

# INATIVAÇÃO MICROBIANA EM ALIMENTOS A PARTIR DE TECNOLOGIAS TÉRMICAS E NÃO TÉRMICAS: AVANÇOS, APLICAÇÕES E DESAFIOS

Microbial inactivation in food using thermal and non-thermal technologies: advances, applications, and challenges

Ana Paula Antunes Maciel Dall Agnol<sup>1</sup>, Janine Pagnussat<sup>1</sup>, Heloyse Bragagnolo<sup>1</sup>, Júlia Barbacovi<sup>1</sup>, Heloísa Menin<sup>1</sup>, Caroline Capra de Oliveira<sup>1</sup>, Nicole Deotti Poltronieri<sup>1</sup>, Eloisa Belusso<sup>1</sup>, Ana Lauren Foza<sup>1</sup>, Sabrina Duarte Camargo<sup>2</sup> e Jamile Zeni<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Discentes do Curso de Nutrição, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Brasil.

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões, Brasil.

\*jamilenzi@uricer.edu.br

Data do recebimento: 18/01/2025 - Data do aceite: 11/02/2025

**RESUMO:** O presente estudo analisa a inativação microbiana em alimentos por meio de tecnologias térmicas e não térmicas, destacando avanços, aplicações e desafios. Métodos térmicos tradicionais, como pasteurização e esterilização, são amplamente utilizados, mas podem comprometer a qualidade nutricional e sensorial dos alimentos devido à exposição a altas temperaturas. Tecnologias térmicas emergentes, como micro-ondas, radiofrequência, aquecimento ôhmico e vapor superaquecido, oferecem aquecimento mais eficiente, reduzindo esses impactos negativos. Paralelamente, métodos não térmicos, como campos elétricos pulsados, alta pressão hidrostática, luz ultravioleta, ultrassom, plasma frio e irradiação, preservam melhor os atributos dos alimentos enquanto garantem segurança microbiológica. O estudo discute a eficácia, aplicações e limitações dessas abordagens, bem como a necessidade de pesquisas adicionais para sua ampliação na indústria. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão bibliográfica em bases científicas reconhecidas, selecionando estudos com metodologias robustas. Os resultados destacam que a adoção dessas tecnologias depende de fatores como custos, viabilidade

industrial e aceitação do consumidor. O estudo conclui que a combinação de diferentes métodos pode ser a solução ideal para equilibrar segurança alimentar, qualidade nutricional e sustentabilidade no processamento de alimentos.

**Palavras-chave:** Controle microbiano, métodos físicos, segurança alimentar, conservação de alimentos, inovações tecnológicas.

**ABSTRACT:** This study analyzes microbial inactivation in food using thermal and non-thermal technologies, highlighting advances, applications, and challenges. Traditional thermal methods, such as pasteurization and sterilization, are widely used but may threaten the nutritional and sensory quality of the food due to exposure to high temperatures. Emerging thermal technologies such as microwave, radiofrequency, ohmic heating and superheated steam offer more efficient heating, reducing these negative impacts. Meanwhile, non-thermal methods, including pulsed electric fields, high hydrostatic pressure, ultraviolet light, ultrasound, cold plasma, and irradiation, better preserve food attributes while ensuring microbiological safety. The study discusses the effectiveness, applications, and limitations of these approaches, as well as the need for further research to expand their use in the industry. The research was conducted through a literature review on well-established scientific databases, selecting studies with robust methodologies. The results highlight that the adoption of these technologies depends on factors such as costs, industrial feasibility, and consumer acceptance. The study concludes that combining different methods may be the ideal solution to balance food safety, nutritional quality, and sustainability in food processing.

**Keywords:** Microbial control. Physical methods. Food safety. Food preservation. Technological innovations.

## Introdução

O processamento e a conservação de alimentos prolongam sua vida útil ao inativar o crescimento de microrganismos, ao mesmo tempo em que preservam sua qualidade para o consumo humano. Na indústria alimentícia, métodos tradicionais de processamento térmico, como pasteurização, esterilização a altas temperaturas, secagem e evaporação, são amplamente utilizados para garantir a segurança microbiológica. No entanto, essas abordagens expõem os alimentos a altas temperaturas, o que pode levar à perda de nu-

trientes, alterações na textura, modificação do sabor e mudanças na cor (Bigi *et al.*, 2023).

Os métodos tradicionais de processamento térmico submetem os alimentos a altas temperaturas, provocando alterações significativas em suas propriedades e impactando sua qualidade. Uma das principais limitações desse tipo de processamento é a formação de compostos químicos potencialmente tóxicos, alguns com ação cancerígena e prejudiciais à saúde humana. O tipo e a concentração desses compostos variam conforme o método térmico utilizado. Além disso, a exposição ao calor pode degradar componentes nutricionais sensíveis, como vitaminas e polifenóis, comprometendo o valor nutricional e as ca-

racterísticas sensoriais dos alimentos (Safwa *et al.*, 2024).

Com a crescente demanda por alimentos mais seguros e de alta qualidade nutricional e sensorial, tecnologias de processamento não térmico têm ganhado destaque na indústria alimentícia. Essas abordagens minimizam a degradação de nutrientes e sabores, preservando a frescura de alimentos como vegetais e laticínios. Além disso, são altamente eficazes na inativação de microrganismos e enzimas, protegendo os alimentos contra contaminações ao alterar estruturas celulares e danificar o material genético dos microrganismos (Lisboa *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a busca por alternativas que garantam a segurança microbiológica dos alimentos, sem comprometer sua qualidade, tem impulsionado o desenvolvimento e a aplicação de novas tecnologias de processamento. Tecnologias térmicas emergentes, como micro-ondas, radiofrequência e aquecimento ôhmico, oferecem vantagens como um aquecimento mais rápido e uniforme, reduzindo os impactos negativos associados ao calor prolongado (Dhar; Chakraborty, 2024; Teixeira, 2019). Paralelamente, métodos não térmicos, como campos elétricos pulsados, alta pressão hidrostática, luz ultravioleta, ultrassom, plasma frio e irradiação, surgem como soluções inovadoras por permitirem a inativação microbiana sem necessidade de altas temperaturas, preservando melhor os atributos sensoriais e nutricionais dos alimentos (Chiozzi; Agriopoulou; Varzakas, 2022; Lisboa *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025). A compreensão detalhada dos princípios, aplicações e limitações dessas tecnologias é essencial para ampliar sua adoção na indústria e promover processos mais eficientes e sustentáveis (Moatsou, 2024; Torrents-Masoliver *et al.*, 2024).

Observa-se um crescimento significativo de estudos sobre tecnologias não térmicas na

indústria de processamento de alimentos (Jan *et al.*, 2017), os quais enfatizam a importância de uma compreensão detalhada sobre o projeto dos sistemas, os parâmetros operacionais e os efeitos dessas tecnologias na qualidade e segurança dos alimentos processados (Moatsou, 2024; Torrents-Masoliver *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025).

Face ao exposto, este estudo tem como objetivo apresentar informações que auxiliem na compreensão das aplicações práticas e dos impactos das tecnologias térmicas e não térmicas no processamento de alimentos. Isso inclui métodos como pasteurização, esterilização, micro-ondas, radiofrequência, aquecimento ôhmico, campos elétricos pulsados, alta pressão hidrostática, luz ultravioleta, ultrassom, plasma frio e irradiação, destacando seus princípios, aplicações, limitações e contribuição para a qualidade e segurança alimentar.

## Material e Métodos

A pesquisa bibliográfica foi conduzida entre agosto e setembro de 2024, utilizando os termos “pasteurização”, “esterilização”, “micro-ondas”, “radiofrequência”, “vapor superaquecido”, “aquecimento ôhmico”, “campos elétricos pulsados”, “alta pressão hidrostática”, “luz ultravioleta”, “ultrassom”, “plasma frio e irradiação”, em português e inglês. A busca foi realizada em bases de dados científicas amplamente reconhecidas, como Google Acadêmico, Scielo, Science Direct, ACS Publications, Royal Society of Chemistry, Springer Nature, Wiley Online Library e Taylor & Francis, além de fontes institucionais, como a ANVISA, o Ministério da Saúde e a Vigilância Sanitária. Apenas artigos que abordassem diretamente a eficácia e a segurança dessas tecnologias foram considerados, enquanto aqueles que

mencionavam os métodos sem detalhar seus mecanismos de ação ou aplicações foram excluídos. Além disso, foram selecionadas pesquisas com metodologias robustas, como estudos experimentais e revisões sistemáticas que apresentassem dados quantitativos sobre a eficácia dos agentes antimicrobianos, garantindo um conjunto de literatura científica relevante e acessível.

## Resultados e Discussão

As técnicas tradicionais de pasteurização e esterilização são amplamente utilizadas por garantirem segurança microbiológica e maior vida útil dos alimentos. No entanto, devido às limitações associadas ao uso prolongado de altas temperaturas, como degradação nutricional e alterações sensoriais, tecnologias térmicas como micro-ondas (MW), radiofrequência (RF), vapor superaquecido (SS) e aquecimento ôhmico (OH) vêm sendo cada vez mais exploradas. Essas abordagens oferecem processos mais rápidos e eficientes, reduzindo os impactos negativos sobre a qualidade dos alimentos. Paralelamente, métodos não térmicos, como campos elétricos pulsados (PEF), alta pressão hidrostática (HPP), luz ultravioleta (UV), ultrassom (US), plasma frio e irradiação, ganham destaque por preservarem ainda mais as características nutricionais e sensoriais dos produtos. A seguir, serão apresentadas as principais características, aplicações e limitações dessas tecnologias.

