, por meio de um elemento sensor immobilizado denominado biorreceptor (anticorpo monoclonal, RNA, DNA, glicano, lectina, enzima, tecido, célula inteira). O biorreceptor é um componente crucial, pois suas propriedades bioquímicas garantem alta sensibilidade e seletividade na detecção do biomarcador e permitem evitar interferências de outros microrganismos ou moléculas presentes na amostra testada. A interação bioquímica específica entre o biomarcador e o biorreceptor é convertida em um sinal mensurável pelo transdutor. O registro e a exibição do sinal devem, então, permitir a identificação qualitativa e quantitativa do patógeno (VIDIC, 2017).

Na indústria de laticínios, os biosensores têm sido utilizados para monitorar parâmetros de qualidade e segurança, como detecção de resíduos de antibióticos, patógenos, toxinas e variações na composição do leite, contribuindo para um controle mais preciso, automatizado e em tempo real dos processos produtivos.

Desta forma os biossensores têm sido utilizados para o monitoramento de contaminações do leite por bactérias como *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* e *Staphylococcus aureus*, além da detecção de resíduos de antibióticos e pesticidas, que podem comprometer tanto a segurança quanto a funcionalidade das culturas lácticas durante a fermentação.

Essa tecnologia oferece uma alternativa eficiente aos métodos microbiológicos tradicionais, que, embora precisos, são geralmente lentos, laboriosos e dependentes de etapas de cultivo e incubação. Com os biossensores, é possível obter resultados em minutos ou poucas horas, facilitando decisões rápidas no controle de qualidade e reduzindo perdas produtivas.

O avanço das pesquisas em nanotecnologia tem impulsionado o desenvolvimento de biossensores de nova geração, mais sensíveis, estáveis e portáteis. A incorporação de nanopartículas metálicas, nanofilmes condutores, nanotubos de carbono e quantum dots tem ampliado significativamente a capacidade de detecção, permitindo o reconhecimento de quantidades ínfimas de microrganismos ou metabólitos indicadores de deterioração.

Além disso, os biossensores nanoestruturados oferecem maior área superficial de interação e melhor condução elétrica, o que se traduz em maior precisão e menor limite de detecção. Essas características os tornam ferramentas promissoras para a implantação de sistemas de monitoramento em tempo real, integrados às linhas de produção automatizadas da indústria de laticínios.

Em síntese, os biossensores representam uma ferramenta inovadora para o controle de qualidade microbiológica, unindo princípios de biotecnologia, química analítica e nanotecnologia. Sua aplicação em produtos lácteos e outros alimentos de origem animal possibilita uma detecção rápida, seletiva e sustentável de contaminações, garantindo maior segurança ao consumidor e eficiência ao processo produtivo.

5.2 *Blockchain* para segurança e rastreabilidade

Blockchain é uma tecnologia caracterizada como um livro digital que possibilita com que uma rede de usuários rastreie qualquer transação comercial, armazenando dados digitais públicos (CARLOZO, 2017/2018). Trata-se de uma tecnologia de registro distribuído, descentralizado e verificável coletivamente, composta por registros digitais denominados blocos. Essa tecnologia conecta os blocos por meio de métodos criptográfico (PATEL et.al., 2023).

Cada bloco de dados contém informações sobre uma determinada transação ou processo, gera assinaturas digitais para autenticar sua validade e se conecta ao bloco seguinte, formando a cadeia principal denominada Blockchain (GIUNGATO et.al.,2017). Os blocos agrupam as transações e, em seguida, são encadeados em uma ordem sequencial, formando o que é conhecido como a cadeia de blocos (daí o nome dessa tecnologia, *block* = bloco, *chain* = cadeia). Posteriormente, essa cadeia de blocos é compartilhada entre os participantes da rede, e por meio de um algoritmo de consenso, esses participantes conseguem verificar a validade das informações distribuídas, eliminando a necessidade de uma terceira parte certificadora (ANTONOUPOLOS, 2014; VYAS; BEIJE; KRISHNAMACHARI, 2019).

Os dados armazenados tornam-se imutáveis e à prova de adulterações porque cada bloco contém o hash do bloco anterior e gera um novo hash próprio. Assim, cria-se uma cadeia contínua de blocos interligados por algoritmos de hash. O processo de hash é uma técnica unidirecional de codificação, que garante que as informações registradas não possam ser alteradas (KISHIGAMI, et al, 2015). Caso alguém tente modificar os dados em um bloco, o carimbo de tempo e o valor do hash mudam automaticamente, tornando a informação inválida (BODO, et al, 2018).

Uma vez que um bloco é inserido na cadeia, a informação contida na cadeia de blocos não pode ser alterada sem o consenso da rede (ANTONOUPOLOS, 2016; FURLONGER; UZUREAU, 2019; VYAS; BEIJE; KRISHNAMACHARI, 2019), proporcionando maior segurança às informações compartilhadas (GAUR et al., 2018; VYAS; BEIJE; KRISHNAMACHARI, 2019). Essa segurança decorre do arranjo da informação criptografada, pois qualquer modificação em uma transação de um dos blocos resulta na desconexão de todos os outros blocos derivados da cadeia (ANTONOUPOLOS, 2016; GAUR et al., 2018).

O Blockchain é distribuído entre os computadores dos participantes (nós), formando uma rede ponto a ponto (peer-to-peer). Todos os participantes (stakeholders) monitoram e verificam as informações por meio de um princípio de consenso, adicionando o carimbo de tempo aos novos registros (EYAL, 2017). Combinando redes peer-to-peer com algoritmos criptográficos, um grupo de agentes pode chegar a um acordo sobre um determinado estado situacional e registrar esse acordo de maneira segura e verificável. Desta forma, o blockchain garante um sistema imutável, transparente, compartilhado e seguro, permitindo soluções de negócios inovadoras, especialmente quando combinado com contratos inteligentes (smart contracts) (ANDONI et al, 2019)

Os contratos inteligentes (smart contracts) são programas digitais automatizados que executam acordos de forma segura, transparente e sem intermediários. Eles funcionam dentro da própria rede blockchain e são ativados automaticamente quando

as condições previamente definidas entre as partes são atendidas. Diferentemente dos contratos tradicionais, que dependem da validação humana ou jurídica, os contratos inteligentes utilizam códigos criptografados e regras programadas que garantem o cumprimento das obrigações de forma imediata e imutável.

