

PLASMA FRIO ATMOSFÉRICO COMO TECNOLOGIA ESTRATÉGICA PARA SISTEMAS ALIMENTARES RESILIENTES: AVANÇOS E PERSPECTIVAS NA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS

Viviane Lopes Pereira^{1*}, Danielly Aparecida de Souza¹, Isabela Soares Magalhães¹, Bruno Ricardo de Castro Leite Júnior¹

¹Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil

*viviane.pereira@ufv.br

Resumo: A busca por sistemas alimentares mais resilientes tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de conciliar segurança e sustentabilidade. Esta revisão narrativa discutiu o potencial do plasma frio atmosférico na indústria de laticínios. Os estudos evidenciaram sua eficácia na inativação microbiana, preservação da qualidade dos alimentos e modificação funcional de proteínas. Conclui-se que o plasma frio constitui uma tecnologia estratégica para sistemas alimentares mais resilientes.

Palavras-chave: Alimentos funcionais; Processamento não térmico; Proteínas lácteas; Segurança microbiológica; Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

Os sistemas alimentares globais têm enfrentado desafios decorrentes das mudanças climáticas, crescimento populacional, instabilidades geopolíticas, alterações nos padrões de consumo e demandas crescentes por alimentos mais seguros, sustentáveis e nutricionalmente adequados. As sucessivas disrupções observadas nas últimas décadas, incluindo crises sanitárias globais, instabilidades geopolíticas e eventos climáticos extremos, evidenciaram a vulnerabilidade das cadeias produtivas de alimentos e reforçaram a necessidade de estratégias capazes de aumentar a resiliência dos sistemas de produção, processamento e distribuição. Nesse contexto, o conceito de resiliência alimentar tem sido associado à capacidade dos sistemas em manter sua funcionalidade, adaptar-se a perturbações e recuperar-se rapidamente diante de cenários adversos, assegurando simultaneamente a disponibilidade de alimentos seguros e de qualidade (Galanakis 2024).

No setor de laticínios, esses desafios tornam-se ainda mais relevantes devido à elevada perecibilidade do leite e de seus derivados, bem como à crescente pressão por processos produtivos com menor impacto ambiental. Métodos convencionais de processamento, especialmente os tratamentos térmicos intensos, desempenham papel fundamental na garantia da segurança microbiológica. Entretanto, podem promover alterações indesejáveis nas propriedades sensoriais, nutricionais e tecnológicas dos produtos. Além disso, o elevado consumo energético associado a essas operações tem

impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis e eficientes, alinhadas aos princípios da economia circular e da inovação responsável (Bhat et al. 2022).

Diante desse cenário, as tecnologias emergentes de processamento não térmico têm recebido atenção crescente da comunidade científica e da indústria de alimentos. Entre elas, o plasma frio atmosférico (PFA) destaca-se como uma abordagem inovadora capaz de promover a inativação microbiana e a modificação controlada de componentes alimentares sem aquecimento significativo da matriz. O PFA consiste em um gás parcialmente ionizado contendo elétrons, íons, espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (ERON), radiação ultravioleta e moléculas excitadas, cujas interações podem resultar na redução da carga microbiana, degradação de biofilmes e alterações estruturais em biomoléculas alimentares. Estudos recentes demonstram que essa tecnologia apresenta potencial para preservar atributos de qualidade dos alimentos, reduzir o uso de agentes químicos e minimizar perdas nutricionais, configurando-se como uma alternativa promissora aos métodos tradicionais de conservação (Kaur et al. 2024).