### Tecnologias térmicas

As técnicas de processamento térmico, como pasteurização e esterilização, são amplamente utilizadas na indústria alimentícia para inativar microrganismos patogênicos e deteriorantes, garantindo a segurança e a qualidade dos alimentos durante o armaze-

namento. A eficácia desse processo é maior em alimentos ácidos, pois microrganismos tendem a ser mais resistentes em ambientes neutros ou alcalinos, o que torna esses métodos particularmente aplicáveis a produtos fermentados e acidificados (Chiozzi *et al.*, 2022).

Nos alimentos acidificados, a eficiência do tratamento térmico depende de uma distribuição uniforme da temperatura, sendo que uma temperatura inicial mais elevada reduz o tempo necessário para a inativação microbiana, minimizando alterações sensoriais e nutricionais (Ling *et al.*, 2015). No entanto, a pasteurização e a esterilização apresentam desafios, como a possibilidade de desenvolvimento de resistência ao calor por bactérias expostas a condições subletais. A inativação microbiana também é influenciada por fatores como a carga inicial de microrganismos, a resistência térmica das espécies mais persistentes, o tamanho do produto e a taxa de penetração do calor. Assim, um controle rigoroso de temperatura e tempo é essencial para garantir a segurança alimentar e manter a qualidade do produto (Cebrián *et al.*, 2017).

Apesar da eficácia desses métodos, o calor pode provocar a desnaturação de proteínas e a desativação de enzimas essenciais à sobrevivência microbiana, comprometendo suas funções biológicas e levando à morte celular (Guo *et al.*, 2022). Além disso, processos térmicos prolongados, como esterilização por autoclave e ultra-alta temperatura (UHT), podem resultar em perda de valor nutricional, alterações de cor, redução do sabor e formação de subprodutos indesejáveis (Lee; Lee; Ryu, 2020).

Para minimizar esses impactos, tecnologias térmicas avançadas vêm sendo desenvolvidas, como micro-ondas (MW), radiofrequência (RF) e aquecimento ôhmico (OH), que proporcionam um aquecimento mais rápido e uniforme, reduzindo o tempo

de exposição ao calor e preservando melhor as características dos alimentos (Teixeira, 2019). Outra alternativa promissora é o tratamento com vapor superaquecido (SS), que utiliza calor sob alta pressão e temperaturas elevadas para inativar microrganismos com maior eficiência energética e menor degradação da qualidade das matérias-primas (Huang *et al.*, 2021).

Diante dessas inovações, o uso de tecnologias térmicas emergentes vem ganhando espaço na indústria alimentícia, oferecendo alternativas mais eficazes e menos prejudiciais à qualidade dos alimentos. A seguir, são apresentadas as principais características e aplicações do aquecimento por micro-ondas, radiofrequência, vapor superaquecido e aquecimento ôhmico, destacando seus benefícios no processamento de alimentos.

### Micro-ondas

O aquecimento por micro-ondas (MW) é uma tecnologia inovadora aplicada à inativação microbiana em alimentos, operando na faixa de 300 MHz a 300 GHz, com predominância de 2.450 MHz. Esse método baseia-se na interação das micro-ondas com moléculas de água presentes nos alimentos, gerando calor. Frequências específicas, como 915 MHz e 2.450 MHz, são regulamentadas pela *Federal Communications Commission* (FCC) para aplicações alimentícias, assegurando segurança e eficiência (Zhang *et al.*, 2022).

A técnica utiliza campos elétricos alternados para gerar calor, promovendo a inativação eficaz de microrganismos. Estudos indicam que o MW pode atingir temperaturas mais altas nos microrganismos em comparação ao alimento ao redor, devido à alta eficiência na conversão de energia elétrica em calor. Embora existam indícios de possíveis efeitos não térmicos, sua eficácia é atribuída principalmente aos efeitos térmicos (Arshad P *et al.*, 2024).

Aplicações práticas incluem a pasteurização de alimentos prontos, como carnes e vegetais. Em carne bovina cozida, por exemplo, observou-se uma redução significativa de *Clostridium sporogenes* após 70 dias de armazenamento a 10 °C (Hague *et al.*, 1997). Em comparação com métodos como banho-maria e radiofrequência, o MW demonstrou maior eficiência, aumentando a vida útil e melhorando o sabor dos alimentos devido à reação de *Maillard* (Wang *et al.*, 2019).

A eficácia do MW depende de fatores como frequência, potência e tempo de processamento. Frequências mais baixas, como 915 MHz, oferecem maior profundidade de penetração, enquanto frequências mais altas, como 2.450 MHz, limitam esse efeito. Potências elevadas intensificam os campos elétricos, acelerando o aquecimento e a inativação microbiana. Pesquisas apontam que o aquecimento contínuo por MW é eficaz contra microrganismos como *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* e *Salmonella Typhimurium*, com letalidade atribuída aos efeitos térmicos (Dhar; Chakraborty, 2024). Fatores adicionais como propriedades dielétricas dos alimentos influenciam o desempenho do MW. Alimentos com alta umidade convertem energia em calor de forma mais eficiente, embora condutividade iônica em temperaturas elevadas possa afetar a relação linear esperada (Pattnaik; Mandliya; Mishra, 2024). O formato do alimento também é relevante: objetos retangulares concentram mais calor nos cantos, enquanto formatos esféricos promovem aquecimento uniforme (Zhang; Su; Zhang, 2018).

Sistemas comerciais de MW já estão disponíveis, como os desenvolvidos pela Nanjing Yongqing Food Development, com capacidade de processamento entre 100 e 1.000 kg/h. Contudo, a adoção em larga escala enfrenta desafios, como a necessidade de estudos detalhados sobre consumo energético e custos operacionais (Brinley *et al.*, 2008).

A Tabela I apresenta estudos que investigaram a inativação de micro-organismos em alimentos utilizando aquecimento por micro-ondas, incluindo os parâmetros de controle.

Os dados apresentados na Tabela I demonstram a eficácia do aquecimento por micro-ondas (MW) na inativação de diferentes micro-organismos em alimentos, destacando a influência de parâmetros como frequência, potência e tempo de exposição no processo de descontaminação. Observa-se que a frequência predominante utilizada nos estudos é 2.450 MHz, regulamentada para aplicações alimentícias devido à sua capacidade de promover o aquecimento rápido e uniforme. No entanto, variações na potência (entre 700 W e 1.000 W) e no tempo de exposição (50 a 120 segundos) indicam a necessidade de ajuste desses fatores para otimizar a inativação conforme a resistência térmica de cada micro-organismo.

Micro-organismos formadores de esporos, como *Clostridium sporogenes* e *Bacillus cereus*, requerem tempos de exposição mais longos ( $\geq 100$  segundos) e potências mais altas para uma inativação eficiente. Já bactérias não esporuladas, como *E. coli*, *L. monocytogenes* e *S. Typhimurium*, são eliminadas em tempos relativamente curtos (60 a 90 segundos) e menores potências, evidenciando a menor resistência térmica dessas espécies. Fungos e leveduras, como *Aspergillus niger* e *Saccharomyces cerevisiae*, também foram efetivamente inativados pelo MW, mas sua resposta ao tratamento depende da matriz alimentar, uma vez que a condutividade elétrica e as propriedades dielétricas do alimento influenciam a distribuição de calor. Além disso, a estrutura celular dos micro-organismos pode influenciar sua resistência ao aquecimento, com esporos mais resistentes que células vegetativas.

**Tabela I** – Estudos sobre a inativação microbiana em alimentos utilizando aquecimento por micro-ondas.

Micro-organismo	Parâmetros de Controle	Referência
<i>E. coli</i>	Frequência: 2,450 MHz; Potência: 800 W; Tempo de exposição: 60 segundos	Arshad <i>et al.</i> (2024)
<i>L. monocytogenes</i>	Frequência: 2,450 MHz; Potência: 900 W; Tempo de exposição: 90 segundos	Dhar & Chakraborty, (2024)
<i>S. Typhimurium</i>	Frequência: 2,450 MHz; Potência: 700 W; Tempo de exposição: 75 segundos	Zhang <i>et al.</i> , (2022)
<i>S. aureus</i>	Frequência: 2,450 MHz; Potência: 850 W; Tempo de exposição: 80 segundos	Wang <i>et al.</i> , (2019)
<i>Bacillus cereus</i>	Frequência: 2,450 MHz; Potência: 750 W; Tempo de exposição: 70 segundos	Pattnaik; Mandliya; Mishra, (2024)
<i>S. cerevisiae</i>	Frequência: 2,450 MHz; Potência: 700 W; Tempo de exposição: 50 segundos	Zhang; Su; Zhang, (2018)
<i>A. niger</i>	Frequência: 2,450 MHz; Potência: 900 W; Tempo de exposição: 100 segundos	Pattnaik; Mandliya; Mishra, (2024)
<i>Lactobacillus plantarum</i>	Frequência: 2,450 MHz; Potência: 750 W; Tempo de exposição: 55 segundos	Dhar; Chakraborty (2024)

Os estudos apresentados na Tabela I mostram que o aquecimento por micro-ondas (MW) é uma alternativa promissora para a pasteurização de alimentos, destacando-se pelo aquecimento rápido e pela menor degradação térmica de compostos voláteis, o que favorece a preservação sensorial. Para sua ampliação na indústria, é fundamental aprofundar pesquisas sobre eficiência energética, impacto na qualidade dos alimentos e viabilidade econômica. A combinação do MW com outras técnicas, como altas temperaturas ou conservantes naturais, pode potencializar a inativação microbiana, aumentando a segurança e qualidade dos alimentos processados. Dessa forma, o MW se consolida como uma tecnologia eficiente para a indústria alimentícia, reunindo rapidez, preservação de características sensoriais e segurança microbiológica.