O principal campo de aplicação da tecnologia blockchain no setor alimentício é o sistema de rastreabilidade na cadeia de suprimentos. Além disso, ela é valiosa para identificar fraudes alimentares, verificar autenticidade e monitorar a segurança dos alimentos “do campo ao prato”.

Na cadeia de suprimentos, os alimentos passam por várias etapas — produção, processamento, transporte, distribuição e varejo. Assim, os participantes da cadeia (produtores, processadores, transportadores, varejistas e consumidores) atuam como nós. Cada nó pode visualizar informações na plataforma pública, mas os dados privados são armazenados em uma cadeia permissionada, garantindo segurança e privacidade (LI, et al., 2020; LIEROW et. al, 2017; TRIPOLI, & SCHMIDHUBER, 2020).

Na cadeia produtiva de leite, a tecnologia blockchain surge como uma ferramenta inovadora e estratégica para garantir a transparência, a rastreabilidade e a segurança dos produtos lácteos em todas as etapas — desde a produção na fazenda até a chegada ao consumidor final. Por meio de um sistema digital descentralizado e imutável, o blockchain permite registrar e validar informações essenciais, como origem do leite, condições de ordenha, transporte, temperatura de armazenamento, processamento e distribuição, assegurando que cada elo da cadeia possa ser verificado em tempo real (CASINO et al., 2020; SHINGH et al., 2020; TAN; NGAN, 2020; KHANNA et al., 2022; VARAVALLO et al., 2022; AKRAM et al., 2023), otimizando a tomada de decisão dos gestores (MANGLA et al., 2021) e garantindo mais segurança aos consumidores (LONGO et al., 2020; SHINGH et al., 2020; WANG et al., 2020).

Por meio de um sistema digital seguro e transparente, os produtores registram informações como o estado sanitário do rebanho, a produtividade e as condições de ordenha, garantindo a rastreabilidade desde a origem. As indústrias, por sua vez, recebem esses dados em tempo real e adicionam informações sobre o processamento, a qualidade, a data de produção e a validade do produto, formando um histórico completo e confiável.

No que diz respeito ao transporte e distribuição do leite e seus derivados, a adoção da tecnologia *blockchain* se integra de maneira harmoniosa com os sensores da Internet das Coisas. Os sensores instalados nos veículos extraem informações como localização, temperatura, entre outras, relacionadas ao leite cru desde o transporte até as unidades de processamento, e adicionam esses dados ao *blockchain* (TAN; NGAN, 2020; MANGLA et al., 2021). Da mesma forma, os sensores possibilitam o acompanhamento das informações dos produtos acabados até os centros de distribuição ou pontos de venda (SHINGH et al., 2020; TAN; NGAN, 2020).

Por fim, o consumidor tem acesso a essas informações de forma simples e segura, podendo verificar a origem, a autenticidade e a qualidade do leite adquirido, o que aumenta a confiança, a transparência e a valorização dos produtos lácteos no mercado.

Essa rastreabilidade integral aumenta a confiança do consumidor, facilita ações rápidas em casos de contaminação ou não conformidade, e fortalece a credibilidade das empresas junto aos órgãos reguladores e ao mercado internacional. Além disso, o uso do blockchain pode otimizar processos logísticos, melhorar a gestão da qualidade e da sustentabilidade e promover uma integração mais eficiente entre produtores, indústrias e distribuidores, consolidando-se como uma base tecnológica essencial para a modernização e competitividade do setor lácteo.

A otimização do compartilhamento da informação com o emprego da tecnologia *blockchain* promove transparência entre os vários participantes da rede tornando-o uma importante ferramenta para a rastreabilidade em cadeias de suprimentos do leite. (BEHNKE; JANSSEN, 2020; SHINGH, et al., 2020; TAN; NGAN, 2020; MANGLA et al., 2021; LAVELLI; BECCALLI, 2022; VARAVALLO et al., 2022).

5.3 Monitoramento em tempo real da cadeia fria

A cadeia do frio é um termo que descreve uma série de operações interdependentes que envolvem a produção, distribuição, armazenamento e comercialização de produtos sensíveis à temperatura (LIKAR; JEVŠNIK, 2006). Essa cadeia abrange um conjunto de processos frigoríficos em que os produtos são mantidos sob temperatura e umidade relativa controladas, podendo variar desde operações simples, como o pré-resfriamento com gelo e o transporte em veículos isotérmicos, até sistemas complexos de refrigeração automatizados. A forma de aplicação da cadeia do frio depende das características do produto e das exigências do processo de comercialização (NANTES; MACHADO, 2005).

Na linha de produção do leite, a cadeia de frio compreende todas as etapas em que o produto deve ser mantido sob refrigeração controlada, desde a ordenha na fazenda até o armazenamento e distribuição ao consumidor final. O objetivo principal é preservar a qualidade físico-química e microbiológica do leite, evitando o crescimento de microrganismos deteriorantes e patogênicos. Logo após a ordenha, o leite deve ser resfriado rapidamente a cerca de 4 °C, permanecendo nessa faixa de temperatura durante o transporte, processamento e estocagem. A eficiência desse sistema depende de equipamentos adequados, monitoramento contínuo da temperatura e boas práticas de higiene, garantindo um produto seguro, fresco e com maior vida útil, além de contribuir para a rastreabilidade e a confiança do consumidor.

