

AQUECIMENTO ÔHMICO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA: Uma revisão sistemática da literatura

Alvino de Oliveira Junior¹

Ernesto Quast²

Gustavo Henrique Fidelis dos Santos³

Martinho Machado Junior⁴

Vivian Machado de Menezes⁵

Resumo: Um dos maiores desafios para a indústria alimentícia está relacionado à segurança alimentar, ao aumento do tempo de prateleira, à uniformidade do aquecimento e à preservação das características nutricionais e sensoriais dos alimentos. Com base nesta problemática, o presente trabalho tem como objetivo apresentar estudos de aplicação do aquecimento ôhmico na indústria alimentícia, bem como das grandezas físicas térmicas e elétricas envolvidas no processo. A pesquisa bibliográfica e seleção de fontes foram fundamentadas na metodologia sistemática de busca e análise, sendo consultadas as bases de dados eletrônicas *Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar* e *ScienceDirect*, priorizando artigos no período de 2020 a 2024. Os resultados da pesquisa bibliográfica demonstram o aquecimento ôhmico como uma tecnologia inovadora, capaz de gerar calor rápido e uniforme no alimento, superando os métodos tradicionais em eficiência energética e preservação de características nutricionais e sensoriais de alimentos, como sucos e carnes. Do ponto de vista da sustentabilidade ambiental, a combinação com fontes de energia renováveis pode consolidar essa tecnologia como uma excelente alternativa aos métodos convencionais de processamento térmico, mitigando os impactos ambientais associados à sua utilização. Para viabilizar sua implementação, recomenda-se a criação de equipamentos mais acessíveis, a realização de projetos piloto em indústrias de pequeno e médio porte e a capacitação de profissionais e usuários para operar equipamentos de aquecimento ôhmico. Dessa forma, o aquecimento ôhmico apresenta grande potencial de se tornar um padrão na indústria de alimentos, impulsionando a inovação e a sustentabilidade na produção.

Palavras-chave: Processamento Térmico Emergente; Transferência de Calor; Sustentabilidade ambiental; Eficiência Energética

¹ Graduado em Engenharia Elétrica pela Faculdade Guarapuava – FG, Guarapuava – PR. Pós Graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Estácio de Sá - RJ. Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela UFFS, campus Laranjeiras do Sul - PR alvino.junior@estudante.uffs.edu.br

² Dr. UFFS. Professor Associado. ernesto.quast@uffs.edu.br

³ Dr. UFFS. Professor Adjunto. gustavo.fidelis@uffs.edu.br

⁴ Dr. UFFS. Professor Associado. martinho.machado@uffs.edu.br

⁵ Dra. Universidade Federal do Pampa, campus Itaqui. Professora Adjunta. demenezes.vivian@gmail.com

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimentos seguros e com maior vida útil tem impulsionado a busca por métodos eficientes de conservação. Dentre as diversas técnicas existentes como refrigeração, congelamento e processamento por micro-ondas (Laguerre; Hamoud-Agha, 2019; Moreira, 2015), os processamentos térmicos desempenham um papel crucial na inativação de micro-organismos e enzimas, garantindo a segurança e a qualidade dos produtos alimentícios. Os métodos térmicos convencionais, como o cozimento, a pasteurização e a esterilização, baseiam-se na transferência de calor por condução, convecção ou radiação (Nascimento; Reis; Rebello 2014). Apesar de sua ampla utilização, esses métodos podem apresentar limitações em termos de uniformidade do aquecimento e preservação das características nutricionais e sensoriais dos alimentos, especialmente em produtos com fases sólidas e líquidas.

Nesse contexto, o aquecimento ôhmico emerge como uma tecnologia alternativa promissora para o processamento térmico de alimentos. Este método inovador consiste na passagem de uma corrente elétrica diretamente através do alimento, gerando calor de maneira rápida e uniforme em toda a sua extensão. Embora os princípios do aquecimento ôhmico tenham sido investigados desde o século XIX, seu desenvolvimento e aplicação industrial ganharam impulso a partir da década de 1980 (Nascimento; Reis; Rebello, 2014). Apesar de demonstrar potencial para diversas aplicações, como descongelamento, cocção, concentração e pasteurização, e apresentar vantagens como a preservação da qualidade dos alimentos e a alta eficiência energética, ainda são necessários estudos que explorem, de forma aprofundada, sua comparação com os métodos tradicionais em diferentes tipos de alimentos.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar estudos de aplicação do aquecimento ôhmico na indústria alimentícia, bem como das grandezas físicas térmicas e elétricas envolvidas no processo.

1 METODOLOGIA

A pesquisa bibliográfica e seleção de fontes foi fundamentada na metodologia sistemática de busca e análise, composta das etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão (Creswell, J.W; Creswell, J.D., 2021).

A etapa da identificação iniciou com a busca sistemática nas bases de dados *Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar* e *ScienceDirect*. Para refinar a seleção de artigos, a busca foi conduzida utilizando a combinação estratégica dos seguintes termos-chave e operadores booleanos: ("aquecimento ôhmico" or "ohmic heating") and ("indústria alimentícia") or ("food industry") or ("processamentos térmicos alimentícios"), que forneceu um total de 634 artigos (*Scopus*: 165; *Web of Science*: 128; *Google Scholar*: 320; *ScienceDirect*: 21).