### Radiofrequência

O aquecimento por radiofrequência (RF), um tipo de método de aquecimento dielétrico, é bem conhecido pelas características de aquecimento rápido e volumétrico. Durante o tratamento, a energia de RF pode gerar calor dentro dos alimentos por meio da condução

iônica e da rotação dipolar das moléculas de água (Di Rosa *et al.*, 2019). O aquecimento de RF pode destruir microrganismos de forma mais eficaz em alimentos com baixa umidade devido ao aumento do efeito térmico (Jiang *et al.*, 2020).

Atualmente, o tratamento por RF tem sido usado com sucesso para reduzir populações microbianas em vários alimentos, como farinhas de cereais, nozes e especiarias (Costa; Marra, 2024) decontaminating food is vital before marketing and circulation. Radio frequency (RF. Mas a maioria dos estudos determinou o efeito da pasteurização de substitutos de laboratório, e apenas algumas pesquisas foram focadas em microrganismos naturais, portanto, as informações relacionadas são limitadas sobre os efeitos do teor de umidade, temperatura de aquecimento e tempo de espera na inativação térmica de microrganismos naturais.

O aquecimento por radiofrequência (RF) tem sido estudado como uma técnica eficaz para a inativação microbiana em diversos alimentos. A Tabela II apresenta estudos sobre a inativação microbiana em alimentos utilizando aquecimento por radiofrequência (RF) e os parâmetros de controle utilizados.

**Tabela II.** Estudos sobre a inativação microbiana em alimentos utilizando aquecimento por radiofrequência (RF).

Micro-organismo	Parâmetros de Controle	Referência
<i>E. coli</i> e <i>L. innocua</i>	Frequência de 27,12 MHz; temperatura final de 65°C; tempo de exposição de 5 minutos	Eveke e Brunkhorst (2004)
Microbiota natural	Frequência de 27,12 MHz; temperaturas internas de 75°C e 85°C; tempo de	Orsat <i>et al.</i> , (2004) Orsat ;
<i>Salmonella spp.</i>	Frequência de 27,12 MHz; temperatura final de 60°C; tempo de exposição de 3 minutos	Boreddy <i>et al.</i> , (2019)
<i>E. coli</i> e <i>L. monocytogenes</i>	Frequência de 27,12 MHz; temperatura final de 65°C; tempo de exposição de 5 minutos	Awuah; Ramaswamy; Economides(2005)

Vapor superaquecido (SS)

Os parâmetros de controle variam conforme o tipo de alimento e micro-organismo-alvo, com frequências geralmente em 27,12 MHz e temperaturas finais entre 60°C e 85°C. Estudos como os de Eveke e Brunkhorst (2004) indicam que tempos de exposição curtos (3 a 5 minutos) são suficientes para promover uma inativação significativa, tornando o RF uma alternativa viável à pasteurização térmica convencional.

### Vapor superaquecido (SS)

Tecnologias de saneamento a seco, como radiação ultravioleta e ozônio, apresentam limitações, incluindo menor profundidade de penetração, sombreamento e menor letalidade em tempos curtos de tratamento, reduzindo sua eficácia (Baker *et al.*, 2025; Seshadrinathan *et al.*, 2025). Como alternativa, o vapor superaquecido (SHS) tem sido adotado como método de higienização a seco para plantas de processamento de alimentos e produtos secos, pois, ao ser aquecido além da temperatura de saturação, não deixa condensado na superfície (Baker *et al.*, 2025; Park *et al.*, 2021). O SHS, por ser uma tecnologia física, demonstra alta eficácia na eliminação ou redução de microrganismos em superfícies de matérias-primas, além de inibir a oxidação lipídica e a formação de compostos nocivos. Comparado aos métodos térmicos tradicionais, o vapor superaquecido se destaca pela maior eficiência na transferência de calor, maior segurança e benefícios em economia de energia (Zhang *et al.*, 2024).

A eficácia da higienização depende das condições de tratamento e das propriedades da superfície, como rugosidade, hidrofobicidade, porosidade e características térmicas (Kim *et al.*, 2019). Em geral, tempos e temperaturas mais elevados resultam em maior inativação microbiana. Por exemplo, no tratamento SHS a 125 e 250 °C, o tempo de

redução decimal (valor D) de *Enterococcus faecium* é de 130 e 19 segundos, respectivamente, em 0,19 aw (Park *et al.*, 2021). A superfície do material também influencia a inativação microbiana, conforme demonstrado por Ban, Yoon, Kang (2014), que relataram maior eficácia do SHS em aço inoxidável comparado ao PVC, devido à maior condutividade térmica e menor hidrofobicidade. A diversidade microbiana e a composição da matriz alimentar também afetam a resistência térmica. Rana *et al.*, (2022) observaram maior resistência térmica em ascósporos fúngicos e esporos bacterianos do que em células vegetativas, além do aumento do valor D para *Bacillus cereus* em amostras com maior teor de gordura, proteína ou carboidrato. Já (Park *et al.*, 2022) verificaram que esporos de *Geobacillus stearothermophilus* inoculados em farinha de trigo apresentaram maior taxa de inativação em aço inoxidável do que em concreto, devido à maior inércia e difusividade térmica desse material.

O SHS apresenta vantagens em relação aos métodos tradicionais por utilizar pouca água e atingir temperaturas elevadas (125 °C a >300 °C), garantindo alta taxa de transferência de calor e penetrando em cavidades e fendas (Baker *et al.*, 2025; Park *et al.*, 2021). Estudos em escala de bancada já demonstraram sua eficácia para rápida inativação microbiana em diversas matrizes alimentares e superfícies industriais (Ban; Yoon; Kang, 2014; Kim *et al.*, 2020; Rana *et al.*, 2022).

Embora o SHS tenha mostrado alta eficiência na inativação microbiana sob condições isotérmicas, a aplicação comercial dinâmica sofre influências de fatores extrínsecos, como temperatura ambiente e espessura do material tratado, que afetam a temperatura da superfície. Além disso, a operação manual das unidades comerciais pode impactar seu desempenho, tornando essencial a realização de mais pesquisas sobre esses efeitos. Até

o momento, apenas dois estudos avaliaram o SHS em unidades comerciais (Baker *et al.*, 2025; Park; Balasubramaniam, 2025; Ruiz-Llacsahuanga *et al.*, 2022).

Além da inativação microbiana, o SHS também influencia as propriedades físico-químicas dos alimentos. Liu *et al.* (2021) demonstraram que o tratamento com SHS aumentou a gelatinização do amido na farinha de trigo, melhorando a qualidade dos biscoitos. Da mesma forma, Zhang *et al.* (2024) observaram melhorias nas propriedades de colagem da farinha de arroz, otimizando a qualidade de produtos processados à base de arroz. Esses achados indicam que o SHS pode impactar significativamente a funcionalidade dos grãos e derivados, tornando-se uma alternativa promissora para a indústria alimentícia.

## Aquecimento ôhmico

Para atender à crescente demanda por alimentos de alta qualidade, o desenvolvimento de tecnologias de processamento tem sido uma prioridade na indústria alimentícia. Entre essas tecnologias, o aquecimento ôhmico se destaca pelo interesse crescente tanto da indústria quanto da pesquisa. Esse método gera calor diretamente no alimento condutor por meio da passagem de corrente elétrica, resultando em um aquecimento rápido e uniforme (Aurina; Sari, 2022).

O aquecimento ôhmico tem sido amplamente aplicado em diversos tipos de alimentos, incluindo frutas e vegetais (Jan *et al.*, 2021), carnes (Balthazar *et al.*, 2024), e produtos como farinhas e amidos (Waziroh *et al.*, 2022) several challenges arise during gluten-free (GF). Um dos principais benefícios dessa tecnologia é evitar o superaquecimento superficial, já que o calor é gerado internamente, o que preserva os atributos sensoriais do alimento e reduz o consumo energético

quando comparado aos métodos convencionais (Sain *et al.*, 2024).

A eficácia do aquecimento ôhmico (OH) na inativação microbiana é influenciada por fatores extrínsecos, como intensidade de corrente, campo elétrico, frequência e temperatura, e por fatores intrínsecos, como composição, condutividade, teor de gordura e pH do alimento (Srivastava; Sit, 2024). Além disso, a eficiência da inativação varia conforme a espécie e o estágio de crescimento do microrganismo. Por exemplo, Lee *et al.* (2012) demonstraram que *E. coli* é mais resistente ao aquecimento ôhmico em sucos de laranja e tomate do que *S. Typhimurium* e *L. monocytogenes*.

Nesse contexto, a escolha dos parâmetros operacionais, como frequência e intensidade do campo elétrico, é fundamental para equilibrar a preservação de nutrientes sensíveis ao calor com a eficiência do processo. Parâmetros inadequados podem acelerar a degradação nutricional, enquanto ajustes corretos garantem um aquecimento eficiente, segurança microbiológica e eficácia na pasteurização (Doan *et al.*, 2021).

A combinação do aquecimento ôhmico com outras tecnologias, como embalagem asséptica contínua e pressão ultra-alta, pode potencializar a eficácia do processo. Essas integrações permitem maior segurança e qualidade dos alimentos, eliminando a necessidade de tratamentos térmicos adicionais (Wattanayon; Udompijitkul; Kamonpatana, 2021).

## Tecnologias não térmicas

Tecnologias não térmicas, como campos elétricos pulsados e processamento por alta pressão, representam uma inovação promissora no controle microbiano. Esses métodos empregam diferentes abordagens como luz

ultravioleta (UV), campos elétricos pulsados (PEF), alta pressão hidrostática (HPP), plasma frio, ultrassom (US) e irradiação (UV) proporcionando alternativas eficazes aos processos térmicos convencionais (Chowdhury *et al.*, 2025).