O monitoramento em tempo real da cadeia de frio é fundamental para assegurar a qualidade, a segurança e a integridade do leite. A temperatura precisa ser mantida dentro de faixas controladas durante todas as etapas de coleta, armazenamento, transporte e processamento, a fim de evitar alterações químicas e microbiológicas.

Com o uso de sensores inteligentes e sistemas integrados, como a tecnologia *blockchain*, é possível registrar continuamente dados de temperatura, umidade e tempo de exposição, que são armazenados de forma segura e imutável. Esse controle contínuo permite identificar desvios imediatamente, facilitando ações corretivas rápidas, reduzindo perdas e garantindo que apenas produtos mantidos em condições ideais cheguem ao mercado.

A tecnologia de redes de sensores sem fio representa um avanço significativo nesse contexto, resultante da evolução das tecnologias de medição, detecção, comunicação e armazenamento em nuvem. Sua aplicação na cadeia do frio de produtos perecíveis possibilita o monitoramento constante das condições de conservação, que influenciam diretamente a vida útil e a qualidade dos alimentos, além de auxiliar na tomada de decisões logísticas e operacionais (RUIZ-GARCIA et al., 2009). Essas redes são compostas por um grande número de nós sensores distribuídos em áreas estratégicas, com conectividade por radiofrequência, operando de forma autônoma e organizadas por algoritmos de autoajuste. Cada nó pode conter diferentes sensores, como de temperatura, umidade e gases, possibilitando um controle preciso e descentralizado (GARCIA et al., 2010).

A Internet das Coisas (IoT) também tem se mostrado uma ferramenta essencial para o controle da cadeia de frio na indústria de laticínios, permitindo o monitoramento contínuo e automatizado das condições de temperatura, umidade e tempo de armazenamento em todas as etapas — da coleta do leite nas fazendas ao transporte, processamento e distribuição. Com sensores conectados à internet, os dados são coletados em tempo real e armazenados em nuvem, garantindo rastreabilidade, precisão e segurança das informações. Essa conectividade possibilita respostas imediatas em caso de falhas, prevenindo perdas de qualidade e reduzindo riscos de contaminação. Integrada a sistemas de gestão e blockchain, a IoT promove transparência, eficiência operacional e tomadas de decisão baseadas em dados, assegurando um produto seguro e de alta qualidade (SEKIZAWA et al., 2018; ROJKO, 2017; LIAO et al., 2017).

Outra inovação importante é o uso da tecnologia RFID (Identificação por Radiofrequência), composta por um chip com memória e sistema de armazenamento e transmissão de dados via ondas eletromagnéticas. Essa tecnologia tem proporcionado novas possibilidades nas cadeias de alimentos perecíveis, cuja vida útil é limitada (BADIA-MELIS et al., 2015). A identificação automática da presença do produto e das

condições de exposição, por radiofrequência, aumenta a confiabilidade e a segurança das informações, permitindo o compartilhamento em tempo real entre os diferentes elos da cadeia de suprimentos (ZHANG; LI, 2012; RUIZ-GARCIA; LUNADEI, 2010).

A combinação entre microcontroladores, sensores, RFID e sistemas de posicionamento global (GPS) tem se mostrado uma solução inovadora para o rastreamento do leite durante o transporte, desde a propriedade rural até a indústria (LAS MORENAS et al., 2014). Nessa tecnologia, o motorista coleta amostras identificadas por etiquetas RFID e armazenadas em refrigeradores elétricos portáteis conectados ao sistema do caminhão. O refrigerador abre apenas quando uma nova amostra é validada pelo leitor RFID e registra automaticamente dados de localização, horário e temperatura interna, garantindo o controle total do transporte e das condições de conservação.

Além disso, ferramentas como o gerenciador de rotas, desenvolvido por Amiama et al. (2015), utilizam sistemas de apoio à decisão espacial para otimizar o transporte do leite, reduzindo custos e tempo de coleta. O software permite simulações e ajustes rápidos nas rotas, buscando soluções que minimizem o uso de combustível e o tempo de deslocamento. Essa tecnologia pode estimar custos de transporte com base em variáveis como mão de obra, quilometragem percorrida e número de caminhões-tanque necessários, resultando em análises detalhadas de custos mensais de capital, operação e trabalho (QUINLAN et al., 2012). Dessa forma, observa-se uma crescente adoção de soluções tecnológicas no setor leiteiro, voltadas à redução de custos, otimização logística, prevenção de desperdícios e garantia da qualidade do leite. O monitoramento em tempo real da cadeia de frio, aliado a tecnologias como IoT, RFID, sensores inteligentes e blockchain, representa um passo essencial para o avanço da indústria 4.0 nos laticínios, assegurando eficiência, sustentabilidade e confiança do consumidor.

5.4 Conformidade com normas nacionais e internacionais

A incorporação de novas tecnologias na cadeia produtiva do leite, como Internet das Coisas (IoT), Identificação por Radiofrequência (RFID), blockchain e sensores inteligentes, tem transformado profundamente o modo como o setor laticinista gerencia a qualidade, a rastreabilidade e a segurança dos produtos.

No entanto, a adoção dessas ferramentas deve estar alinhada às normas nacionais e internacionais que regulam tanto a produção quanto o controle de alimentos de origem animal. No contexto brasileiro, a Instrução Normativa nº 76/2018 e a Instrução Normativa nº 77/2018 do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) estabelecem critérios para a higiene, coleta, refrigeração e transporte do leite cru, exigindo o controle rigoroso da temperatura e da qualidade microbiológica do

produto. Tecnologias digitais, como sensores e sistemas de monitoramento remoto, permitem atender com maior precisão a esses requisitos, garantindo conformidade com os padrões estabelecidos.