Após a compilação dos resultados, foram excluídos 241 artigos, resultando em 393 artigos únicos. Após isso, realizou-se a triagem inicial com base na leitura dos títulos e resumos, considerando preferencialmente o período de 2020 a 2024, sendo excluídos 312 artigos por não atenderem aos critérios de inclusão, como por exemplo artigos que apresentavam foco em aplicações não alimentícias, restando 81 artigos à etapa de elegibilidade. Nesta etapa, os artigos foram submetidos à leitura integral, sendo que 62 artigos foram excluídos pelos seguintes motivos:

- a) Foco exclusivo em modelagem teórica ou simulações sem validação experimental em alimentos (22 artigos);
- b) Texto completo indisponível para download (8 artigos);
- c) Estudo de caso focado exclusivamente em propriedades de materiais (eletrodos), semicondutores e metais sem análise direta do alimento (12 artigos);
- d) Dados insuficientes para extração de informações relevantes sobre conceitos ou aplicações do aquecimento ôhmico (20 artigos).

Na etapa de inclusão 19 estudos foram considerados elegíveis e incluídos na análise qualitativa deste estudo bibliográfico. Para contextualizar o desenvolvimento histórico e os fundamentos da técnica, 13 referências seminais e livros-texto clássicos, como por exemplo Mckelvey & Grotch (1979), Singh & Heldman (2008), Knirsch (2011) e Leite et al. (2015) foram incluídos de forma complementar, totalizando 32 referências no corpus de análise.

Além disso, nas seções de discussão e conclusão, será desenvolvida uma análise aprofundada da literatura. A discussão se concentrará em interpretar os dados emergentes da revisão, estabelecendo comparações entre os estudos analisados e identificando tendências e lacunas existentes na pesquisa sobre aquecimento ôhmico. Serão considerados também os diferenciais encontrados entre as referências e as limitações da presente revisão e recomendações para futuras investigações. A seção

de conclusão, por sua vez, apresentará os principais resultados da revisão, reforçando o potencial de aplicação do aquecimento ôhmico em pesquisa e sugerindo possíveis aplicações práticas identificadas nos estudos para a indústria de alimentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSAMENTOS TÉRMICOS NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

A necessidade de otimização na produção é uma realidade inevitável e irreversível e vem sendo buscada cada vez mais pelas indústrias de alimentos. Os processamentos térmicos estão entre os métodos comumente aplicados dentro da indústria alimentícia e apresentam resultados muito satisfatórios na preservação dos alimentos, fazendo com que o produto obtenha uma vida útil maior, devido à possibilidade de destruição ou inativação de enzimas indesejáveis, eliminação de agentes patogênicos, além da possibilidade de uma maior preservação de propriedades sensoriais e nutricionais dos alimentos em virtude da diminuição da taxa das reações químicas e bioquímicas no alimento. Apesar de trazer inúmeras vantagens, o processamento térmico pode acarretar em desuniformidade das características sensoriais e nutricionais. O problema é acentuado em alimentos sólidos de grandes dimensões, pois nestes casos é observada uma diferença significativa da cinética de aquecimento nas partes externas e internas do produto. As partes externas são geralmente expostas ao meio de aquecimento, sendo rapidamente aquecidas e resfriadas. O ponto frio (em peças sólidas corresponde ao centro geométrico) é a localização onde a inércia térmica é máxima, isto é, a taxa de aumento e decréscimo de temperatura é mínima. Consequências desses diferentes comportamentos podem ser a perda nutricional ou queima das superfícies externas, ou o sub-processamento térmico no ponto frio do produto, o que tornará o produto não seguro para o seu consumo. As técnicas de tratamento térmico dos alimentos se relacionam com as formas de transferência de calor. Portanto, é cada vez mais necessário buscar por tecnologias e métodos para aumentar a eficiência dos processamentos térmicos (Giuliangeli, 2021) .

Os processamentos térmicos são classificados na literatura em convencionais e emergentes. Denominam-se processamentos térmicos convencionais aqueles que utilizam meios de transferência de calor de uma maneira mais tradicional, sendo a transferência de calor do meio para o produto realizada por condução, convecção ou

radiação. Eles podem ocorrer tanto em alimentos em fases líquidas como em fases sólidas, compreendendo, assim, uma grande gama de diferentes tipos de alimentos. Um exemplo bem prático disso é a esterilização do leite, na qual o produto é aquecido em um trocador de calor, com o aquecimento indireto com vapor saturado a temperaturas superiores a 143°C. Neste caso, o vapor transfere energia térmica por convecção para a placa metálica, ocorre um fluxo de energia na forma de calor através da placa por condução e este é transferido da placa para o leite por convecção, acarretando em um elevado fluxo de calor. A consequência é que para efeitos de dimensionamento, a temperatura do leite passa instantaneamente de 4°C (armazenamento refrigerado) para 143°C (temperatura de esterilização), permanecendo por até 3 segundos, quando em seguida procederá ao seu resfriamento até a temperatura ambiente e envase, em ambiente asséptico para evitar recontaminação. Dessa forma, é possível eliminar esporos de microrganismos patogênicos e preservar a maior parte dos nutrientes da matéria prima (Dos Santos et al., 2024; Ribeiro, 2020).

Outros produtos alimentícios submetidos ao processamento térmico após embalados, não conseguem passar por trocadores de calor. Neste caso, a cinética de aquecimento do ponto frio do produto definirá os parâmetros de tempo e temperatura para garantir a estabilidade microbiológica do produto. Conforme apresentado anteriormente, o uso de temperaturas muito elevadas podem acarretar em defeitos no produto, tendo em vista que a taxa de aquecimento para o processamento térmico adequado no ponto frio dependerá de fatores como a resistência à condução e/ou por convecção no alimento, além das dimensões e geometria do produto. Nestes casos, tendo em vista que tradicionalmente o alimento será aquecido sempre de fora para dentro, o tempo e os defeitos decorrentes do processamento térmico estão intimamente ligados ao estado físico do alimento e geometria do produto. O mecanismo de condução de calor em alimentos é geralmente significativamente mais lenta, quando comparada à convecção. No caso de alimentos embalados, o aquecimento por radiação não é relevante, tendo em vista que da embalagem para dentro as propriedades termofísicas do alimento exercerá maior influência que o aquecimento externo da embalagem (Quemelli, 2020; Ferreira Junior, 2021).