## Radiação UV-C

O tratamento UV-C é uma técnica de processamento não térmico amplamente utilizada na preservação de alimentos, incluindo bebidas (Chowdhury *et al.*, 2025). Esse método já é bem consolidado na purificação de água, devido à sua eficácia na desinfecção e inativação de microrganismos (Kim *et al.*, 2023). Recentemente, o interesse pelo uso do UV-C em sucos de frutas (Fundo *et al.*, 2021), leite (Ward *et al.*, 2019) e vinho (Diesler *et al.*, 2019) tem aumentado, com estudos mostrando seu potencial como alternativa aos processos térmicos.

A energia UV-C reage com o DNA e outros componentes vitais das células de microrganismos, resultando em danos que impedem a replicação e levam à morte celular (Figura 1). Para a inativação microbiana, os comprimentos de onda entre 250 e 260 nm são mais eficazes, pois o DNA absorve melhor nessa faixa (Song *et al.*, 2019).

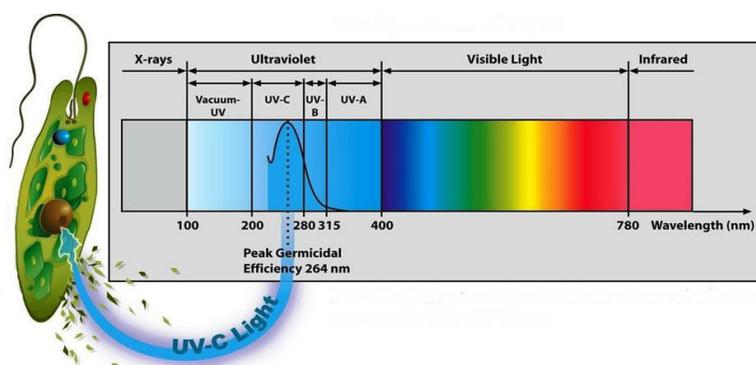
A eficácia do tratamento UV-C em líquidos está diretamente relacionada à profundidade de penetração, uma vez que os componentes presentes no líquido podem absorver ou dispersar a luz, reduzindo sua ação. Adicionalmente, a sensibilidade dos microrganismos ao UV-C depende de fatores como espécie, linhagem e estágio de crescimento, influenciando o grau de inativação microbiana (Gayán *et al.*, 2015). No estudo de Atik & Gumus (2021) o tratamento com UV-C mostrou-se eficaz na redução de *Salmonella Typhimurium*, *L. monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* e *E. coli* no leite UHT inoculado.

Os efeitos sensoriais do tratamento UV-C dependem do tipo de produto e da dose aplicada, podendo ser limitados pela formação de sabores determinados produtos (Golombek *et al.*, 2021). Além disso, a segurança do consumidor é um aspecto crucial, exigindo uma avaliação rigorosa dos riscos antes da aprovação do uso em alimentos líquidos.

## Campos Elétricos Pulsados (PEF)

A tecnologia de campos elétricos pulsados (PEF) é baseada no fenômeno da eletroporação, sendo amplamente utilizada no processamento de alimentos para a inativação

Figura 1: Mecanismo de ação da radiação ultravioleta sobre a célula microbiana.



Fonte: Auxtrat (2024)

de microrganismos. Sua principal vantagem é o impacto mínimo nas características de qualidade dos produtos alimentícios, como propriedades nutricionais, funcionais e sensoriais (Lytras *et al.*, 2024).

O PEF utiliza pulsos elétricos de alta intensidade para induzir a eletroporação, que ocorre quando o campo elétrico aplicado ultrapassa o potencial transmembrana crítico, geralmente entre 0,5 e 1,5 V. Esse fenômeno provoca alterações estruturais na membrana celular, resultando na formação de poros hidrofílicos. Além disso, modificações químicas nos lipídios e alterações nas funções proteicas também contribuem para o aumento da permeabilidade da membrana (Martínez *et al.*, 2020) yeast, and microalgae.

A eletroporação pode ser reversível ou irreversível, dependendo da intensidade do tratamento. Na eletroporação reversível, a célula se recupera após o campo elétrico, permitindo permeabilização temporária. Já na eletroporação irreversível, os danos à membrana celular são permanentes, levando à morte celular e sendo ideal para a inativação de microrganismos (Arshad *et al.*, 2020).

O PEF oferece resultados comparáveis aos tratamentos térmicos convencionais, com vantagens significativas, como menores temperaturas, tempos reduzidos e preservação da qualidade sensorial e nutricional dos alimentos. Além disso, sua aplicação em sistemas de fluxo contínuo aumenta a eficiência operacional, possibilitando o processamento de grandes volumes com menor impacto térmico (Naliyadhara *et al.*, 2022).

Essa tecnologia tem sido amplamente investigada para a inativação de microrganismos em alimentos líquidos, semilíquidos e sólidos, incluindo patógenos como *Salmonella*, *Listeria* e *E. coli*, além de deteriorantes como *Acetobacter* e *Bacillus* (Monfort *et al.*, 2010; Niu *et al.*, 2024; Rosenzweig *et al.*, 2024). Estudos apontam que fatores

como condutividade, pH e atividade de água influenciam a eficácia do PEF, sendo os melhores resultados observados em alimentos líquidos de alta acidez, como sucos (Timmermans *et al.*, 2019).

Apesar do potencial da tecnologia de campos elétricos pulsados (PEF) para melhorar a segurança alimentar, sua aplicação enfrenta desafios significativos, como os altos custos e possíveis impactos na qualidade sensorial e nutricional dos alimentos. Além disso, existem limitações técnicas, como a dificuldade em controlar uniformemente o tratamento em diferentes matrizes alimentares e a necessidade de ajustar parâmetros operacionais específicos para cada tipo de produto. A integração do PEF com outras tecnologias pode ser uma estratégia viável para superar essas dificuldades e ampliar a viabilidade industrial do processo. Embora seja uma tecnologia promissora, ainda são necessários avanços para otimizar sua aplicação, superar essas limitações e garantir resultados consistentes na inativação microbiana.

## Processamento com Alta Pressão (HPP)

A alta pressão hidrostática (HPP) é uma tecnologia de processamento não térmico amplamente utilizada na indústria alimentícia desde o século XX, destacando-se pela eficiência na inativação microbiana (Puentes-Díaz; Solís; Wong-Toro, 2024). O processo HPP aplica pressões entre 100 e 1000 MPa, permitindo a pasteurização sem necessidade de calor excessivo, o que preserva melhor o valor nutricional e as características sensoriais dos alimentos (Home, 2024). Além disso, a tecnologia mantém a forma e o tamanho dos produtos, sendo especialmente indicada para alimentos embalados e pratos prontos (Serment-Moreno; Tonello-Samson, 2020).

A eficiência do HPP depende principalmente da pressão aplicada, considerada o fator mais crítico no controle da pasteurização. Pressões superiores a 300 MPa causam ruptura da membrana celular, enquanto pressões a partir de 600 MPa, associadas ao calor, inativam endósporos (Sehrawat *et al.*, 2021). No entanto, o tempo de tratamento, se excessivo, pode comprometer a qualidade dos alimentos. Outros fatores, como taxas de pressurização e despressurização, também influenciam a eficácia microbiana, mas requerem mais estudos devido à inconsistência nos resultados (Huang; Hsu; Wang, 2020). O alto custo dos equipamentos e do processamento em lote, contudo, limita a competitividade do HPP em relação aos métodos térmicos (Yamamoto, 2017) as a nonthermal process, can be used to inactivate microbes while minimizing chemical reactions in food. In this regard, a HHP level of 100 MPa (986.9 atm/1019.7 kgf/cm<sup>2</sup>).

A inativação de microrganismos pelo HPP ocorre principalmente por danos em ligações não covalentes, que comprometem proteínas, membranas e ribossomos, levando à desnaturação celular. No entanto, alguns microrganismos, como bactérias gram-positivas, apresentam maior resistência devido à espessa camada de peptidoglicano, que dificulta a ruptura celular. Nesses casos, podem ser necessárias pressões mais elevadas ou combinações do HPP com outras tecnologias para maior eficácia (Argyri *et al.*, 2018). Além disso, a adaptação de microrganismos ao estresse imposto pelo HPP pode reduzir sua eficiência. Bactérias e leveduras expostas a pressões moderadas podem desenvolver alterações genéticas e fisiológicas que aumentam sua tolerância, fenômeno conhecido como proteção cruzada. Para superar essa resistência, o HPP é frequentemente combinado com tratamentos térmicos, garantindo a inativação de microrganismos mesófilos

e endósporos (Ferreira *et al.*, 2019). Apesar de seus desafios, o HPP continua uma tecnologia promissora por seu potencial em preservar a qualidade sensorial e nutricional dos alimentos.

## Tecnologia de plasma

A tecnologia de plasma é uma alternativa emergente no processamento de alimentos. Originalmente desenvolvida para unir e curar polímeros, essa técnica utiliza gás ionizado como ferramenta de esterilização, promovendo a ionização parcial de íons, radicais livres, partículas carregadas e moléculas gasosas (Chizoba Ekezie *et al.*, 2017). O plasma interage diretamente com células bacterianas, inativando microrganismos, esporos e vírus por meio de diversos mecanismos, como danos à membrana celular, oxidação de proteínas e ácidos nucleicos, além de alterações metabólicas que inviabilizam a sobrevivência celular (Lavrikova *et al.*, 2024).