Em âmbito internacional, as diretrizes da Codex Alimentarius e as normas da International Organization for Standardization (ISO), como a ISO 22000:2018 (Gestão da Segurança de Alimentos) e a ISO 9001:2015 (Gestão da Qualidade), reforçam a importância de sistemas rastreáveis, confiáveis e auditáveis ao longo de toda a cadeia produtiva. Nesse contexto, a aplicação de tecnologias como blockchain e IoT favorece a transparência e a rastreabilidade das informações, permitindo auditorias mais eficientes e garantindo a confiança do consumidor e dos mercados importadores. Além disso, tais ferramentas auxiliam as indústrias na conformidade com exigências de exportação e certificações internacionais, como HACCP (Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle) e BPF (Boas Práticas de Fabricação).

Assim, a conformidade tecnológica não apenas garante o atendimento às exigências legais, mas também representa um diferencial competitivo no setor lácteo, ao fortalecer a credibilidade das empresas, reduzir riscos de não conformidades e promover uma gestão integrada e sustentável da cadeia do leite. O alinhamento entre inovação tecnológica e normatização é, portanto, essencial para consolidar o avanço da indústria 4.0 no segmento lácteo, de forma segura, rastreável e compatível com os padrões de qualidade global.

Referencias

AKRAM, M. W. et al. Blockchain technology in a crisis: advantages, challenges, and lessons learned for enhancing food supply chains during the COVID-19 pandemic. *Journal of Cleaner Production*, art. 140034, 2023.

ALI, J.; NAJEEB, J.; ALI, M. A.; ASLAM, M. F.; RAZA, A. Biosensores: seus fundamentos, projetos, tipos e aplicações impactantes mais recentes: uma revisão. *J. Biosens. Bioelétron*, v. 8, p. 1–9, 2017.

AMIAMA, C.; PEREIRA, J. M.; CARPENTE, L.; SALGADO, J. Spatial decision support system for the route management for milk collection from dairy farms. *Transportation Letters – The International Journal of Transportation Research*, v. 7, n. 5, p. 279–288, 2015.

ANDONI, M. et al. Blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 100, p. 143–174, 2019.

ANTONOPoulos, A. M. *Mastering Bitcoin: unlock digital cripto-currencies*. Sebastopol: O'Reilly Media, 2014.

ANVISA. Guia de Boas Práticas de Fabricação para estabelecimentos produtores de alimentos. Brasília: Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2019.

BADIA-MELIS, R.; MISHRA, P.; RUIZ-GARCÍA, L. Food traceability: new trends and recent advances: a review. *Food Control*, v. 57, p. 393–401, 2015.

BARFIDOKHT, A.; GOODING, J. J. Abordagens para permitir o uso de dispositivos eletroanalíticos em fluidos biológicos. *Electroanalysis*, v. 26, p. 1182–1196, 2014.

BEHNKE, K.; JANSSEN, M. F. W. H. A. Boundary conditions for traceability in food supply chains using blockchain technology. *International Journal of Information Management*, v. 52, p. 101969, 2020.

BODO, B.; GERVAIS, D.; QUINTAIS, J. P. Blockchain and smart contracts: the missing link in copyright licensing? *International Journal of Law and Information Technology*, v. 26, n. 4, p. 311–336, 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.º 76, de 26 de novembro de 2018. Estabelece os regulamentos técnicos de identidade e qualidade do leite cru refrigerado, do leite pasteurizado e do leite pasteurizado tipo A. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 nov. 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.º 77, de 26 de novembro de 2018. Estabelece os critérios e procedimentos para a produção, acondicionamento, conservação, transporte, seleção e recepção do leite cru. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 nov. 2018.

CARLOZO, L. What is blockchain? Here's a primer on the potentially transformative digital ledger technology. *Journal of Accountancy*, v. 224, n. 1, p. 29, 2017/2018.

CASINO, F. et al. Blockchain-based food supply chain traceability: a case study in the dairy sector. *International Journal of Production Research*, v. 59, n. 19, p. 5758–5770, 2021.

CODEX ALIMENTARIUS. Food hygiene: general principles (CXC 1-1969). Rome: FAO/WHO, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/>. Acesso em: 22 out. 2025.

EYAL, I. Blockchain technology: transforming libertarian cryptocurrency dreams to finance and banking realities. *Computer*, v. 50, n. 9, p. 38–49, 2017.

FURLONGER, D.; UZUREAU, C. The real business of blockchain: how leaders can create value in a new digital age. [S.I.]: Harvard Business Press, 2019.

GARCIA, M.; BRI, D.; SENDRA, S.; LLORET, J. Practical deployments of wireless sensor networks: a survey. *International Journal on Advances in Networks and Services*, v. 3, n. 1, p. 170–185, 2010.

GAUR, N. et al. Hands-on blockchain with Hyperledger: building decentralized applications with Hyperledger Fabric and Composer. [S.I.]: Packt Publishing, 2018.

GIUNGATO, P.; RANA, R.; TARABELLA, A.; TRICASE, C. Current trends in sustainability of bitcoins and related blockchain technology. *Sustainability*, v. 9, n. 12, p. 2214, 2017.

HACCP – Hazard Analysis and Critical Control Point. Recommended international code of practice: general principles of food hygiene (CAC/RCP 1-1969, Rev. 2020). Rome: FAO/WHO, 2020.

HAMEED, S.; XIE, L.; YING, Y. Técnicas de detecção convencionais e emergentes para bactérias patogênicas na ciência dos alimentos: uma revisão. *Trends in Food Science & Technology*, v. 81, p. 61–73, 2018.

IBRIŠIMOVIĆ, N.; IBRIŠIMOVIĆ, M.; KESIĆ, A.; PITTLER, F. Biosensor microbiano: uma nova tendência na detecção de contaminação bacteriana. *Seg. Química. Química. Seg.*, v. 146, p. 1363–1370, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 22000:2018 – Food safety management systems: requirements for any organization in the food chain. Geneva: ISO, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9001:2015 – Quality management systems: requirements. Geneva: ISO, 2015.

KHANNA, A. et al. Blockchain-enabled supply chain platform for Indian dairy industry: safety and traceability. *Foods*, v. 11, n. 17, p. 2716, 2022.