Por outro lado, os processamentos térmicos emergentes fazem uso de artifícios tecnológicos com a finalidade de promover a troca de calor nos alimentos.

Isto pode acontecer por maneiras distintas, como a irradiação de micro-ondas e o aquecimento ôhmico. Essas tecnologias são desenvolvidas, respeitando as legislações de garantia de segurança de alimentos e buscam também diminuição de impactos ambientais. Os procedimentos térmicos emergentes dependem de equipamentos complexos e para seu desenvolvimento, são necessários conhecimentos em física, química e eletrônica. Um exemplo de processamento térmico não convencional pode ser o cozimento por micro-ondas, onde o alimento interage com o campo elétrico produzido pelos micro-ondas, sendo aquecido de fora para dentro, mas com uma atuação a até 5 cm de profundidade, dependendo das propriedades dielétricas do alimento. Algumas pessoas podem ter a impressão que o forno micro-ondas aquece de dentro para fora devido ao fato da embalagem projetada para uso em fornos micro-ondas ser transparente à radiação de micro-ondas, ou seja, não se aquecer pela passagem dos micro-ondas ou pela influência do campo elétrico. Portanto, o alimento aquece-se de fora para dentro, mas a embalagem se aquece por condução, pelo alimento aquecido. Em virtude da elevada eficiência do aquecimento por micro-ondas, o tempo é reduzido, podendo ser insuficiente para o aquecimento da embalagem, levando a uma conclusão equivocada dos fundamentos do aquecimento por micro-ondas (Souza et al., 2024; Faustino, 2013).

O aquecimento ôhmico é um processo térmico que utiliza corrente elétrica para gerar calor diretamente no alimento, promovendo aquecimento uniforme e rápido. A diferença principal dessa tecnologia para todas as outras citadas anteriormente é que o aquecimento ôhmico é capaz de aquecer o alimento de dentro para fora, dependendo do desenho construtivo e passagem da corrente elétrica, pois o alimento atuará como uma resistência elétrica à passagem de corrente elétrica, quando submetida a uma diferença de potencial elétrico. Considerada uma tecnologia promissora na indústria alimentícia, suas origens encontram-se nos experimentos realizados no século XIX por James Prescott Joule, Jean-Baptiste Fourier e George Simon Ohm (Leite; Tribst; Cristianini, 2015). A tecnologia ganhou impulso na década de 1980 com novas pesquisas e o desenvolvimento de equipamentos para esterilização contínua e cozimento, consolidando-se na década de 1990 como uma alternativa viável para processamento térmico (Fellows, 2007).

Diferente dos métodos convencionais, nos quais a energia é transferida como calor por condução da superfície externa à interna do alimento, o aquecimento ôhmico

gera energia interna térmica de forma uniforme em todas as direções no interior do alimento. Esse processo permite o controle preciso da temperatura e do tempo, minimizando a degradação de compostos nutricionais e sensoriais (Gava, A; Frias; Gava, J.; Silva, 2023). A tecnologia é particularmente eficaz para alimentos com fases líquidas e sólidas, pois evita o sobreaquecimento de partes sensíveis, preservando a estrutura e a qualidade sensorial do produto (Nascimento; Reis; Rebello, 2014). Além disso, o aquecimento ôhmico minimiza a formação de superfícies quentes e o reprocessamento excessivo, devido à sua simplicidade e à reduzida área de contato com o alimento. Além disso, estudos sugerem ser uma técnica que não polui o meio ambiente e não gera resíduos industriais indesejáveis. Nesta perspectiva, o processo mantém uma alta eficiência energética, estimada acima de 90%, o que o torna compatível com as tendências atuais de sustentabilidade energética e ambiental (Pereira; Rodrigues; Teixeira, 2015).

Esta forma de processamento térmico possui diversas vantagens, quando comparada aos aquecimentos convencionais, onde o alimento sofre a variação de temperatura de maneira gradativa, iniciando pela superfície externa, e atingindo o interior por condução. No aquecimento ôhmico, a energia térmica é gerada em todas as direções no interior do alimento, resultando em um aumento de temperatura mais uniforme e rápido, oferecendo o controle de forma eficiente, delimitando-se valores de temperaturas e tempos, resultando em um processo térmico mais eficiente e de melhor controle e uniformidade, quando comparado aos processamentos térmicos convencionais (Gava, A.; Frias; Gava, J.; Silva, 2023). Outra grande vantagem deste processamento térmico, é que ele preserva muito bem as estruturas dos alimentos e faz com que não haja grande degradação dos compostos nutricionais e sensoriais. Trata-se de uma técnica eficiente para alimentos que contêm fases líquidas e sólidas, pois imprime a mesma quantidade de aquecimento, evitando que as partes mais sensíveis sobreaqueçam primeiro (Nascimento; Reis; Rebello, 2014).

O aquecimento ôhmico destaca-se como um método versátil de processamento térmico, que contempla etapas como descongelamento, cocção, concentração e pasteurização de alimentos. Estudos recentes destacam seu emprego na estabilização de leveduras em produtos que demandam processos fermentativos e na inativação de microrganismos patogênicos e enzimas indesejadas, contribuindo para o aumento do tempo de prateleira dos produtos (Souza et al., 2024; Funcia; Gut;

Sastry, 2020). Dessa forma, a escolha do método térmico de aquecimento deve considerar as características específicas de cada alimento, uma vez que processos inadequados podem comprometer componentes nutricionais, como polifenóis e vitaminas, ou gerar resíduos indesejáveis, que podem gerar custos elevados para o seu tratamento (Alkanan et al., 2021).