Existem dois principais tipos de plasma utilizados no processamento de alimentos: plasma frio (Pankaj *et al.*, 2018) e plasma térmico (Samal, 2017). O plasma frio é mais amplamente aplicado, pois mantém temperaturas baixas, tornando-o ideal para tratar alimentos sensíveis ao calor e superfícies de embalagens (Hoque *et al.*, 2022). Já o plasma térmico, apesar de ser mais eficiente na inativação microbiana, tem uso restrito devido ao aumento da temperatura durante o processo (Liao *et al.*, 2017). A escolha do tipo de plasma depende das características do alimento e da finalidade do tratamento.

A tecnologia de plasma apresenta várias vantagens, como segurança ambiental, ausência de substâncias perigosas ou tóxicas e a não geração de compostos persistentes. Além disso, o processo é estéril, eficiente e reprodutível. Tem sido aplicada com sucesso na descontaminação de frutas, vegetais, cereais e produtos prontos para consumo,

garantindo alta eficácia na redução de patógenos sem comprometer a qualidade sensorial e nutricional dos alimentos (Usman *et al.*, 2023). No entanto, há desafios associados ao seu uso, incluindo o alto custo de instalação, a necessidade de medidas de segurança rigorosas, equipamentos específicos e pessoal qualificado para operar o sistema (Saranganpani *et al.*, 2018).

## Ultrassom

A irradiação por ultrassom inativa microrganismos em condições ambientais, sem compostos químicos (Nakonechny; Nisnevitch, 2021). A desintegração ocorre pela interação com bolhas cavitacionais geradas pelo ultrassom (Figura 2). Em líquidos, as cavitações formam bolhas que colapsam, criando “pontos quentes” com alta temperatura e pressão, resultando em ondas de choque e radicais hidroxila (OH) (Matafonova; Batoev, 2019).

A eficácia do ultrassom depende da intensidade, frequência e espécie microbiana. Efeitos sonoquímicos são mais intensos entre 200 e 600 kHz, enquanto efeitos físicos,

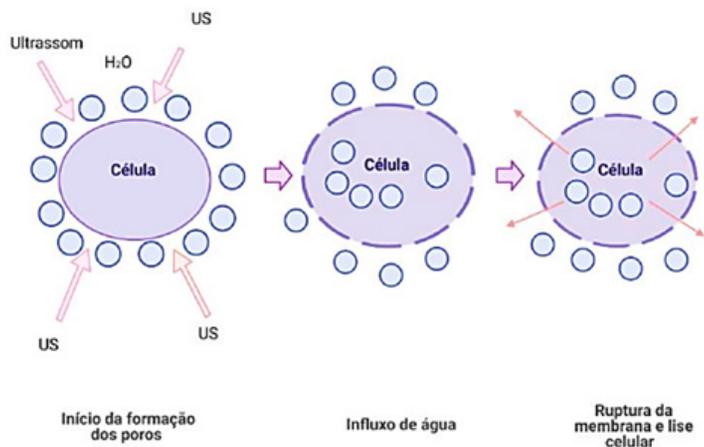
como ondas de choque, são cruciais para inativar microrganismos como *E. coli* (Feng *et al.*, 2018). Gram-negativas, com paredes celulares finas, são mais suscetíveis, enquanto Gram-positivas, com paredes mais espessas, são mais resistentes (Liao *et al.*, 2018). Ajustar os parâmetros é fundamental para otimizar a inativação conforme a morfologia microbiana.

A Tabela III resume os principais usos e benefícios do ultrassom em diferentes indústrias alimentícias, de acordo com (Safwa *et al.*, 2024).

## Irradiação

A irradiação é uma tecnologia de controle microbiano que utiliza raios  $\gamma$ , raios X ou feixes de elétrons para inativar microrganismos em alimentos. Os raios  $\gamma$ , provenientes de radionuclídeos como  $^{60}\text{Co}$  e  $^{137}\text{Cs}$ , possuem maior penetração (até 40 cm) e são amplamente utilizados. Preocupações com materiais radioativos levaram ao desenvolvimento de aceleradores de elétrons, que geram raios X e feixes de elétrons sem fontes radioativas (Gómez-López *et al.*, 2022).

**Figura 2:** Mecanismo de ação do ultrassom sobre as células microbianas.



Fonte: Vieira (2021)

**Tabela III-** Principais usos e benefícios do ultrassom em diferentes indústrias alimentícias.

Indústria	Uso do Ultrassom	Efeitos e Benefícios
Frutas e Vegetais	Pré-tratamento antes da secagem	Melhora a cinética de secagem; diminui teor de umidade; modifica estruturas do tecido
	Limpeza ultrassônica	Remove resíduos de pesticidas; inibe enzimas de escurecimento
	Extração de compostos	Facilita o isolamento de antioxidantes, carotenoides, fenóis, antocianinas, fragrâncias e corantes naturais
Carne	Melhora na produção de suco	Aumenta capacidade antioxidante, ácido ascórbico, flavonoides, e reduz deterioração microbiana
	Avaliação de gado vivo	Melhora a qualidade, sabor e maciez da carne; modifica membranas celulares; aumenta a maciez da carne bovina e de frango
Frutos do Mar	Esterilização	Reduz contaminação bacteriana, especialmente <i>E. coli</i> e <i>Salmonella</i>
	Aumenta a vida útil	Reduz atividade microbiana; combinado com calor para destruição microbiana
Ovos	Melhora atributos sensoriais	Estima teor de gordura; reduz alergenicidade em camarões
	Combinação com lisozima	Elimina <i>Salmonella typhimurium</i> ; fortalece a casca do ovo
Laticínios	Teste de frescor	Uso de frequências ultrassônicas para determinar frescor durante o armazenamento
	Destrução microbiana	Elimina ameaças microbianas, melhora qualidade e estende vida útil do leite; desativa micróbios termofílicos formadores de esporos
	Pasteurização	Reduz níveis de aflatoxina; melhora propriedades do iogurte e sorvete

A inativação microbiana por irradiação ocorre por dois mecanismos: efeitos diretos, que quebram macromoléculas vitais como DNA e proteínas, e efeitos indiretos, que geram radicais livres a partir da ionização da água, causando danos adicionais (Figura 3). Essa combinação garante eficácia na descontaminação, preservando alimentos e produtos esterilizados com segurança microbiológica e sem alterar suas características sensoriais e nutricionais (Wang *et al.*, 2024).

A irradiação é amplamente reconhecida como segura e eficaz no controle microbiano de alimentos, com respaldo de organizações como a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) e a Organização Mundial da Saúde (OMS). Doses de até 10 kGy são consideradas seguras para consumo humano.

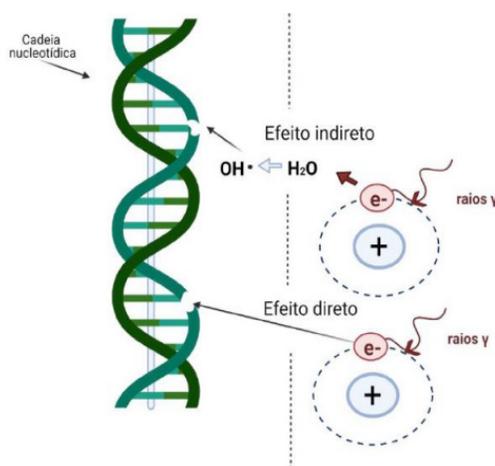
Atualmente, mais de 50 países aprovam seu uso em produtos alimentícios, promovendo segurança alimentar e maior vida útil dos alimentos (Natividade *et al.*, 2023).

A eficácia da irradiação varia conforme o tipo de radiação (raios  $\gamma$ , raios X ou feixes de elétrons) e a dose aplicada. Os raios  $\gamma$ , provenientes de radionuclídeos como  $^{60}\text{Co}$ , possuem maior penetração e são indicados para produtos mais espessos. Já os feixes de elétrons, com menor penetração, são mais seguros e econômicos por não utilizarem fontes radioativas. Doses entre 5 e 10 kGy reduzem patógenos de forma eficaz, mas doses excessivas podem alterar a cor, textura e sabor do produto (Fan; Niemira, 2020).

A embalagem é fundamental para o sucesso da irradiação. A presença de oxigênio pode acelerar a oxidação de lipídios,

comprometendo a qualidade do alimento. Embalagens a vácuo ou em atmosfera modificada minimizam esse efeito, garantindo estabilidade sensorial e segurança microbiológica. Estudos confirmam que a irradiação não aumenta a migração de compostos químicos das embalagens para os alimentos, assegurando sua segurança para o consumo (Kamolprasert, 2016).

**Figura 3:** Mecanismo de ação da irradiação sobre as células microbianas.



Fonte: Vieira (2021)

Apesar de suas vantagens, a irradiação enfrenta desafios, como a percepção negativa do consumidor, que associa a tecnologia a riscos radioativos, embora não haja contato com materiais radioativos (Castell-Perez; Moreira, 2021). Questões econômicas, como altos custos operacionais e necessidade de instalações especializadas, também limitam sua aplicação. No entanto, parcerias e investimentos em grandes instalações podem ampliar seu uso, promovendo alimentos mais seguros e duráveis (Gautam, 2024).

## Considerações Finais

O avanço das tecnologias térmicas e não térmicas tem sido fundamental para a segurança e qualidade dos alimentos, permitindo a inativação microbiana com menor impacto nas propriedades nutricionais e sensoriais. Métodos tradicionais, como pasteurização e esterilização, seguem amplamente utilizados devido à sua eficácia, mas desafios como a degradação de nutrientes impulsionaram o desenvolvimento de alternativas inovadoras.

Entre as tecnologias térmicas emergentes, destacam-se micro-ondas, radiofrequência, aquecimento ôhmico e vapor superaquecido, que reduzem o tempo de exposição ao calor e minimizam efeitos indesejáveis na qualidade dos alimentos. Já as abordagens não térmicas, como campos elétricos pulsados, alta pressão hidrostática, luz ultravioleta, ultrassom, plasma frio e irradiação, eliminam microrganismos sem comprometer a integridade nutricional e sensorial dos produtos.