KISHIGAMI, J.; FUJIMURA, S.; WATANABE, H.; NAKADAIRA, A.; AKUTSU, A. The block-chain-based digital content distribution system. In: IEEE Fifth International Conference on Big Data and Cloud Computing, 2015, Dalian, China. Proceedings... Piscataway: IEEE, 2015. p. 187–190.

LAS MORENAS, J.; GARCÍA, A.; BLANCO, J. Prototype traceability system for the dairy industry. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 101, p. 34–41, 2014.

LAVELLI, V.; BECCALLI, M. P. Cheese whey recycling in the perspective of the circular economy: modeling processes and the supply chain to design the involvement of the small and medium enterprises. *Trends in Food Science & Technology*, v. 126, p. 86–98, 2022.

LI, X.; JIANG, P.; CHEN, T.; LUO, X.; WEN, Q. A survey on the security of blockchain systems. *Future Generation Computer Systems*, v. 107, p. 841–853, 2020.

LIAO, Y.; DESCHAMPS, F.; DE FREITAS ROCHA LOURES, E.; RAMOS, L. F. P. Past, present and future of Industry 4.0: a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, v. 55, n. 12, p. 3609–3629, 2017.

LIEROW, M.; HERZOG, C.; OEST, P. Blockchain: the backbone of digital supply chains. Oliver Wyman, 2017. Disponível em: <https://www.oliverwyman.com/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

LIKAR, K.; JEVŠNIK, M. Cold chain maintaining in food trade. *Food Control*, v. 17, p. 108–113, 2006.

LONGO, F.; NICOLETTI, L.; PADOVANO, A. Estimating the impact of blockchain adoption in the food processing industry and supply chain. *International Journal of Food Engineering*, v. 16, n. 5–6, p. 20190109, 2020.

LV, X. et al. Ensaio imunoenzimático multicolorido e ultrassensível baseado na reação em cadeia híbrida de fluorescência para detecção simultânea de patógenos. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 67, p. 9390–9398, 2019.

MANGLA, S. K. et al. Using system dynamics to analyze the societal impacts of blockchain technology in milk supply chains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 149, p. 102289, 2021.

MELLO, L. D. et al. Review of the use of biosensors as analytical tools in the food and drink industries. *Food Chemistry*, v. 77, n. 2, p. 237–256, 2002.

NANTES, J. F. D.; MACHADO, J. G. C. F. Aspectos competitivos da indústria de alimentos no Brasil. In: Identificação de gargalos tecnológicos na agroindústria paranaense. Curitiba: Iparades, 2005. p. 129.

PATEL, A. S. et al. Blockchain technology in food safety and traceability concern to livestock products. *Veterinary World*, v. 9, n. 6, e16526, 2023.

QUINLAN, C.; KEANE, M.; O'CONNOR, D.; SHALOO, L. Milk transport costs under differing seasonality assumptions for the Irish dairy industry. *International Journal of Dairy Technology*, v. 65, n. 1, p. 22–31, 2012.

ROJKO, A. Industry 4.0 concept: background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, v. 11, n. 5, p. 77, 2017.

ROSATTO, S. S. Desenvolvimento de um biossensor amperométrico para fenol à base de peroxidase e sílica modificada. 2000. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

ROTARIU, L.; LAGARDE, F.; JAFFREZIC-RENAULT, N.; BALA, C. Biosensores eletroquímicos para detecção rápida de contaminantes alimentares – tendências e perspectivas. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 79, p. 80–87, 2016.

RUIZ-GARCIA, L.; LUNADEI, L. Monitoring cold chain logistics by means of RFID. In: TURCU, C. (ed.). *Sustainable radio frequency identification solutions*. Vukovar: Intech, 2010. p. 37–50.

RUIZ-GARCIA, L.; LUNADEI, L.; BARREIRO, P.; ROBLA, J. I. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends. *Sensors*, v. 9, n. 6, p. 4728–4750, 2009.

SEKIZAWA, T.; MIKOSHI, T.; NAGURA, M.; WATANABE, R.; CHEN, Q. Probabilistic position estimation and model checking for resource-constrained IoT devices. In: 2018 27th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN). Anais... 2018.

SHINGH, S. et al. Dairy supply chain system based on blockchain technology. *Asian Journal of Economics, Business and Accounting*, v. 14, n. 2, p. 13–19, 2020.

TAN, A.; NGAN, P. T. A proposed framework model for dairy supply chain traceability. *Sustainable Futures*, v. 2, p. 100034, 2020.

TILTON, L.; DAS, G.; YANG, X.; WISUTHIPHAET, N.; KENNEDY, I. M.; NITIN, N. Dispositivo nanofotônico em combinação com bacteriófagos para aumentar a sensibilidade de detecção de *Escherichia coli* em água de lavagem simulada. *Analytical Letters*, v. 52, p. 2203–2213, 2019.

TRIPOLI, M.; SCHMIDHUBER, J. Optimising traceability in trade for live animals and animal products with digital technologies. *Revue Scientifique et Technique (International Office of Epizootics)*, v. 39, n. 1, p. 235–244, 2020.

VARAVALLO, G. et al. Traceability platform based on green blockchain: an application case study in dairy supply chain. *Sustainability*, v. 14, n. 6, p. 3321, 2022.

VIDIC, J.; MANZANO, M.; CHANG, C. M.; RENAULT, N. J. Advanced biosensors for detection of pathogens related to livestock and poultry. *Veterinary Research*, v. 48, art. 11, p. 2, 2017.

VYAS, N.; BEIJE, A.; KRISHNAMACHARI, B. *Blockchain and the supply chain: concepts, strategies and practical applications*. London: Kogan Page, 2019.

WANG, J. From DNA biosensors to gene chips. *Nucleic Acids Research*, v. 28, p. 3011, 2000.

WANG, Y. et al. Food safety traceability method based on blockchain technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. p. 1–7.