Na indústria alimentícia o aquecimento ôhmico tem ganho maior destaque e aplicabilidade, por ser um processo rápido, uniforme e eficiente, quando comparado aos métodos tradicionais de processamento térmico. Além disso, quando integrado a fontes de energia renováveis, podemos classificá-lo em “limpo e renovável”, sem produzir algum tipo de resíduo indesejável (Leite; Tribst; Cristianini, 2015). No entanto, desafios como a manipulação segura de correntes elétricas e a necessidade de equipamentos especializados ainda limitam sua adoção em larga escala, especialmente devido aos custos iniciais de implementação.

Embora aplicado inicialmente na esterilização de leite entre 1910 e 1930, e ter enfrentado barreiras devido à falta de equipamentos comerciais e de protocolos de segurança, as pesquisas contínuas em aquecimento ôhmico e o desenvolvimento de soluções técnicas têm apresentado grande potencial de torná-lo em um padrão em processos térmicos, contribuindo para a inovação e a sustentabilidade na produção de alimentos (Pereira; Rodrigues; Teixeira, 2015).

2.2 FENÔMENOS E PROPRIEDADES FÍSICAS NO AQUECIMENTO ÔHMICO

Durante o processamento térmico por aquecimento ôhmico, ocorrem diversas alterações em grandezas físicas. Algumas são perceptíveis, como a elevação da temperatura, que provoca a emissão de vapores e a alteração na cor do alimento. Outras, porém, não são perceptíveis a olho nu, como a transferência de energia térmica por condução térmica através dos alimentos (Brizola; Fantin, 2016).

O aquecimento ôhmico consiste num método de processamento térmico que submete os alimentos à passagem de corrente elétrica durante um intervalo de tempo predefinido. Para a eficácia deste procedimento, é indispensável a utilização de equipamentos adequados, além de um sistema de controle eficiente para gerenciar as variáveis físicas e químicas do processo. Dessa forma, tem-se a garantia de uma distribuição de calor mais uniforme no interior do produto durante o processamento

térmico, que leva a várias vantagens em comparação aos métodos convencionais de processamento, como a preservação das estruturas dos alimentos, a minimização das perdas sensoriais e um custo de processamento reduzido. Neste tipo de processamento térmico, há grandezas físicas que devem ser consideradas e relacionadas às propriedades do alimento, como a condutividade térmica, a condutividade elétrica e a densidade, presentes naturalmente no alimento, além das grandezas elétricas, como a tensão elétrica, a corrente elétrica e a potência elétrica, inerentes ao processo de aquecimento (Dos Santos et al., 2024; Chaves, 2023).

Considerando um processo dominado pela condução térmica unidirecional, a taxa de transferência de calor ($\frac{dq}{dt}$), através de uma área de seção transversal (A), é modelada pela Lei de Fourier, conforme a Equação 1.

$$\frac{dq}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

De acordo com a Equação 1, pode-se observar que a taxa de transferência de calor é diretamente proporcional à condutividade térmica (k), à área (A) e à magnitude do gradiente de temperatura ($\frac{dT}{dx}$), propagando-se no sentido oposto ao gradiente de temperatura (Pálffy; Markó, 2014).

A partir da Lei de Fourier, pode-se determinar o comportamento da temperatura em função do tempo ao longo do alimento, sendo necessário aplicar um sistema de coordenadas adequado para geometria do alimento (Claus, 2013). Considerando que o alimento seja um material homogêneo e isotrópico e no formato de paralelepípedo, pode-se determinar o fluxo de calor a partir da Equação 2 em coordenadas retangulares (Claus, Borgnakke; Sonntag, 2013; Shankar Goud; Nandeppanavar, 2021).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial q}{\partial v} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

em que x , y , z correspondem às direções de propagação do calor, ρ à massa específica, c_p ao calor específico do alimento, $\frac{\partial q}{\partial v}$ ao termo de geração de calor volumétrica, que é obtido pela lei de Joule e pode ser expresso por $\frac{\partial q}{\partial t} = \sigma \cdot |E|^2$, onde σ à condutividade elétrica e $|E|$ ao módulo do vetor campo elétrico.

A condutividade térmica é, de fato, uma propriedade intrínseca que varia conforme a composição e a estrutura do material, incluindo fatores como densidade, umidade e fase (sólida, líquida ou gasosa) (Claus, Borgnakke; Sonntag, 2013).

Além da condutividade térmica, outra grandeza física importante no processo do aquecimento ôhmico é a capacidade térmica do alimento, sendo esta uma propriedade extensiva da matéria, sendo a quantidade de energia, transferida como calor, necessária para variar a temperatura do alimento, conforme a Equação 3.

$$C = \frac{Q}{\Delta T}, \quad (3)$$

sendo C a capacidade térmica, Q a quantidade total de energia transferida na forma de calor que o corpo recebeu e ΔT a variação da temperatura.

Por se tratar de uma propriedade extensiva da matéria, a capacidade térmica encontra-se relacionada com a massa do alimento e o calor específico, sendo esta uma propriedade intensiva da matéria, definida pela Equação 4.

$$c_p = \frac{C}{m}, \quad (4)$$

em que c_p e m correspondem, respectivamente, ao calor específico e à massa do alimento a ser aquecido.