A escolha da tecnologia ideal depende do tipo de alimento, da resistência microbiana e das regulamentações vigentes. A combinação de diferentes métodos pode intensificar os efeitos desejados, aumentando a segurança alimentar e a durabilidade dos produtos. A crescente adoção dessas tecnologias pela indústria alimentícia reflete seu potencial para otimizar processos e atender à demanda por alimentos mais seguros e saudáveis. No entanto, mais estudos são necessários para avaliar a viabilidade econômica, os impactos ambientais e a aceitação do consumidor, garantindo uma implementação eficaz e sustentável dessas inovações.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES – Código de Financiamento 001, e a FAPERGS.

## REFERÊNCIAS

- ARGYRI, A. A.; PAPADOPOULOU, O. S.; NISIOTOU, A.; TASSOU, C. C.; CHORIANOPOULOS, N. Effect of high pressure processing on the survival of *Salmonella* Enteritidis and shelf-life of chicken fillets. **Food Microbiology**, v. 70, p. 55-64, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0740002016310747>
- ARSHAD P, M.; SHARMA, N.; MAIBAM, B. D.; SHARMA, M. Review on effect of innovative technologies on shelf-life extension of non-dairy sources from plant matrices. **Food Chemistry Advances**, v. 5, p. 100781, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772753X24001771>
- ARSHAD, R. N.; ABDUL-MALEK, Z.; MUNIR, A.; BUNTAT, Z.; AHMAD, M. H.; JUSOH, Y. M.M.; BEKHIT, A. E-D.; ROOBAB, U.; MANZOOR, M. F.; AADIL, R. M. Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. **Trends in Food Science & Technology**, v. 104, p. 1-13, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224420305379>
- ATIK, A.; GUMUS, T. The effect of different doses of UV-C treatment on microbiological quality of bovine milk. **LWT**, v. 136, p. 110322, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0023643820313116>
- AURINA, K.; SARI, A. Ohmic Heating: A Review and Application in Food Industry, 2022. Disponível em: <https://www.atlantis-press.com/article/125971305>
- AUXTRAT. O que é Ultravioleta? Disponível em: <https://www.auxtrat.com.br/tecnologia-ultravioleta/>. Acesso em: 26 Nov. 2025
- AWUAH, G. B.; RAMASWAMY, H. S.; ECONOMIDES, A. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in milk and apple cider treated with radio frequency heating. **Journal of Food Process Engineering**, v. 28(6), p. 427-444, 2005.
- BAKER, J.; RANA, Y. S.; CHEN, L.; BEARY, M. A.; BALASUBRAMANIAM, V. M.; SNYDER, A. B. Superheated Steam Can Rapidly Inactivate Bacteria, But Manual Operation of Commercial Units Resulted in Limited Efficacy During Dry Surface Sanitization. **Journal of Food Protection**, v. 88, n. 3, p. 100461, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0362028X25000134>
- BALTHAZAR, C. F.; PIMENTEL, T. C.; SILVA, R.; PRUDENCIO, E. S.; CRUZ, A. G.; MÁRSICO, E. T. Recent findings on the ohmic heating application in meat products. **Current Opinion in Food Science**, v. 58, p. 101180, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214799324000584>
- BAN, G.-H.; YOON, H.; KANG, D.-H. A comparison of saturated steam and superheated steam for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella Typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* biofilms on polyvinyl chloride and stainless steel. **Food Control**, v. 40, p. 344-350, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956713513006580>

- BERMUDEZ-AGUIRRE, D.; NIEMIRA, B. A. Radio Frequency Treatment of Food: A Review on Pasteurization and Disinfestation. **Foods**, v. 12, n. 16, p. 3057, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/16/3057>
- BIGI, F.; MAURIZZI, E.; QUARTIERI, A.; DE LEO, R.; GULLO, M.; PULVIRENTI, A. Non-thermal techniques and the “hurdle” approach: How is food technology evolving? **Trends in Food Science & Technology**, v. 132, p. 11-39, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224422004836>
- BOREDDY, S. R.; SUBBIAH, J.; BIRLA, S. L.; KEENER, K. Radiofrequency heating of Salmonella-inoculated peanut butter: Heating uniformity and inactivation study. **Journal of Food Engineering**, v. 245, p. 18-28, 2019.
- BRINLEY, T. A.; TRUONG, V. D.; CORONEL, P.; SIMUNOVIC, J.; SANDEEP, K. P. Dielectric Properties of Sweet Potato Purees at 915 MHz as Affected by Temperature and Chemical Composition\*. **International Journal of Food Properties**, v. 11, n. 1, p. 158-172, 2008. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10942910701284291>
- CASTELL-PEREZ, M. E.; MOREIRA, R. G. Irradiation and Consumers Acceptance. **Innovative Food Processing Technologies**, p. 122-135, 2021. Elsevier. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128157817000159>
- CEBRIÁN, G.; CONDÓN, S.; MAÑAS, P. Physiology of the Inactivation of Vegetative Bacteria by Thermal Treatments: Mode of Action, Influence of Environmental Factors and Inactivation Kinetics. **Foods**, v. 6, n. 12, p. 107, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/6/12/107>
- CHIOZZI, V.; AGRIPOULOU, S.; VARZAKAS, T. Advances, Applications, and Comparison of Thermal (Pasteurization, Sterilization, and Aseptic Packaging) against Non-Thermal (Ultrasounds, UV Radiation, Ozonation, High Hydrostatic Pressure) Technologies in Food Processing. **Applied Sciences**, v. 12, n. 4, p. 2202, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/4/2202>
- CHIZOBA EKEZIE, F.-G.; SUN, D.-W.; CHENG, J.-H. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. **Trends in Food Science & Technology**, v. 69, p. 46-58, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224417304582>
- CHOWDHURY, M. A. H.; REEM, C. S. A.; RAHMAN, S. M.; SARKAR, F. Comprehensive approaches for ensuring microbial safety in the dairy industry: Monitoring systems, inhibitory strategies and future prospects. **Food Control**, v. 168, p. 110894, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095671352400611X>
- COSTA, J. M.; MARRA, F. Advances in Food Processing Through Radio Frequency Technology: Applications in Pest Control, Microbial and Enzymatic Inactivation. **Food Engineering Reviews**, v. 16, n. 3, p. 422-440, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s12393-024-09372-8>
- DHAR, R.; CHAKRABORTY, S. Bael (Aegle marmelos) beverage pasteurization by non-isothermal heating with continuous microwave to achieve microbial safety. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 97, p. 103801, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1466856424002406>
- DIESLER, K.; GOLOMBEK, P.; KROMM, L.; SCHARFENBERGER-SCHMEER, M.; DURNER, D.; SCHMARR, H.-G.; STAHL, M. R.; BRIVIBA, K.; FISCHER, U. UV-C treatment of grape must: Microbial inactivation, toxicological considerations and influence on chemical and sensory properties of white wine. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 52, p. 291-304, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S146685641830417X>
- DOAN, N. K.; LAI, Q. D.; LE, T. K. P.; LE, N. T. Influences of AC frequency and electric field strength on changes in bioactive compounds in Ohmic heating of pomelo juice. **Innovative Food**

**Science & Emerging Technologies**, v. 72, p. 102754, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1466856421001557>

EVEKE, D. J. G.; BRUNKHORST, C. Inactivation of in Apple Juice by Radio Frequency Electric Fields. **Journal of Food Science**, v. 69, n. 3, 2004. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2621.2004.tb13366.x>

FAN, X.; NIEMIRA, B. A. Gamma Ray, Electron Beam, and X-ray Irradiation. **Food Safety Engineering**, p. 471-492, 2020. Springer. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-42660-6\\_18](http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-42660-6_18)

FARKAS, J. Irradiation for better foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 4, p. 148-152, 2006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224405003511>

FENG, J.; FU, Y.; LIU, X.; et al. Significant Improvement and Mechanism of Ultrasonic Inactivation to *Escherichia coli* with Piezoelectric Effect of Hydrothermally Synthesized t-BaTiO<sub>3</sub>. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 5, p. 6032-6041, 2018. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.7b04666>

FERREIRA, R. M.; MOTA, M. J.; LOPES, R. P.; SOUSA, S.; GOMES, A. M.; DELGADILLO, I.; SARAIVA, J. A. Adaptation of *Saccharomyces cerevisiae* to high pressure (15, 25 and 35 MPa) to enhance the production of bioethanol. **Food Research International**, v. 115, p. 352-359, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996918309128>

FUNDO, J. F.; MILLER, F. A.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Application of UV-C radiation light in fruit juice processing. **CABI Reviews**, 2021. Disponível em: <http://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/PAVSNR202116040>

GAUTAM, S. Enhancing Food Security, Safety, and Sustainability via the Application of Radiation Technology. **Handbook on Radiation Environment**, v. 1. p. 357-381, 2024. Singapore: Springer Nature Singapore. Disponível em: [https://link.springer.com/10.1007/978-981-97-2795-7\\_12](https://link.springer.com/10.1007/978-981-97-2795-7_12)

GAYÁN, E.; SERRANO, M. J.; PAGÁN, R.; ÁLVAREZ, I.; CONDÓN, S. Environmental and biological factors influencing the UV-C resistance of *Listeria monocytogenes*. **Food Microbiology**, v. 46, p. 246-253, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S074000201400210X>

GOLOMBEK, P.; WACKER, M.; BUCK, N.; DURNER, D. Impact of UV-C treatment and thermal pasteurization of grape must on sensory characteristics and volatiles of must and resulting wines. **Food Chemistry**, v. 338, p. 128003, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308814620318653>