Na indústria de laticínios, as potenciais aplicações do PFA abrangem desde a descontaminação microbiológica do leite e sanitização de superfícies até a modificação das propriedades funcionais de proteínas e o desenvolvimento de ingredientes com desempenho tecnológico aprimorado. As espécies reativas geradas pelo PFA podem induzir mudanças estruturais controladas em proteínas lácteas,



influenciando propriedades como solubilidade, capacidade de formação de géis, atividade antioxidante e comportamento fermentativo. Paralelamente, a possibilidade de aumentar a vida útil dos produtos e reduzir a intensidade dos tratamentos térmicos reforça o papel dessa tecnologia na construção de sistemas alimentares mais resilientes, sustentáveis e adaptados às demandas contemporâneas do setor agroindustrial (Grządka et al. 2026; Sharath Kumar et al. 2024).

Diante da crescente necessidade de tecnologias capazes de conciliar segurança alimentar, sustentabilidade e manutenção da qualidade dos alimentos, torna-se essencial compreender o potencial do PFA no contexto dos sistemas alimentares resilientes. Assim, esta revisão de literatura teve como objetivo discutir as principais aplicações emergentes do PFA na indústria de laticínios, abordando seus mecanismos de ação, efeitos sobre a qualidade e funcionalidade dos produtos lácteos, contribuições para a resiliência dos sistemas alimentares e os desafios associados à sua implementação em escala industrial.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo consistiu em uma revisão narrativa crítica da literatura, desenvolvida com o objetivo de discutir o potencial do plasma frio atmosférico (PFA) no fortalecimento de sistemas alimentares resilientes aplicados à indústria de laticínios. A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Scopus, Web of Science e ScienceDirect, contemplando artigos científicos publicados entre 2020 e 2026. Foram priorizados artigos de revisão recentes e estudos experimentais publicados em periódicos científicos internacionais indexados, abordando os mecanismos de ação do PFA, suas aplicações em leite e produtos lácteos, os efeitos sobre a segurança microbiológica, propriedades físico-químicas e funcionais, sustentabilidade e perspectivas para sua aplicação industrial. As informações obtidas foram analisadas de forma crítica e integrativa, permitindo identificar avanços científicos, limitações atuais e oportunidades futuras para a incorporação da tecnologia na cadeia produtiva do leite.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura publicada entre 2020 e 2026 demonstra que o PFA tem evoluído de uma tecnologia inicialmente direcionada à descontaminação microbiológica para uma ferramenta multifuncional com potencial para contribuir com a construção de sistemas alimentares

mais resilientes. No setor lácteo, os estudos concentram-se principalmente em cinco eixos: segurança microbiológica, sustentabilidade dos processos, modificação de proteínas, melhoria das propriedades tecnológicas de produtos fermentados e desafios associados à implementação industrial (Tabela 1).

Tabela 1. Contribuições do plasma frio atmosférico para a resiliência da cadeia láctea.

Aplicação	Achados-chave	Impacto na resiliência	Referência
Segurança microbiológica	Inativação de patógenos	Maior vida útil	(Coutinho et al. 2018)
Preservação não térmica	Retenção de nutrientes	Alimentos minimamente processados	(Keewan et al. 2026)
Proteínas lácteas	Funcionalidade aprimorada	Ingredientes inovadores	(Sharma and Singh 2020)
Produtos fermentados	Melhoria da textura e estabilidade	Maior valor agregado	(Nikmaram and Keener 2022)
Sustentabilidade	Menor uso de insumos e energia	Processos mais eficientes	(Sasikumar et al. 2025)
Escalonamento industrial	Necessidade de padronização	Maior adaptabilidade do setor	(da Cruz et al. 2025)

No âmbito da segurança microbiológica, os estudos revisados evidenciam elevada eficiência do PFA na inativação de microrganismos deteriorantes e patogênicos relevantes para a indústria de laticínios, incluindo *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp. e *Staphylococcus aureus*. As ERONs geradas durante o processo promovem danos oxidativos à membrana celular, proteínas e material genético dos microrganismos, reduzindo sua viabilidade sem a necessidade de tratamentos térmicos intensos (Coutinho et al. 2018). Além disso, pesquisas recentes demonstram que o PFA pode preservar, em maior extensão, vitaminas, compostos bioativos e características sensoriais do leite quando comparado a processos convencionais de esterilização (Keewan et al. 2026). Esses resultados reforçam o potencial da tecnologia como alternativa para a obtenção de alimentos seguros e minimamente processados.

