

## **Alta pressão hidrostática, campos elétricos pulsados e plasma frio na cadeia produtiva de alimentos: Princípios e aplicabilidade industrial**

**High hydrostatic pressure, pulsed electric fields and cold plasma in the food production chain:**

**Principles and industrial applicability**

**Alta presión hidrostática, campos eléctricos pulsados y plasma frío en la cadena alimentaria:**

**principios y aplicabilidad industrial**

Recebido: 04/02/2021 | Revisado: 12/02/2021 | Aceito: 17/02/2021 | Publicado: 26/02/2021

### **Maristela Mendes Aguiar**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7996-2728>  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil  
E-mail: [maristela.aguiar@uftm.edu.br](mailto:maristela.aguiar@uftm.edu.br)

### **Gláucia Moreira de Almeida**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6385-8432>  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil  
E-mail: [d202011218@uftm.edu.br](mailto:d202011218@uftm.edu.br)

### **Wander Luiz de Camargo Filho**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1025-3103>  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil  
E-mail: [d202011239@uftm.edu.br](mailto:d202011239@uftm.edu.br)

### **Denes Kaic Alves Do Rosario**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8565-2021>  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil  
E-mail: [deneskaic@hotmail.com](mailto:deneskaic@hotmail.com)

### **Liliane Andrade Araújo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2297-8379>  
Universidade FUMEC, Brasil  
E-mail: [liliaraujo00@outlook.com](mailto:liliaraujo00@outlook.com)

### **Emiliane Andrade Araújo Naves**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5103-1929>  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil  
E-mail: [emiliane.naves@uftm.edu.br](mailto:emiliane.naves@uftm.edu.br)

### **Resumo**

A busca por tecnologias não térmicas vem alcançando espaço no mercado devido às mudanças dos hábitos alimentares dos consumidores e a preocupação da preservação do meio ambiente. Esta tecnologia é altamente vantajosa para a descontaminação microbiana de produtos alimentícios, incluindo esporulados e micro-organismos patogênicos. Neste contexto, esta revisão objetivou um estudo sistemático da literatura sobre as principais tecnologias não térmicas, utilizando as bases de dados da *Science Direct* e *Web of Science*, com a palavra-chave “*non-thermal technologies*”. Os artigos selecionados foram submetidos para análise no *software Vosviewer*. Após interpretação dos mapas de densidade obtidos no *software* percebeu-se que as tecnologias não térmicas mais estudadas, nos últimos cinco anos (2015-2020), foram as tecnologias de alta pressão hidrostática, campo elétrico pulsado e plasma frio. Os principais destaques das tecnologias foram a (i) redução da carga microbiana no alimento, sendo a estrutura celular um fator importante na inativação dos micro-organismos, bem como (ii) a necessidade de aplicações industriais mais sustentáveis, demandando novas tecnologias no mercado.

**Palavras-chave:** Alta pressão hidrostática; Campo elétrico pulsado; Plasma frio; Tecnologias não térmicas.

### **Abstract**

The search for non-thermal technologies has been gaining space in the market due to changes in consumers' eating habits and concern for preserving the environment. This technology is highly advantageous for the microbial decontamination of food products, including sporulates and pathogenic microorganisms. In this context, this review aimed at a systematic study of the literature on the main non-thermal technologies, using the databases of *Science Direct* and *Web of Science*, with the keyword “*non-thermal technologies*”. The selected articles were submitted for analysis using the *Vosviewer* software. After interpreting the density maps obtained in the software, it was noticed that the most studied non-thermal technologies, in the last five years (2015-2020), were the technologies of high hydrostatic pressure, pulsed electric field and cold plasma. The main highlights of the technologies were (i) reduction

of the microbial load in the food, the cellular structure being an important factor in the inactivation of microorganisms, as well as (ii) the need for more sustainable industrial applications, demanding new technologies in the market.

**Keywords:** High hydrostatic pressure; Pulsed electric field; Cold plasma; Non-thermal technologies.

### Resumen

La búsqueda de tecnologías no térmicas ha ido ganando espacio en el mercado debido a los cambios en los hábitos alimentarios de los consumidores y la preocupación por la conservación del medio ambiente. Esta tecnología es muy ventajosa para la descontaminación microbiana de productos alimenticios, incluidos esporulados y microorganismos patógenos. En este contexto, esta revisión tuvo como objetivo un estudio sistemático de la literatura sobre las principales tecnologías no térmicas, utilizando las bases de datos de Science Direct y Web of Science, con la palabra clave “tecnologías no térmicas”. Los artículos seleccionados se enviaron para su análisis utilizando el software Vosviewer. Luego de interpretar los mapas de densidad obtenidos en el software, se notó que las tecnologías no térmicas más estudiadas, en los últimos cinco años (2015-2020), fueron las tecnologías de alta presión hidrostática, campo eléctrico pulsado y plasma frío. Los principales aspectos destacados de las tecnologías fueron (i) la reducción de la carga microbiana en los alimentos, siendo la estructura celular un factor importante en la inactivación de microorganismos, así como (ii) la necesidad de aplicaciones industriales más sostenibles, demandando nuevas tecnologías en el mercado.

**Palabras clave:** Alta presión hidrostática; Campo eléctrico pulsado; Plasma frío; Tecnologías no térmicas.

## 1. Introdução

Em razão da busca pelos consumidores de alimentos minimamente processados, mais saudáveis, frescos, seguros e com longo prazo de validade, as tecnologias de processamento não térmicas vem alcançando espaço no mercado. Em diversos casos, essas tecnologias exigem menos tempo para o tratamento e possuem maior eficiência energética, baixos danos na qualidade dos alimentos em relação à alteração do aroma, sabor, valor nutricional e da cor, garantindo altos padrões de segurança alimentar aos consumidores (Mandal et al., 2018; Sitzmann, Vorobiev, & Lebovka, 2016; Zhang et al., 2018).