WISUTHIPHAET, N.; YANG, X.; YOUNG, G. M.; NITIN, N. Detecção rápida de *Escherichia coli* em bebidas usando o bacteriófago T7 geneticamente modificado. *AMB Express*, v. 9, p. 55, 2019.

ZHANG, M.; LI, P. RFID application strategy in agri-food supply chain based on safety and benefit analysis. *Physics Procedia*, v. 25, p. 636–642, 2012.



CAPÍTULO 6 – PERSPECTIVAS FUTURAS E CONCLUSÕES

6.1 Inovações em desenvolvimento

A Inovação de um produto consiste na introdução de um bem ou serviço novo ou significativamente melhorado no que concerne a suas características ou usos previstos. Incluem-se melhoramentos significativos em especificações técnicas, componentes e materiais, softwares incorporados, facilidade de uso ou outras características funcionais (MANUAL DE OSLO, 1997).

O processo de inovar está atrelado à capacidade das pessoas em utilizar sua criatividade, seus conhecimentos e suas habilidades gerando uma mudança que altere o status de um produto, de um serviço, de uma nova tecnologia, de um novo processo produtivo, ou ainda criando um novo mercado (FREITAS FILHO, 2013).

As inovações em desenvolvimento na indústria de laticínios têm transformado de forma significativa todos os elos da cadeia produtiva, desde a obtenção da matéria-prima até o produto final disponível ao consumidor. O avanço de tecnologias como a automação de processos, a Internet das Coisas (IoT), o uso de sensores inteligentes e sistemas de rastreabilidade baseados em blockchain tem permitido maior controle de qualidade, segurança e eficiência operacional. Além disso, pesquisas voltadas à sustentabilidade, ao uso de probióticos, à redução de aditivos artificiais e ao desenvolvimento de embalagens ativas e biodegradáveis estão redefinindo o padrão de produção e consumo de derivados lácteos. Essas inovações não apenas aumentam a competitividade do setor, mas também atendem às novas demandas dos consumidores por produtos mais saudáveis, sustentáveis e tecnologicamente rastreáveis.

Com relação a sustentabilidade empresas e pesquisas estão cada vez mais voltadas em desenvolver materiais de embalagem mais sustentáveis que podem ser integrados facilmente aos sistemas existentes. Uma das opções em andamento é a eliminação da camada tradicional de alumínio das embalagens cartonadas. Ao eliminar a camada tradicional de alumínio nas embalagens cartonadas assépticas e substituí-la por uma barreira ultrafina à base de polímero, é possível reduzir em até 25% as emissões de CO₂ associadas à embalagem. Essa inovação simplifica a estrutura

do material de três para dois componentes principais, facilitando a reciclagem sem comprometer a proteção, a qualidade, o valor nutricional e o prazo de validade dos produtos. Além disso, a nova tecnologia permite que os clientes utilizem as mesmas máquinas já em uso para o material de embalagem padrão, requerendo menor investimento e possibilitando trocas rápidas, sem afetar o desempenho da produção (CRUZ et al., 2024).

Outra alternativa de sustentabilidade na área de embalagens na indústria de laticínios é a substituição de embalagens descartáveis por alternativas reutilizáveis, como as de vidro, um material que pode ser reciclado indefinidamente sem perda de qualidade. Além disso, o reaproveitamento do vidro contribui de forma significativa para a redução do impacto ambiental, diminuindo o consumo de recursos naturais e a emissão de gases associados à produção de novas embalagens (CRUZ et al., 2024).

No campo da inovação, a indústria de leites tem buscado também alternativas emergentes como a aplicação da engenharia genética que tem possibilitado o desenvolvimento de cepas microbianas otimizadas para melhorar a eficiência dos processos fermentativos e aumentar o rendimento de produtos lácteos funcionais. Os laticínios cultivados em células, por sua vez, buscam reproduzir o leite e seus derivados a partir de células mamárias cultivadas em laboratório, oferecendo um caminho inovador para atender à crescente demanda global por alimentos de origem animal com menor impacto ambiental e sem comprometer o valor nutricional. Essas inovações, embora ainda em fase de expansão e regulamentação, sinalizam um futuro em que a biotecnologia e a sustentabilidade estarão no centro da cadeia produtiva láctea.

As inovações na indústria de laticínios também têm se voltado intensamente ao desenvolvimento de produtos que atendam às novas demandas nutricionais e funcionais dos consumidores. Nesse contexto, observa-se o crescimento de produtos enriquecidos com proteínas de alta qualidade, probióticos, vitaminas e minerais, voltados à saúde intestinal, imunidade e bem-estar geral. A fermentação de precisão tem possibilitado a criação de ingredientes bioativos e compostos funcionais específicos. Além disso, há um avanço significativo na formulação de produtos com redução de açúcar, gordura e lactose, atendendo a consumidores com restrições alimentares ou que buscam uma alimentação equilibrada. Tais inovações refletem uma convergência entre ciência, tecnologia e saúde, posicionando os laticínios como protagonistas na oferta de alimentos funcionais e nutricionalmente aprimorados para o mercado moderno.

Ênfase também deve ser dada aos sistemas de automação e análise de dados por inteligência artificial que otimizam o processamento, o controle de qualidade e o consumo energético. Essas tecnologias, em conjunto, apontam para um novo paradigma na indústria láctea, mais inteligente, sustentável e alinhado às demandas de um consumidor cada vez mais consciente.

A robótica tem sido mais recentemente incorporada ao setor de laticínios, onde apresenta diversas aplicações. Um dos exemplos mais bem-sucedidos é o uso de sistemas automatizados de ordenha, considerados uma das principais inovações robóticas na indústria leiteira (SANDEY et al., 2017; PEROV, 2022). Esses sistemas permitem um aumento significativo na frequência de ordenhas e, consequentemente, maior produção de leite (Hogenboom et al., 2019), ao mesmo tempo em que reduzem os custos de mão de obra. Outros benefícios identificados incluem o aumento da produtividade, lucratividade e sustentabilidade geral das fazendas (LYONS et al., 2022). Uma outra aplicação importante da robótica em fazendas leiteiras é o uso de robôs para limpeza de pisos, que contribuem para o bem-estar animal e ajudam a reduzir as emissões de amônia (GERRITS et al., 2023).