Com base nas Equações (3) e (4), obtém-se a Equação (5), que determina a quantidade de energia mínima (Q) necessária para provocar o aumento da temperatura do alimento por aquecimento ôhmico.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5)$$

Quando estima-se o tempo necessário para que o alimento atinja uma temperatura final (Oliveira, 2005), em conjunto com a quantidade de calor calculada pela Equação 5, torna-se possível calcular a potência térmica mínima necessária para que o processo térmico seja realizado, conforme a Equação 6.

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \quad (6)$$

em que P e Δt correspondem, respectivamente, à potência e ao intervalo de tempo para que ocorra o aquecimento do alimento.

É justamente a partir da potência térmica mínima necessária para aquecer o alimento que inicia-se o desenvolvimento do circuito elétrico necessário para o processo de aquecimento ôhmico.

Em termos de grandezas físicas elétricas, a condutividade elétrica é uma grandeza intrínseca aos alimentos e encontra-se relacionada diretamente à composição, que varia durante o processamento térmico com a elevação da temperatura. Em termos experimentais, para determinar a condutividade elétrica dos alimentos, se faz necessário variar a diferença de potencial e medir a respectiva corrente elétrica ao longo do tempo, sendo este a clássica experiência realizada por George Simon Ohm, em 1826 (Mckelvey; Grotch, 1979), conforme as Equações 7 e 9.

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (7)$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}, \quad (8)$$

em que ΔV corresponde à diferença de potencial elétrico, R a resistência elétrica do alimento, ΔI a variação da corrente elétrica, ρ a resistividade, l o comprimento e A a área da secção transversal perpendicular à corrente elétrica (Samaranayake; Sastry; Zhang, 2005; Alkanan, 2021; Bauer, Wolfgang; Westfall, Gary; Dias, 2012).

Outra grandeza física importante é a condutividade elétrica dos alimentos, σ , sendo esta inversamente proporcional à resistividade elétrica, conforme a Equação 9 (Wattanayon; Udompijitkul; Kamonpatana, 2021).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (9)$$

A medida da condutividade elétrica do alimento ao longo do tempo permite controlar a diferença de potencial nas extremidades dos eletrodos em contato com o alimento, que faz variar a corrente elétrica e, consequentemente, provoca a elevação de temperatura. Os processos de aquecimento ôhmico aplicam-se em condutividades elétricas na faixa de 0,01 Sm/m a 10 Sm/m, que abrange uma grande quantidade de alimentos em fases líquidas e sólidas (Banti, 2020).

3 DISCUSSÕES

O processo de revisão sistemática resultou na seleção de 19 artigos, cuja análise conjunta oferece uma visão ampla sobre os desafios, vantagens e perspectivas da tecnologia de aquecimento ôhmico. No Quadro 1, tem-se estruturado

um resumo das contribuições mais significativas da literatura, organizando-as em torno dos pontos de concordância entre os autores, dos desafios tecnológicos e das divergências teóricas que permeiam sobre o tema em estudo.

Autor(es)	Principais contribuições	Convergências/Divergências sobre o aquecimento ôhmico
Gava, A.; Silva, C. A. B.; Frias, J. R. G. (2023)	Afirma a necessidade de mais estudos comparativos entre o aquecimento ôhmico e métodos tradicionais para uma maior variedade de alimentos e destaca o aquecimento ser mais uniforme e rápido.	Concorda com a superioridade técnica do aquecimento ôhmico. Sugere que a validação do sistema de aquecimento ôhmico ainda não é universal para todos os tipos de alimentos.
Leite, T. S.; Tribst, A.; Cristianini, M. (2015)	Reconhece o processo como promissor, mas destaca que a falta de conhecimento tecnológico e os altos custos iniciais limitam sua disseminação.	Afirma o potencial da tecnologia. Traz uma perspectiva histórica e econômica que modera o otimismo, focando nos desafios práticos de implementação que limitaram sua adoção.
dos Santos, I. F. et al. (2024)	Demonstra que o aquecimento ôhmico causa menor taxa de desnaturação em proteínas do soro do leite em comparação com o aquecimento convencional indireto.	Fornece evidências concretas e específicas (no caso de laticínios) sobre a vantagem do aquecimento ôhmico na preservação de componentes nutricionais sensíveis.
Funcia, E. S.; Gut, J. A. W.; Sastry, S. K. (2020)	Investiga os efeitos não térmicos do campo elétrico, como a inativação microbiana e enzimática, que podem oferecer benefícios adicionais ao processo.	Explora as vantagens multifacetadas da tecnologia. Aborda uma área ainda em debate na literatura, apontando que a magnitude e os mecanismos desses efeitos ainda demandam mais investigação.
Alkanan, Z. T. et al. (2021)	Destaca a versatilidade de aplicações do aquecimento ôhmico, incluindo extração de compostos, estabilização de farelo de arroz e descascamento de frutas.	Reforça a visão de que a tecnologia é amplamente aplicável em diversas áreas da indústria alimentícia, para além da simples pasteurização ou cozimento.

Pereira, R. N.; Rodrigues, R. M.; Teixeira, J. A. (2015)	Aponta a alta eficiência energética do processo (acima de 90%) e o potencial de controlar propriedades texturais em nanoescala, como em géis de proteína.	Quantifica uma das principais vantagens sendo a eficiência energética e sugere a técnica para aplicações inovadoras no desenvolvimento de ingredientes com funcionalidades aprimoradas.
Banti, M. (2020) e Pálffy, N.; Markó, L. (2014)	Ressaltam a complexidade de medir em tempo real a condutividade elétrica dos alimentos, que varia com a temperatura e composição, tornando a otimização um desafio específico para cada produto.	Concordam com a eficácia do processo. A otimização do processo não é universal, mas sim dependente das propriedades intrínsecas e dinâmicas de cada alimento.