GÓMEZ-LÓPEZ VM, PATARO G, TIWARI B, GOZZI M, MEIRELES MÁA, WANG S, GUAMIS B, PAN Z, RAMASWAMY H, SASTRY S, KUNTZ F, CULLEN PJ, VIDYARTHI SK, LING B, QUEVEDO JM, STRASSER A, VIGNALI G, VEGGI PC, GERVILLA R, KOTILAINEN HM, PELACCI M, VIGANÓ J, MORATA A. Guidelines on reporting treatment conditions for emerging technologies in food processing. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, n. 21, p. 5925-5949, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2021.1895058>

GUO, L.; AZAM, S. M. R.; GUO, Y.; LIU, D.; MA, H. Germicidal efficacy of the pulsed magnetic field against pathogens and spoilage microorganisms in food processing: An overview. **Food Control**, v. 136, p. 108496, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956713521006344>

HAGUE, M. A.; KASTNER, C. L.; FUNG, D. Y. C.; KONE, K.; SCHWENKE, J. R. Use of Nisin and Microwave Treatment Reduces *Clostridium sporogenes* Outgrowth in Precooked Vacuum-

- Packaged Beef. **Journal of Food Protection**, v. 60, n. 9, p. 1072-1074, 1997. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0362028X22072295>
- HOME, J. Effect of High-Pressure Processing on Nutritional Composition, Microbial Safety, Shelf Life and Sensory Properties of Perishable Food Products : A Review, n. May, 2024.
- HOQUE, M.; MCDONAGH, C.; TIWARI, B. K.; KERRY, J. P.; PATHANIA, S. Effect of Cold Plasma Treatment on the Packaging Properties of Biopolymer-Based Films: A Review. **Applied Sciences**, v. 12, n. 3, p. 1346, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1346>
- HUANG, H.-W.; HSU, C.-P.; WANG, C.-Y. Healthy expectations of high hydrostatic pressure treatment in food processing industry. **Journal of Food and Drug Analysis**, v. 28, n. 1, p. 1-13, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1021949819300973>
- HUANG, J.; GUO, Q.; MANZOOR, M. F.; CHEN, Z.; XU, B. Evaluating the sterilization effect of wheat flour treated with continuous high-speed-stirring superheated steam. **Journal of Cereal Science**, v. 99, p. 103199, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0733521021000400>
- JAMSHIDIAN, M.; LACROIX, M. Chapter 8. Packaging for Food Irradiation. p. 123-168, 2017. Disponível em: <https://books.rsc.org/books/monograph/1836/chapter-abstract/2254983/>
- JAN, A.; SOOD, M.; SOFI, S. A.; NORZOM, T. Non-thermal processing in food applications: A review. **International Journal of Food Science and Nutrition**, v. 2, n. 6, p. 171-180, 2017.
- JAN, B.; SHAMS, R.; UL, Q.; HYDER, E.; MANZOOR, A. Ohmic heating technology for food processing: a review of recent developments, v. 09, n. 1, p. 20-34, 2021.
- JIANG, H.; GU, Y.; GOU, M.; XIA, T.; WANG, S. Radio frequency pasteurization and disinfestation techniques applied on low-moisture foods. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 60, n. 9, p. 1417-1430, 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2019.1573415>
- KIM, H.-J.; YOON, H.-W.; LEE, M.-A.; KIM, Y.-H.; LEE, C. J. Impact of UV-C Irradiation on Bacterial Disinfection in a Drinking Water Purification System. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 33, n. 1, p. 106-113, 2023. Disponível em: <http://www.jmb.or.kr/journal/view.html?doi=10.4014/jmb.2211.11027>
- KIM, S.-H.; PARK, S.-H.; KIM, S.-S.; KANG, D.-H. Inactivation of *Staphylococcus aureus* Biofilms on Food Contact Surfaces by Superheated Steam Treatment. **Journal of Food Protection**, v. 82, n. 9, p. 1496-1500, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0362028X22098921>
- KIM, S.-S.; KIM, S.-H.; PARK, S.-H.; KANG, D.-H. Inactivation of *Bacillus cereus* Spores on Stainless Steel by Combined Superheated Steam and UV-C Irradiation Treatment. **Journal of Food Protection**, v. 83, n. 1, p. 13-16, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0362028X22100888>
- KOMOLPRASERT, V. Packaging food for radiation processing. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 129, p. 35-38, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0969806X1630233X>
- LAVRIKOVA, A.; DADI, N. C. T.; BUJDÁKOVÁ, H.; HENSEL, K. Inactivation pathways of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* induced by transient spark discharge in liquids. **Plasma Processes and Polymers**, v. 21, n. 5, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppap.202300147>
- LEE, H. J.; LEE, C.; RYU, D. Effects of baking soda and fructose in reduction of ochratoxin A in rice and oat porridge during retorting process. **Food Control**, v. 116, p. 107325, 2020. Disponível

em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956713520302413>

LEE, S.-Y.; SAGONG, H.-G.; RYU, S.; KANG, D.-H. Effect of continuous ohmic heating to inactivate *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella Typhimurium* and *Listeria monocytogenes* in orange juice and tomato juice. **Journal of Applied Microbiology**, v. 112, n. 4, p. 723-731, 2012. Disponível em: <https://academic.oup.com/jambio/article/112/4/723/6716052>

LIAO, X.; LI, J.; SUO, Y.; CHEN, S.; YE, X.; LIU, D.; DING, T. Multiple action sites of ultrasound on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. **Food Science and Human Wellness**, v. 7, n. 1, p. 102-109, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221345301730191X>

LIAO, X.; LIU, D.; XIANG, Q.; AHN, J.; CHEN, S.; YE, X.; DING, T. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review. **Food Control**, v. 75, p. 83-91, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956713516307113>

LING, B.; TANG, J.; KONG, F.; MITCHAM, E. J.; WANG, S. Kinetics of Food Quality Changes During Thermal Processing: a Review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 8, n. 2, p. 343-358, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11947-014-1398-3>

LISBOA, H. M.; PASQUALI, M. B.; DOS ANJOS, A. I.; SARINHO, A. M.; DE MELO, E. D.; ANDRADE, R.; BATISTA, L.; LIMA, J.; DINIZ, Y.; BARROS, A. Innovative and Sustainable Food Preservation Techniques: Enhancing Food Quality, Safety, and Environmental Sustainability. **Sustainability**, v. 16, n. 18, p. 8223, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/18/8223>

LIU, YUANXIAO; LI, M.; LIU, YUANFANG; GUAN, E.; BIAN, K. Effects of superheated steam treatment of wheat on physicochemical properties of wheat flour and cracker quality. **Journal of Cereal Science**, v. 97, p. 103165, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0733521021000060>

LYTRAS, F.; PSAKIS, G.; GATT, R.; CEBRIÁN, G.; RASO, J.; VALDRAMIDIS, V. Exploring the efficacy of pulsed electric fields (PEF) in microbial inactivation during food processing: A deep dive into the microbial cellular and molecular mechanisms. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 95, p. 103732, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1466856424001711>

MARTÍNEZ, J. M.; DELSO, C.; ÁLVAREZ, I.; RASO, J. Pulsed electric field-assisted extraction of valuable compounds from microorganisms. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, n. 2, p. 530-552, 2020. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12512>

MATAFONOVA, G.; BATOEV, V. Review on low- and high-frequency sonolytic, sonophotolytic and sonophotochemical processes for inactivating pathogenic microorganisms in aqueous media. **Water Research**, v. 166, p. 115085, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135419308590>

MOATSOU, G. Emerging Technologies for Improving Properties, Shelf Life, and Analysis of Dairy Products. **Foods**, v. 13, n. 7, p. 1078, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/7/1078>

MONFORT, S.; GAYÁN, E.; SALDAÑA, G.; PUÉRTOLAS, E.; CONDÓN, S.; RASO, J.; ÁLVAREZ, I. Inactivation of *Salmonella Typhimurium* and *Staphylococcus aureus* by pulsed electric fields in liquid whole egg. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 11, n. 2, p. 306-313, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1466856409001325>

NAKONECHNY, F.; NISNEVITCH, M. Different Aspects of Using Ultrasound to Combat Microorganisms. **Advanced Functional Materials**, v. 31, n. 44, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.202011042>