Outro aspecto amplamente discutido na literatura refere-se à sustentabilidade do plasma frio. Diferentemente dos tratamentos térmicos tradicionais, essa tecnologia opera em temperaturas próximas à ambiente e pode reduzir o consumo energético, o tempo de processamento e a utilização de conservantes químicos. Além disso, a extensão da vida útil dos produtos lácteos contribui para a redução das perdas de alimentos ao longo da cadeia produtiva. Esses atributos estão diretamente relacionados ao conceito de resiliência dos sistemas alimentares, uma vez que favorecem a manutenção da disponibilidade de alimentos seguros mesmo diante de cenários de instabilidade econômica, climática ou logística. Embora análises de ciclo de vida ainda sejam limitadas, as evidências disponíveis indicam que o plasma frio pode representar uma estratégia promissora para tornar a indústria de laticínios mais eficiente e ambientalmente responsável (Sasikumar et al. 2025).

O PFA pode ser empregado para promover modificações estruturais em proteínas lácteas. A interação das EROs com resíduos aminoacídicos específicos pode promover alterações controladas na estrutura secundária e terciária das proteínas, modificando propriedades funcionais importantes. Estudos relatam mudanças em interações hidrofóbicas, exposição de grupos funcionais, redução da fluorescência intrínseca e reorganização de estruturas proteicas, resultando em alterações na capacidade emulsificante, formação de géis e atividade antioxidante (Rout et al. 2025). Essas evidências sugerem que o PFA pode ser empregado para a conservação e o desenvolvimento de ingredientes lácteos com funcionalidades tecnológicas aprimoradas.

No contexto dos produtos fermentados, observa-se um crescente interesse na investigação dos efeitos das modificações proteicas induzidas pelo PFA sobre a fermentação e a qualidade final dos iogurtes (Figura 1). Estudos indicam que alterações conformacionais moderadas nas proteínas do leite podem aumentar a acessibilidade às enzimas proteolíticas produzidas pelas culturas starter, influenciando a cinética de acidificação e a formação da rede de gel. Consequentemente, têm sido relatadas melhorias na retenção de água, viscosidade aparente, estabilidade estrutural e atividade antioxidante dos produtos fermentados (Hanan et al. 2026). Essas descobertas representam uma mudança de paradigma, na qual o PFA torna-se uma ferramenta para a obtenção de alimentos funcionais e com maior valor agregado.

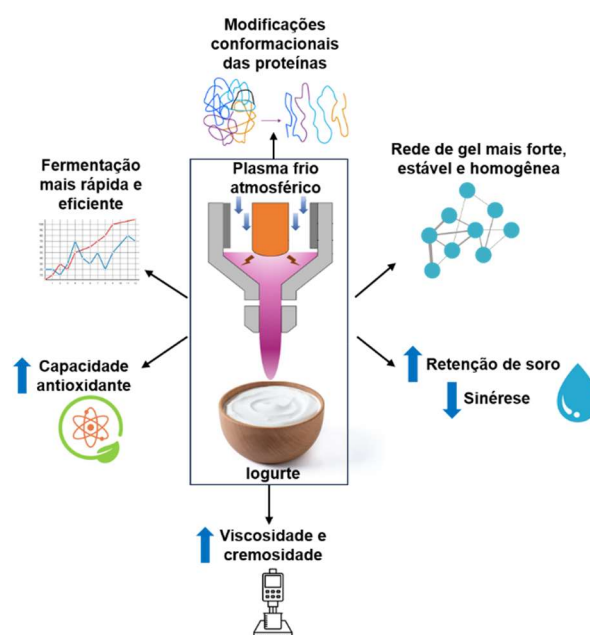


Figura 1. Plasma frio atmosférico como ferramenta para qualidade e funcionalidade de derivados lácteos.