Quadro 1 - Resumo dos principais trabalhos e contribuições sobre aquecimento ôhmico

De acordo com os dados apresentados no Quadro 1, observa-se um cenário coeso sobre o potencial do aquecimento ôhmico, mas igualmente destacam-se os desafios práticos e as fronteiras de conhecimento que ainda necessitam de maior investigação. Além disso, tem-se o antagonismo existente na superioridade técnica do processo de aquecimento ôhmico e os desafios que direcionam as pesquisas futuras.

Em relação às referências apresentadas no Quadro 1, pode-se destacar os seguintes pontos de convergência:

- Mecanismo de aquecimento eficiente: a geração interna de energia térmica resulta em um aquecimento rápido e uniforme, eliminando a dependência da lenta transferência de calor por condução ou convecção, sendo esta uma característica dos métodos tradicionais;
- Preservação da qualidade do produto: vários estudos corroboram que o processo minimiza a degradação de compostos nutricionais e sensoriais em comparação aos métodos tradicionais. Um exemplo específico, conforme os estudos de dos Santos et al. (2024) e Knirsch (2010), é a menor taxa de desnaturação de proteínas do soro do leite quando comparado ao aquecimento indireto;

- c) Alta eficiência energética e sustentabilidade: A eficiência do processo, estimada acima de 90%, é consistentemente apontada como uma vantagem significativa. Adicionalmente, a possibilidade de integração com fontes de energia renováveis posiciona a tecnologia como uma alternativa sustentável, capaz de mitigar impactos ambientais;
- d) Versatilidade de aplicações: A aplicabilidade da tecnologia é vasta, abrangendo desde a pasteurização de leite e sucos até o cozimento de carnes, extração de compostos e estabilização de produtos. Adicionalmente, a combinação do processamento térmico com campos elétricos demonstra potencial para o desenvolvimento de ingredientes com funcionalidades aprimoradas, como o controle de propriedades texturais de géis de proteína em nanoescala (Pereira; Rodrigues; Teixeira, 2015).

Por outro lado, observam-se no Quadro 1 as divergências e os desafios referentes à viabilidade prática, à otimização do processo e à compreensão de fenômenos secundários.

Embora o potencial teórico versus viabilidade econômica seja amplamente reconhecido, autores como Leite, Tribst e Cristianini (2015) e Nascimento, Reis e Rebello (2014) apresentam uma perspectiva histórica e pragmática, destacando que os elevados custos iniciais e a falta de conhecimento tecnológico foram barreiras significativas para a disseminação da tecnologia. A necessidade de estudos de viabilidade econômica para aplicação em escala comercial e industrial continua a ser um ponto crítico deste tema de pesquisa (Chaves, 2023).

Em relação ao contexto teórico e técnico de aplicabilidade ao aquecimento de alimentos, tem-se que a otimização do processo não é universal, pois a condutividade elétrica — propriedade fundamental para o aquecimento — varia significativamente com a composição e a temperatura de cada alimento. Este desafio técnico, ressaltado por autores como Banti (2020) e Pálffy & Markó (2014), implica que cada produto demanda de parâmetros específicos para garantir a eficiência e segurança do processo de aquecimento ôhmico. Além disso, se por um lado os benefícios do aquecimento rápido são indiscutíveis, a existência e a magnitude de efeitos não térmicos, como a inativação microbiana pelo campo elétrico, ainda constituem uma fronteira de pesquisa. Embora estudos como o de Funcia, Gut e Sastry (2020) explorem esses benefícios adicionais, a literatura aponta que a validação desses

mecanismos ainda demanda mais investigação experimental. Por fim, uma limitação transversal identificada reside na heterogeneidade das metodologias e na ausência de protocolos padronizados nos estudos analisados, que dificulta análises comparativas robustas e reforça a recomendação para que futuras pesquisas busquem unificar os métodos de avaliação para validar a viabilidade técnica e econômica da tecnologia.

Mesmo com vários desafios referentes à escala de aplicação do aquecimento ôhmico, Alkanan et al. (2021); Leite, Tribst e Cristianini (2015) o consideram como uma tecnologia emergente e promissora no processamento de alimentos. Além disso, os resultados das pesquisas convergem em destacar a capacidade do aquecimento ôhmico de proporcionar um aquecimento rápido e uniforme, resultante da geração interna de energia térmica, sendo o alimento a resistência elétrica do sistema de carga (Bauer; Westfall; Dias, 2012; Samaranayake; Sastry; Zhang, 2005). Essa característica intrínseca elimina a dependência de fontes externas de calor, diferenciando-o dos métodos convencionais que normalmente dependem somente de condução ou convecção como mecanismos de propagação térmica (Fellows, 2007; Singh; Heldman, 2008).

Após estabelecer a comparação com métodos tradicionais, a fronteira da pesquisa em aquecimento ôhmico concentra-se tanto na otimização do processo quanto na exploração de seus efeitos secundários. No campo da otimização, observam-se propostas de inovação, como a técnica de aquecimento ôhmico pulsado, que tem por objetivo minimizar reações eletroquímicas adversas (Samaranayake; Sastry; Zhang, 2005). Paralelamente, investiga-se a interação do próprio campo elétrico com os componentes alimentares em nível molecular (Shankar Goud; Nandeppanavar, 2021) e seus possíveis efeitos não térmicos (Ferreira Junior, 2021; Souza et al., 2024). Embora ainda haja debate sobre a magnitude e os mecanismos desses efeitos, estes estudos poderiam oferecer benefícios adicionais, como a inativação microbiana e enzimática para além daquela causada pelo calor (Funcia; Gut; Sastry, 2020).