A impressão 3D representa uma das principais inovações emergentes na indústria de laticínios, permitindo o desenvolvimento de alimentos com formatos personalizados, controle preciso de composição e novas experiências sensoriais. Esta tecnologia já foi aplicada em mistura de pasta de leite em pó preparada com concentrado proteico de leite (MPC) e isolado proteico do soro (WPI) (LIU et al. 2018) e também em suspensões de caseína e proteína do soro misturadas com gordura láctea (DAFFNER et AL, 2021). Outra aplicação envolveu a gelificação induzida por coalho das proteínas do leite (URIBE-ALVAREZ et al., 2021) e ainda, o desenvolvimento de iogurtes com ingredientes bioativos de alta qualidade e valor funcional (HU et al., 2022).

A Inteligência Artificial tem sido amplamente empregada para avaliar a saúde e o bem-estar das vacas leiteiras, atendendo à necessidade de tecnologias automáticas e de baixo custo para análise comportamental (LIMA et al., 2021). A IA também tem sido usada para detectar fraudes e adulterações (IYMEN et al., 2020), otimizar características sensoriais de produtos (BI et al., 2022) e avaliar a qualidade de queijos durante o processo de maturação com visão computacional (LODDO et al., 2022).

A indústria de laticínios encontra-se em um momento decisivo, impulsionada por transformações tecnológicas e mudanças nas exigências dos consumidores. A incorporação de inovações como a fermentação de precisão, a biotecnologia, os sistemas digitais de monitoramento e rastreabilidade, além do desenvolvimento de produtos nutricionalmente aprimorados, demonstra um avanço significativo rumo a uma produção mais sustentável, eficiente e orientada à saúde. Ao aliar ciência, tecnologia e responsabilidade ambiental, o setor lácteo fortalece sua capacidade de atender a um público cada vez mais consciente e exigente, garantindo competitividade no mercado global e contribuindo para a construção de um futuro alimentar mais seguro e equilibrado.

6.2 Barreiras à adoção de novas tecnologias

A adoção de novas tecnologias na indústria de laticínios enfrenta diversas barreiras que limitam o ritmo da modernização e da inovação no setor

Ainda existem vários desafios para que a indústria aproveite totalmente os benefícios das novas tecnologias. Um dos principais é a falta de infraestrutura digital e conectividade em áreas rurais, o que dificulta o uso de ferramentas automatizadas (ZAMBON et al., 2019; DADI et al., 2021). Outro desafio é o alto custo de implementação, especialmente para pequenas e médias propriedades, gerando desigualdade digital entre grandes e pequenos produtores (BAHN et al., 2021).

Há também a escassez de mão de obra qualificada, exigindo capacitação técnica e investimentos em treinamento. Além disso, privacidade de dados e cibersegurança se tornam preocupações crescentes diante do uso de dispositivos conectados (GOLLER et al., 2021).

Outro desafio relevante é a insegurança regulatória e a falta de padronização de normas para novas tecnologias, o que pode atrasar sua homologação e aceitação no mercado.

Superar essas barreiras exige políticas de incentivo, capacitação profissional, parcerias público-privadas e uma visão estratégica voltada para a inovação sustentável e competitiva na cadeia láctea. Assim, a transição para uma “Indústria 4.0 dos laticínios” dependerá não apenas do avanço tecnológico, mas também de uma transformação estrutural e cultural no setor, capaz de garantir competitividade, sustentabilidade e qualidade ao longo de toda a cadeia produtiva.

6.3 O papel da pesquisa e da universidade

O papel da pesquisa e das universidades no processo de adoção de novas tecnologias na indústria de laticínios é fundamental para promover a inovação, a sustentabilidade e a competitividade do setor. As universidades funcionam como centros de geração e disseminação do conhecimento científico e tecnológico, desenvolvendo estudos aplicados que viabilizam soluções para desafios reais da cadeia produtiva do leite, como o aumento da eficiência produtiva, o controle de qualidade, a redução de impactos ambientais e a agregação de valor aos produtos.

Por meio de programas de pesquisa, extensão e parcerias com a indústria, as instituições acadêmicas contribuem para a transferência de tecnologia, capacitação técnica e formação de profissionais qualificados aptos a lidar com as demandas da chamada Indústria 4.0. Tecnologias emergentes — como sensores inteligentes, Internet das Coisas (IoT), biotecnologia, automação e blockchain — muitas vezes nascem ou são aprimoradas em ambientes universitários, sendo posteriormente testadas e adaptadas para uso industrial.

Além disso, a pesquisa acadêmica oferece embasamento científico para a formulação de políticas públicas e normas técnicas que incentivam a modernização e a sustentabilidade da produção leiteira. Assim, o vínculo entre universidade, centros de pesquisa e setor produtivo é essencial para acelerar a adoção de tecnologias inovadoras, reduzir barreiras de implementação e garantir que o avanço tecnológico ocorra de forma ética, segura e economicamente viável, fortalecendo toda a cadeia do leite.