Apesar dos avanços científicos observados, a transposição do conhecimento para a escala industrial ainda representa um desafio importante. A ausência de protocolos padronizados, a variabilidade dos sistemas geradores de plasma, as diferenças nas matrizes alimentares e as incertezas regulatórias limitam a adoção comercial da tecnologia. Além disso, a necessidade de compreender melhor os mecanismos envolvidos na interação entre plasma e componentes alimentares reforça a importância de estudos que integrem aspectos microbiológicos, físico-químicos, toxicológicos e econômicos (da Cruz et al. 2025). Dessa forma, o estabelecimento de parâmetros operacionais seguros e reprodutíveis constitui uma etapa fundamental para consolidar o PFA como uma tecnologia disruptiva aplicável à indústria de laticínios em larga escala.

PERSPECTIVAS FUTURAS

As evidências científicas analisadas indicam que o futuro do PFA na indústria de laticínios transcende sua aplicação como tecnologia de descontaminação, apontando para sua incorporação em modelos produtivos inteligentes e sustentáveis. A integração do PFA aos conceitos da Indústria 4.0, por meio do uso de sensores, inteligência artificial, aprendizado de máquina e sistemas automatizados de monitoramento em tempo real, poderá permitir o controle preciso dos parâmetros operacionais, aumentando a eficiência, a reprodutibilidade e a segurança dos processos (Li et al. 2025).



Paralelamente, a crescente compreensão dos mecanismos envolvidos na interação entre espécies reativas e biomoléculas alimentares abre perspectivas para o desenvolvimento de alimentos funcionais de nova geração, nos quais modificações estruturais controladas em proteínas lácteas sejam exploradas para potencializar propriedades tecnológicas, antioxidantes e nutricionais. Além disso, diante das pressões impostas pelas mudanças climáticas, pelo aumento da demanda por alimentos e pela necessidade de redução das perdas ao longo da cadeia produtiva, tecnologias capazes de prolongar a vida útil dos produtos, reduzir o consumo energético e minimizar o uso de aditivos químicos assumem papel estratégico na construção de sistemas alimentares mais resilientes. Nesse contexto, pesquisas futuras devem priorizar estudos de escalonamento industrial, avaliações técnico-econômicas, análises de ciclo de vida e o estabelecimento de marcos regulatórios harmonizados, visando consolidar o PFA como uma solução tecnológica segura, sustentável e adaptada aos desafios emergentes da produção de alimentos no século XXI.

CONCLUSÃO

O PFA é uma tecnologia não térmica promissora para a transformação sustentável da indústria de laticínios. Seus efeitos combinados sobre a segurança microbiológica, preservação da qualidade, modificação funcional de proteínas e aprimoramento de produtos fermentados demonstram que sua aplicação vai além da simples substituição de métodos convencionais de processamento. Ao contribuir para a redução de perdas, otimização do uso de recursos e desenvolvimento de alimentos com maior valor agregado, o PFA emerge como uma tecnologia estratégica para fortalecer a resiliência dos sistemas alimentares frente aos desafios contemporâneos, incluindo as mudanças climáticas, a crescente demanda por alimentos seguros e saudáveis e a necessidade de processos mais sustentáveis. Embora desafios relacionados à padronização, regulamentação e escalonamento industrial ainda precisem ser superados, os avanços observados nos últimos anos indicam que o PFA possui potencial para redefinir paradigmas no processamento de alimentos, consolidando-se como uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de cadeias produtivas mais inovadoras, adaptáveis e alinhadas às demandas da sociedade em constante evolução.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Código Financeiro 001), FINEP (23.01.0632.00) e CNPq-FAPEMIG (APQ-00785-23; APQ-06600-24; RED-00157-23).