No que se refere ao fluxo térmico no interior do alimento, considerando-o sólido, a condução térmica é fundamental para modelar a distribuição de calor no

alimento após a geração interna de calor por aquecimento ôhmico (Claus, Borgnakke; Sonntag, 2013).

A partir do presente estudo bibliográfico, pode-se identificar diversas possibilidades de aplicações do aquecimento ôhmico, que demonstram a versatilidade desta tecnologia, como, por exemplo, a pasteurização de leite e sucos, o processo de descongelamento e cozimento de produtos cárneos (Ribeiro, 2020; Wattanayon; Udompijitkul; Kamonpatana, 2021), a extração de compostos, a estabilização de farelo de arroz e o descascamento de frutas (Faustino, 2013; Alkanan et al., 2021). Por outro lado, essas pesquisas apontam a necessidade de investigações direcionadas à otimização de sua aplicação em cada caso específico (Creswell; Creswell, 2021).

Em termos gerais, a presente revisão possibilitou identificar os desafios metodológicos que dificultam o estabelecimento de paralelismo entre os estudos sobre aquecimento ôhmico. Dessa forma, tem-se a necessidade de realizar investigações comparativas mais aprofundadas para uma maior variedade de alimentos (Gava; Frias; Gava; Silva, 2023), bem como de superar dificuldades técnicas, como a medição da condutividade elétrica em tempo real, que torna a otimização dependente de cada produto (Banti, 2020; Pálffy; Markó, 2014). Essa heterogeneidade metodológica se apresenta como um desafio para a realização de análises robustas (Brizola; Fantin, 2016). Nesse sentido, recomenda-se que futuras investigações contribuam na padronização de protocolos experimentais, a fim de validar de forma conclusiva a viabilidade técnica, econômica e o impacto real desta tecnologia na indústria de alimentos (Sain et al., 2024).

CONCLUSÕES

O presente estudo objetivou analisar e apresentar o processo de aquecimento ôhmico na indústria de alimentos, discutindo as grandezas térmicas e elétricas envolvidas nesse processo. A presente revisão bibliográfica corrobora que aquecimento ôhmico é uma tecnologia inovadora e de grande potencial para o processamento térmico de alimentos nas escalas laboratorial, industrial e residencial, pois se distingue pela capacidade de gerar calor de forma rápida e uniforme diretamente no interior do alimento. A análise da literatura permitiu identificar tais potenciais aplicações e proporcionou um melhor entendimento sobre o

comportamento das propriedades do alimento e a influência das propriedades físicas no processo.

Os experimentos revelam que essa técnica supera os métodos térmicos tradicionais ao promover maior eficiência energética e preservar características nutricionais e sensoriais de diversos produtos, como leites, sucos, carnes e alimentos com fases sólidas e líquidas. O aquecimento ôhmico foi classificado como versátil em aplicações que vão desde pasteurização e cocção até extração de compostos bioativos e estabilização de produtos, enquanto a possibilidade de efeitos não térmicos desta tecnologia abre novas perspectivas para a inativação de microrganismos e enzimas. Contudo, desafios como a variabilidade da condutividade elétrica dos alimentos, a necessidade de equipamentos especializados e a falta de padronização em estudos comparativos ainda limitam sua adoção em escala industrial.

Para superar essas dificuldades, se faz necessário investir em pesquisas que otimizem os parâmetros do processo para diferentes tipos de alimentos e desenvolvam métodos de monitoramento não invasivos. A ausência de protocolos padronizados e a heterogeneidade dos estudos analisados reforçam a necessidade de abordagens futuras mais unificadas. Apesar dessas limitações, o aquecimento ôhmico demonstra ser uma solução promissora para atender à crescente demanda por alimentos seguros, de alta qualidade e produzidos de forma sustentável.

Dessa forma, a partir de novas pesquisas, o aquecimento ôhmico pode transformar a indústria alimentícia ao ser integrado em linhas de produção de alimentos heterogêneos, como sopas, molhos e produtos enlatados, garantindo uniformidade no aquecimento e maior vida de prateleira. Sua aplicação em processos como pasteurização de bebidas e cozimento de alimentos cárneos pode elevar a qualidade sensorial e nutricional dos produtos, enquanto a extração de compostos bioativos oferece oportunidades para o desenvolvimento de ingredientes funcionais.

Sob a ótica da sustentabilidade ambiental, a combinação do aquecimento ôhmico com fontes de energia renováveis pode consolidá-lo como uma excelente alternativa aos métodos convencionais de processamento térmico, mitigando os

impactos ambientais associados à sua utilização. Para viabilizar sua implementação, recomenda-se desenvolver equipamentos mais acessíveis, realizar projetos-piloto em indústrias de pequeno e médio porte e capacitar profissionais e usuários para a operação desses sistemas. Dessa forma, essa tecnologia apresenta grande potencial de se tornar um padrão na indústria alimentícia, impulsionando a inovação e a produção sustentável.

Para trabalhos futuros, sugere-se um estudo dos tipos de equipamentos de aquecimento ôhmico existentes nos níveis experimental e comercial, a fim de identificar seus aspectos construtivos, de engenharia e limites de funcionamento. Além disso, recomenda-se o estudo experimental de um sistema de aquecimento ôhmico de baixo custo de produção que possa ser aplicado em escala comercial.