Referencias

- BAHN, R. A.; YEHYA, A. A. K.; ZURAYK, R. Digitalization for sustainable agri-food systems: potential, status, and risks for the MENA region. *Sustainability*, v. 13, n. 6, p. 1–25, 2021.
- BI, K. et al. Consumer-oriented sensory optimization of yogurt: an artificial intelligence approach. *Food Control*, v. 138, 2022.
- CASTRO, T. G. S. de. Inovação no setor lácteo do estado de Minas Gerais: análise sobre avanços e dificuldades enfrentadas pelas indústrias de laticínios. 2019. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia do Leite e Derivados) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019.
- CRUZ, A. G. da; CAPPATO, L. P.; SILVA, M. A. P. da; LIMA, I. D.; MEIRELES, I. M. de F.; MOURA, R. S.; SILVA, W. R. da; GADELHA, S. C. F. da. Boletim Técnico 05 – Lácteos em evidência. Instituto Federal Goiano, 2024. Disponível em: https://sistemas.ifgoiano.edu.br/sgcursos/uploads/anexos_11/2024-09-17-04-09-41Boletim%20T%C3%A9cnico%2005%20-%20Lacteos%20em%20Evidencia.pdf. Acesso em: 30 out 2026.
- DADI, V. et al. Agri-food 4.0 and innovations: revamping the supply chain operations. *Production Engineering Archives*, v. 27, n. 2, p. 75–89, 2021.
- DAFFNER, K. et al. Characterising the influence of milk fat towards an application for extrusion-based 3D-printing of casein–whey protein suspensions via the pH–temperature-route. *Food Hydrocolloids*, v. 118, 2021.
- FREITAS FILHO, F. L. Gestão da inovação: teoria e prática para implantação. São Paulo: Atlas, 2013.
- GERRITS, B. et al. Simulation model for cooperative robotic dairy farms. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE (WSC), 2023. Anais [...]. [S.I.]: IEEE, 2023. p. 831–842.

GOLLER, M.; CARUSO, C.; HARTEIS, C. Digitalisation in agriculture: knowledge and learning requirements of German dairy farmers. *International Journal for Research in Vocational Education and Training*, v. 8, n. 2, p. 208–223, 2021.

IYMEN, G. et al. Artificial intelligence-based identification of butter variations as a model study for detecting food adulteration. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, v. 66, 2020.

LIMA, L. M. et al. Artificial intelligence in support of welfare monitoring of dairy cattle: a systematic literature review. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCE AND COMPUTATIONAL INTELLIGENCE (CSCI)*, 2021. Proceedings... [S.I.]: IEEE, 2021. p. 1708–1715.

LIU, Y. et al. 3D printed milk protein food simulant: improving the printing performance of milk protein concentration by incorporating whey protein isolate. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, v. 49, p. 116–126, 2018.

LODDO, A. et al. Automatic monitoring cheese ripeness using computer vision and artificial intelligence. *IEEE Access*, v. 10, p. 122612–122626, 2022.

LYONS, N. A. et al. Technology and robotic milking in dairy production. In: *ENCYCLOPEDIA OF DAIRY SCIENCES*. 3. ed. [S.I.]: Academic Press, 2022. p. 823–829.

MANUAL DE OSLO. Diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação. 3. ed. Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), 1997.

PEROV, I. Robotic dairy systems — change in management paradigm. In: *SMART INNOVATION, SYSTEMS AND TECHNOLOGIES*. [S.I.]: Springer, 2022.

SANDEY, K. K. et al. Robotics – an emerging technology in dairy industry. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, v. 6, n. 1, p. 58–62, 2017.

URIBE-ALVAREZ, R. et al. Evaluation of rennet-induced gelation under different conditions as a potential method for 3D food printing of dairy-based high-protein formulations. *Food Hydrocolloids*, v. 114, 2021.

ZAMBON, I. et al. Revolution 4.0: industry vs. agriculture in a future development for SMEs. *Processes*, v. 7, n. 1, p. 1–16, 2019.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo desta obra - *Tecnologias Emergentes na Indústria de Leites Líquidos: Inovação, Qualidade e Sustentabilidade* - buscou-se compreender a profunda transformação pela qual o setor lácteo vem passando nas últimas décadas, impulsionada por avanços científicos, exigências regulatórias mais rigorosas e, sobretudo, por um consumidor cada vez mais atento à saúde, à origem e ao impacto ambiental dos alimentos que consome.

As tecnologias emergentes apresentadas, como a microfiltração, ultrassom, campos elétricos pulsados, nanotecnologia, bioconservantes, IoT, blockchain e automação inteligente — representam uma nova fronteira para a indústria de leites líquidos, possibilitando não apenas ganhos em eficiência e qualidade, mas também contribuindo para a sustentabilidade e rastreabilidade em toda a cadeia produtiva. Tais inovações promovem um equilíbrio entre produtividade e responsabilidade socioambiental, fortalecendo a confiança do consumidor e garantindo alimentos mais seguros, nutritivos e com maior vida de prateleira.

Entretanto, o sucesso na adoção dessas tecnologias depende de fatores que vão além do domínio técnico. A integração entre universidades, centros de pesquisa, indústria e órgãos reguladores é imprescindível para transformar o conhecimento científico em inovação aplicada. Igualmente importante é o investimento contínuo em capacitação profissional, infraestrutura e políticas públicas que incentivem a modernização e a sustentabilidade do setor.

Assim, conclui-se que o futuro da indústria de leites líquidos será determinado pela capacidade de unir ciência, tecnologia e compromisso social. A inovação não deve ser vista apenas como uma ferramenta de competitividade, mas como um caminho para garantir a segurança alimentar, reduzir impactos ambientais e promover uma cadeia láctea mais ética, resiliente e sustentável. Este livro, portanto, propõe-se a ser não apenas uma referência técnica, mas também um convite à reflexão sobre o papel transformador das tecnologias emergentes na construção de um novo paradigma para o setor lácteo.

TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA DE LEITES LÍQUIDOS

INOVAÇÃO, QUALIDADE E SUSTENTABILIDADE



- 🌐 www.atenaeditora.com.br
- ✉ contato@atenaeditora.com.br
- 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- facebook www.facebook.com/atenaeditora.com.br

TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA DE LEITES LÍQUIDOS

INOVAÇÃO, QUALIDADE E SUSTENTABILIDADE



- 🌐 www.atenaeditora.com.br
- ✉️ contato@atenaeditora.com.br
- 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- ⬇️ www.facebook.com/atenaeditora.com.br