REFERÊNCIAS

- Bhat, R., Di Pasquale, J., Bánkuti, F.I., Siqueira, T.T. da S., Shine, P., Murphy, M.D.: Global Dairy Sector: Trends, Prospects, and Challenges. *Sustainability*. 14, 4193 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14074193>
- Coutinho, N.M., Silveira, M.R., Rocha, R.S., Moraes, J., Ferreira, M.V.S., Pimentel, T.C., Freitas, M.Q., Silva, M.C., Raices, R.S.L., Ranadheera, C.S., Borges, F.O., Mathias, S.P., Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S., Cruz, A.G.: Cold plasma processing of milk and dairy products. *Trends Food Sci. Technol.* 74, 56–68 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.008>
- da Cruz, J., Carvalho de Pina, P.C., Cubas, A.L.V., de Andrade, C.J., Monteiro, A.R.: Current approaches on cold plasma applied to dairy industry: Advantages and drawbacks. *Food and Humanity*. 5, 100661 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100661>
- Galanakis, C.M.: The Future of Food. *Foods*. 13, 506 (2024). <https://doi.org/10.3390/foods13040506>
- Grządka, E., Krajewska, M., Budzyńska, B., Kurach, Ł., Terebun, P., Zarzeczny, D., Kwiatkowski, M., Pawlat, J., Gołębiowska, K., Starek-Wójcicka, A.: Cold plasma treatment as a way to sanitize bovine milk while maintaining full nutritional value, stability, toxicological and microbiological safety. *Sci. Rep.* 16, 9482 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-40450-5>
- Hanan, E., Srivastava, S., Dar, A.H., Dash, K.K., Pandey, V.K., Shams, R., Kumar, S., Fayaz, U., Shaikh, A.M., Béla, K.: Exploring the impact of atmospheric cold plasma technology on plant-based milk analogues and their proteins: A review. *Food Chem.* X. 34, 103519 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2026.103519>
- Kaur, S., Kumar, Y., Singh, V., Kaur, J., Panesar, P.S.: Cold plasma technology: Reshaping food preservation and safety. *Food Control*. 163, 110537 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110537>
- Keewan, M., Mazumder, J., Krishnamoorthy, R., Loke Show, P., Banat, F.: Dielectric barrier discharge cold plasma processing of camel milk: A non-thermal route for nutrient and bioactive retention. *LWT*. 248, 119363 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2026.119363>
- Li, W., Wu, H., Chu, X., Xie, Y., Deng, S., Bagherifard, S.: Outlook of Industry 4.0 Integrated Technologies in Thermal Spray Processes and Applications. *Journal of Thermal Spray Technology*. 34, 3022–3051 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11666-025-02096-z>



Nikmaram, N., Keener, K.M.: The effects of cold plasma technology on physical, nutritional, and sensory properties of milk and milk products. *LWT*. 154, 112729 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112729>

Rout, S., Panda, P.K., Dash, P., Srivastav, P.P., Hsieh, C.-T.: Cold Plasma-Induced Modulation of Protein and Lipid Macromolecules: A Review. *Int. J. Mol. Sci.* 26, 1564 (2025).
<https://doi.org/10.3390/ijms26041564>

Sasikumar, R., T., S.K., Mangang, I.B., Kaviarasu, G., Kaushik, R., Mansingh, P., Tomer, V., Jaiswal, A.K.: A comprehensive review on cold plasma applications in the food industry. *Sustainable Food Technology*. 3, 1251–1274 (2025).
<https://doi.org/10.1039/D5FB00148J>

Sharath Kumar, N., Dar, A.H., Dash, K.K., Kaur, B., Pandey, V.K., Singh, A., Fayaz, U., Shams, R., Mukarram, S.A., Kovács, B.: Recent advances in cold plasma technology for modifications of proteins: A comprehensive review. *J. Agric. Food Res.* 16, 101177 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101177>

Sharma, S., Singh, R. k.: Cold plasma treatment of dairy proteins in relation to functionality enhancement. *Trends Food Sci. Technol.* 102, 30–36 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.013>