REFERÊNCIAS

- ALKANAN, Z. T. et al. Ohmic heating in the food industry: Developments in concepts and applications during 2013–2020. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 6, 2021.
- BANTI, M. Review on Electrical Conductivity in Food, the Case in Fruits and Vegetables. **World Journal of Food Science and Technology**, v. 4, n. 4, p. 80, 2020.
- BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. **Física para Universitários: Eletricidade e Eletromagnetismo**. São Paulo: AMGA, 2012.
- BRIZOLA, J.; FANTIN, N. Revisão Da Literatura E Revisão Sistemática Da Literatura. **Revista de Educação do Vale do Arinos**, v. 3, p. 23–39, 2016.
- CHAVES, D. G. Controle Térmico e Consumo Elétrico dos Controles Fuzzy e ON / Off em uma Célula de aquecimento ôhmico. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2023. **Anais eletrônicos do ConBRepro 2023**. Disponível em: https://aprepro.org.br/conbrepro/anais/2023/arquivos/10022023_191005_651b3ddd9efa1.pdf. Acesso em 29 abr. 2025.
- CLAUS, B.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 8. ed. São Paulo: Norte Americana, 2013.

CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021.

DOS SANTOS, I. F. et al. Ohmic Heating in Food Processing: An Overview of Plant-Based Protein Modification. **Processes**, v. 12, n. 9, p. 1800, 2024.

FAUSTINO, R. C. S. **Processos Emergentes de Produção e Conservação de Alimentos**. Portugal, 2013, 164 p. Tese (doutorado) – Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia no Processamento de Alimentos**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

FERREIRA JUNIOR, L. DA S. **Aplicação de Campos Elétricos Pulsados de Alta Intensidade na Conservação do Suco de Laranja**, 2021. 75f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

FUNCIA, E. S.; GUT, J. A. W.; SASTRY, S. K. Effect of Electric Field on Pectinesterase Inactivation During Orange Juice Pasteurization by Ohmic Heating. **Food and Bioprocess Technology**, v. 13, n. 7, p. 1206–1214, 2020.

GAVA, A. J.; SILVA, C. A. B; FRIAS, J. R. G.,. **Tecnologia de Alimentos Princípios e Aplicações**. São Paulo: Nobel, 2023.

GIULIANGELI, V. C. **Estudo comparativo entre o aquecimento ôhmico e convencional aplicado em polpa de goiaba vermelha**. 2021. 95 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2021.

KNIRSCH, M. C. **Construção de sistema de aquecimento ôhmico e verificação comparativa do comportamento da proteína verde fluorescente e da bacteriocina nisina quando sob aquecimento convencional e ôhmico**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/9/9135/tde-05082011-173438/>. Acesso em: 29 abr. 2025.

LAGUERRE, J.-C.; HAMOUD-AGHA, M. M. Microwave heating for food preservation.

In: PEREZ, Néstor Montilla (ed.). **Food Processing for Increased Quality and Consumption**. London: IntechOpen, 2019.

LEITE, T. S.; TRIBST, A.; CRISTIANINI, M. Possibilidades e Desafios no Uso de Aquecimento Ôhmico para o Processamento de Alimentos. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 35, n. 2, p. 1–14, 2015.

MCKELVEY, J. P.; GROATCH, H. **Física 3**. 1. ed. São Paulo: Harper & Row do Brasil Ltda., 1979.

MOREIRA, C. Conservação dos alimentos pelo frio. **Revista de Ciência Elementar**, v. 3, n. 3, 2015.

NASCIMENTO, K. DE O.; REIS, I. P.; REBELLO, F. DE F. P. Utilização do aquecimento ôhmico no processamento de alimentos. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 5, p. 62–67, 2014.

OLIVEIRA, M. J. DE. **Termodinâmica I**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

PÁLFY, N.; MARKÓ, L. Effect of composition and microwave radiation on electrical impedance spectrum of cow milk. **Bulgarian Chemical Communications**, v. 46, p. 7–10, 2014.

PEREIRA, R. N.; RODRIGUES, R. M.; TEIXEIRA, J. A. Aquecimento Ôhmico: uma ferramenta ao serviço da biotecnologia. **Boletim de Biotecnologia**, p. 41–43, 2015. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/35324/1/document_21042_1.pdf. Acesso em: 29 abr. 2025.

QUEMELLI, L. de A. **Desenvolvimento de um integrador de tempo e temperatura com a fosfatase alcalina para investigação do impacto térmico de processos de pasteurização de alimentos líquidos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. doi:10.11606/D.3.2020.tde-10122020-095647. Acesso em: 29 abr. 2025.

RIBEIRO, C. A. C. **Efeito do processo de pasteurização sobre a qualidade química, aromática e sensorial do leite de cabra do cariri paraibano**. 2020. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em

Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2020. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/13855>. Acesso em: 29 abr. 2025.

ROCHA, R. S. et al. Ohmic heating does not influence the biochemical properties of Minas Frescal cheese but decreases uric acid levels in healthy Wistar rats. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n. 6, p. 4929–4934, 2020.

SAIN, M. et al. Effect of Ohmic Heating on Food Products: An In-Depth Review Approach Associated with Quality Attributes. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 2024, 2024.

SAMARANAYAKE, C. P.; SASTRY, K. S.; ZHANG, H. Food Engineering and Physical Properties Pulsed Ohmic Heating — A Novel Technique for Minimization of Electrochemical Reactions During Processing. **Food Engineering and Physical Properties**, v. 70, n. 8, 2005.

SHANKAR GOUD, B.; NANDEPPANAVAR, M. M. Ohmic heating and chemical reaction effect on MHD flow of micropolar fluid past a stretching surface. **Partial Differential Equations in Applied Mathematics**, v. 4, p. 100104, 2021.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to Food Engineering**, 4. ed. London: Academic Press. 841p. 2008.

SOUZA, L. A. DE et al. O uso de tecnologias emergentes não térmicas para indústria de alimentos: uma revisão sistemática da literatura. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 6, p. e4667, 2024.

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.