- NALIYADHARA, N.; KUMAR, A.; GIRISA, S.; DAIMARY, U. D.; HEGDE, M.; KUNNUMAKKARA, A. B. Pulsed electric field (PEF): Avant-garde extraction escalation technology in food industry. **Trends in Food Science & Technology**, v. 122, p. 238-255, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092422442200067X>
- NATIVIDADE, M. A.; ALONSO, T. C.; MESQUITA, A. Z. Regulation and Supervision of Food Irradiation. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 11, n. 1A, p. 01-10, 2023. Disponível em: <https://bjrs.org.br/revista/index.php/REVISTA/article/view/2170>
- NIU, D.; FENG, X.; ZHANG, A.; LI, K.; WANG, L.-H.; ZENG, X.-A.; WANG, S. Revealing the synergistic antibacterial mechanisms of resveratrol (RES) and pulsed electric field (PEF) against *Acetobacter* sp. **Food Research International**, v. 197, p. 115237, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996924013073>
- ORSAT, V.; BAI, L.; RAGHAVAN, G. S. V.; SMITH, J. P. Radio-Frequency Heating Of Ham To Enhance Shelf-Life In Vacuum Packaging. **Journal of Food Process Engineering**, v. 27, n. 4, p. 267-283, 2004. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1745-4530.2004.00461.x>
- PANKAJ, S.; WAN, Z.; KEENER, K. Effects of Cold Plasma on Food Quality: A Review. **Foods**, v. 7, n. 1, p. 4, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/7/1/4>
- PARK, H. W.; BALASUBRAMANIAM, V. M. Infrared Thermal Image Processing Technique for Evaluating Superheated Steam as a Dry Sanitation Method. **Food and Bioprocess Technology**, v. 18, n. 2, p. 1417-1430, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11947-024-03529-3>
- PARK, H. W.; BALASUBRAMANIAM, V. M.; SNYDER, A. B.; SEKHAR, J. A. Influence of Superheated Steam Temperature and Moisture Exchange on the Inactivation of *Geobacillus stearothermophilus* Spores in Wheat Flour-Coated Surfaces. **Food and Bioprocess Technology**, v. 15, n. 7, p. 1550-1562, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11947-022-02830-3>
- PARK, H. W.; XU, J.; BALASUBRAMANIAM, V. M.; SNYDER, A. B. The effect of water activity and temperature on the inactivation of *Enterococcus faecium* in peanut butter during superheated steam sanitation treatment. **Food Control**, v. 125, p. 107942, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956713521000803>
- PATTNAIK, M.; MANDLIYA, S.; MISHRA, H. N. Applications of Microwaves in Dairy Industries. **Microwave Processing of Foods: Challenges, Advances and Prospects**, p. 551-564, 2024. Disponível em: [https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-51613-9\\_27](https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-51613-9_27)
- PUENTE-DÍAZ, L.; SOLÍS, D.; WONG-TORO, S. Comprehensive Bibliometric Analysis on High Hydrostatic Pressure as New Sustainable Technology for Food Processing: Key Concepts and Research Trends. **Sustainability**, v. 17, n. 1, p. 188, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/1/188>
- RANA, Y. S.; CHEN, L.; BALASUBRAMANIAM, V. M.; SNYDER, A. B. Superheated steam effectively inactivates diverse microbial targets despite mediating effects from food matrices in bench-scale assessments. **International Journal of Food Microbiology**, v. 378, p. 109838, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168160522003105>
- DI ROSA, A. R.; BRESSAN, F.; LEONE, F.; FALQUI, L.; CHIOFALO, V. Radio frequency heating on food of animal origin: a review. **European Food Research and Technology**, v. 245, n. 9, p. 1787-1797, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00217-019-03319-8>
- ROSENZWEIG, Z.; GARCIA, J.; THOMPSON, G. L.; PEREZ, L. J. Inactivation of bacteria using synergistic hydrogen peroxide with split-dose nanosecond pulsed electric field exposures. **Plos One**, v. 19, n. 11, p. e0311232, 2024. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0311232>

- RUIZ-LLACSAHUANGA, B.; HAMILTON, A. M.; ANDERSON, K.; CRITZER, F. Efficacy of cleaning and sanitation methods against *Listeria innocua* on apple packing equipment surfaces. *Food Microbiology*, v. 107, p. 104061, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0740002022000855>
- SAFWA, S. M.; AHMED, T.; TALUKDER, S.; SARKAR, A.; RANA, M. R. Applications of non-thermal technologies in food processing Industries-A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, v. 18, p. 100917, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666154323004246>
- SAIN, M.; MINZ, P. S.; JOHN, H.; SINGH, A. Effect of Ohmic Heating on Food Products: An In-Depth Review Approach Associated with Quality Attributes. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 2024, p. 1-17, 2024. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/jfpp/2024/2025937/>
- SAMAL, S. Thermal plasma technology: The prospective future in material processing. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 3131-3150, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616317851>
- SARANGAPANI, C.; PATANGE, A.; BOURKE, P.; KEENER, K.; CULLEN, P. J. Recent Advances in the Application of Cold Plasma Technology in Foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, v. 9, n. 1, p. 609-629, 2018. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-food-030117-012517>
- SEHRAWAT, R.; KAUR, B. P.; NEMA, P. K.; TEWARI, S.; KUMAR, L. Microbial inactivation by high pressure processing: principle, mechanism and factors responsible. *Food Science and Biotechnology*, v. 30, n. 1, p. 19-35, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10068-020-00831-6>
- SERMENT-MORENO, V.; TONELLO-SAMSON, C. An introduction to packaging for commercial high-pressure processing (HPP) applications. *Present and Future of High Pressure Processing*, p. 381-404, 2020. Elsevier. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128164051000170>
- SESHADRINATHAN, S.; BALASUBRAMANIAM, V. M.; SNYDER, A. B.; DUPONT, R.; WANG, X. Utilizing superheated steam to inactivate *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 on various material surfaces used in food and produce industries. *Food Control*, v. 169, p. 110987, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956713524007047>
- SONG, K.; MOHSENI, M.; TAGHIPOUR, F. Mechanisms investigation on bacterial inactivation through combinations of UV wavelengths. *Water Research*, v. 163, p. 114875, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135419306414>
- SRIVASTAVA, P. K.; SIT, N. A review on fruit and vegetable processing using traditional and novel methods. *Future Postharvest and Food*, 2024. Disponível em: <https://iadns.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fpf2.12046>
- TEIXEIRA, A. A. Thermal Processing for Food Sterilization and Preservation. *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering*, p. 499-523, 2019. Elsevier. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128148037000208>
- TIMMERMANS, R. A. H.; MASTWIJK, H. C.; BERENDSEN, L. B. J. M.; NEDERHOFF, A. L.; MATSER, A. M.; VAN BOEKEL, M. A. J. S.; NIEROP GROOT, M. N. Moderate intensity Pulsed Electric Fields (PEF) as alternative mild preservation technology for fruit juice. *International Journal of Food Microbiology*, v. 298, p. 63-73, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168160519300406>

- TORRENTS-MASOLIVER, B.; JOFRÉ, A.; RIBAS-AGUSTÍ, A.; BOVER-CID, S. Enumeration Agar, Acid Exposure and Sampling Time Are Relevant Factors Accounting for the High-Pressure Inactivation of Vegetative Pathogens in Fruit Puree. **Foods**, v. 13, n. 16, p. 2600, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/16/2600>
- USMAN, I.; AFZAAL, M.; IMRAN, A.; SAEED, F.; AFZAL, A.; ASHFAQ, I.; SHAH, Y. A.; ISLAM, F.; AZAM, I.; TARIQ, I.; ATEEQ, H.; ASGHAR, A.; FAROOQ, R.; RASHEED, A.; ASIF SHAH, M. Recent updates and perspectives of plasma in food processing: a review. **International Journal of Food Properties**, v. 26, n. 1, p. 552-566, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2023.2171052>
- VIEIRA, C. C. P. **Bacteriocinas**: uma alternativa promissora na bioconservação de alimentos, 2021. UFRJ.
- WANG, Q.; ZHANG, M.; ADHIKARI, B.; CAO, P.; YANG, C. Effects of various thermal processing methods on the shelf-life and product quality of vacuum-packaged braised beef. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, n. 4, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpe.13035>
- WANG, X.; JING, P.; CHEN, C.; WU, J.; CHEN, H.; JIAO, S. Research progress on microbial control techniques of prepared dishes. **Food Physics**, v. 1, p. 100015, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2950069924000094>
- WARD, D. M.; PATRAS, A.; KILONZO-NTHENGE, A.; YANNAM, S. K.; PAN, C.; XIAO, H.; SASGES, M. UV-C treatment on the safety of skim milk: Effect on microbial inactivation and cytotoxicity evaluation. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, n. 4, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpe.12944>
- WATTANAYON, W.; UDOMPIJITKUL, P.; KAMONPATANA, P. Ohmic heating of a solid-liquid food mixture in an electrically conductive package. **Journal of Food Engineering**, v. 289, p. 110180, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877420302776>
- WAZIIROH, E.; SCHOENLECHNER, R.; JAEGER, H.; BRUSADELLI, G.; BENDER, D. Understanding gluten-free bread ingredients during ohmic heating: function, effect and potential application for breadmaking. **European Food Research and Technology**, v. 248, n. 4, p. 1021–1034, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s00217-021-03942-4>
- YAMAMOTO, K. Food processing by high hydrostatic pressure. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 81, n. 4, p. 672-679, 2017. Disponível em: <https://academic.oup.com/bbb/article/81/4/672/5954510>
- ZHANG, C.; LUO, Y.; DENG, Z.; DU, R.; HAN, M.; WU, J.; ZHAO, W.; GUO, R.; HOU, Y.; WANG, S. Recent advances in cold plasma technology for enhancing the safety and quality of meat and meat products: A comprehensive review. **Food Research International**, p. 115701, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996925000377>
- ZHANG, X.; ZUO, Z.; ZHANG, XINXIA; LI, T.; WANG, L. Pre-gelatinization phenomenon and protein structural changes in rice quality modification by superheated steam treatment. **Food Bioscience**, v. 59, p. 103989, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221242922400419X>
- ZHANG, Y.; PANDISELVAM, R.; ZHU, H.; SU, D.; WANG, H.; AI, Z.; KOTHAKOTA, A.; KHANEGHAH, A. M.; LIU, Y. Impact of radio frequency treatment on textural properties of food products: An updated review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 124, p. 154-166, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224422001443>
- ZHANG, Z.; LI, J.; WANG, X.; *et al.* Enhancement of physicochemical properties and baking quality of broken rice flour through superheated steam. **Grain & Oil Science and Technology**,

v. 7, n. 4, p. 229-236, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590259824000542>

ZHANG, Z.; SU, T.; ZHANG, S. Shape Effect on the Temperature Field during Microwave Heating Process. **Journal of Food Quality**, v. 2018, p. 1-24, 2018. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/jfq/2018/9169875/>