Nos últimos anos, o processamento por alta pressão hidrostática (*high hydrostatic pressure* - HHP) atraiu grande atenção para a área de conservação de alimentos. Mais especificamente, as aplicações de HHP atraíram grande atenção em pesquisas por conta da sua capacidade em ampliar a vida útil dos produtos alimentícios e preservar características proteicas dos alimentos (Marciniak et al., 2018). O processo HHP é uma técnica realizada pós embalagem primária para conservação asséptica dos alimentos após o processamento. O HHP também pode estimular a inativação de enzimas sob faixas de pressão (Lee et al., 2018). Este processo inativa micro-organismos e várias enzimas conforme a pressão utilizada, sem destruir ingredientes alimentares naturais, como vitaminas, bioativos, pigmentos e sabores (Mok et al., 2020). Variando com pressão entre 100 a 800 MPa, o HHP tem amplo reconhecimento por ser uma alternativa atrativa em comparação aos tratamentos térmicos tradicionais na indústria alimentícia (Tao et al., 2015). A utilização desta tecnologia permite a preservação dos sabores originais e mantém os valores nutricionais dos alimentos crus, sendo vista como uma tecnologia de processamento que atende aos requisitos de segurança alimentar e características sensoriais (Huang et al., 2019).

O campo elétrico pulsado (*pulsed electric fields* - PEF) é outro destaque atual de tecnologia inovadora de processamento de alimentos, especialmente para inativação de micro-organismos, extração, prensagem, desidratação osmótica, secagem e congelamento (Sitzmann, Vorobiev, & Lebovka, 2016). Além das operações alimentares, essa tecnologia expandiu-se para medicina (Hanna et al., 2017; Wang et al., 2016) e também para o campo da biorrefinaria e bioeconomia (Golberg et al., 2016; Sitzmann, Vorobiev, & Lebovka, 2016).

O PEF consiste na aplicação de correntes elétricas entre eletrodos, induzindo o fenômeno de eletroporação, no qual possibilita uma modificação não invasiva na estrutura dos produtos (Golberg et al., 2016; Gómez et al., 2019; Zhang et al., 2018).

No processamento de alimentos o PEF possui diversas vantagens, como amplo potencial para a preservação dos produtos, capacidade de modificar a estrutura, além de ser uma alternativa eficiente em termos de energia e ser ecologicamente

correto. Com essas vantagens, essa tecnologia é uma das mais promissoras para diferentes aplicações na indústria alimentícia, como um único tratamento ou em combinação com outros processos (Gómez et al., 2019; Zhang et al., 2018). No entanto, essa aplicação apresenta alguns desafios, como investimento do capital inicial, transformação dos experimentos em pequena escala piloto em escala industrial e a necessidade de elaboração individual de protocolos para diferentes operações e tipos de produtos alimentícios (Gómez et al., 2019; Sitzmann, Vorobiev, & Lebovka, 2016).

Na última década, o plasma frio (*cold plasma* - CP) também ganhou interesse significativo para uso como tecnologia não térmica para processamento de alimentos. A novidade dessa tecnologia está na sua natureza atérmica, econômica, versátil e ecologicamente correta. As aplicações de CP para indústrias de alimentos foram demonstradas para descontaminação microbiológica (Pasquali et al., 2015; Xu et al., 2017), inativação de enzimas (Misra et al., 2016; Tappi et al., 2015), remoção de toxinas (Devi et al., 2017; Misra et al., 2019; Shi et al., 2017), modificações de embalagens de alimentos (Oh Yoon et al., 2016) e tratamento de pesticidas residuais (Sarangapani et al., 2016; Sarangapani et al., 2017). Particularmente para a descontaminação de alimentos, o CP demonstrou ser eficaz contra os principais micro-organismos patogênicos de origem alimentar, como *Escherichia coli* (Liao et al., 2018), *Staphylococcus aureus* (Han et al., 2016), *Salmonella enterica* (Xu et al., 2017), e *Listeria monocytogenes* (Pasquali et al., 2016).

A utilização de CP é altamente vantajosa para a descontaminação microbiana de produtos alimentícios, incluindo esporulados e micro-organismos patogênicos; devido à grande quantidade de espécies reativas de oxigênio contidas no gás de plasma quase neutro (Misra et al., 2019; Pasquali et al., 2015). Em geral, acredita-se que esses agentes ativos sejam responsáveis pela inativação microbiana por plasma frio. Alguns estudos mostraram a inativação eficiente para vários microrganismos, incluindo bactérias Gram-positivas e Gram-negativas (Mai-Prochnow et al., 2016), vírus (Min et al., 2016) e fungos (Shi et al., 2017; Misra et al., 2019). Além de melhorar a qualidade microbiológica, o tratamento com CP resulta em melhores propriedades físico-químicas, fisiológicas e funcionais dos alimentos (Bahrami et al., 2016; Bourke et al., 2018; Thirumdas et al., 2016).

Neste contexto, este trabalho objetivou realizar um estudo sistêmico da literatura sobre o tema tecnologias não térmicas com auxílio do software *Vosviewer*.

## 2. Metodologia

A pesquisa bibliométrica é desenvolvida a partir das informações obtidas de grandes bases de dados, por meio de indicadores que permitem realizar uma análise quantitativa dos dados (Soares, Picolli, & Casagrande, 2018). Neste estudo, primeiramente foi realizada a pesquisa sistemática na base *Science Direct*, utilizando o termo *non-thermal technologies* para a pesquisa. A partir dos resultados, utilizou-se a análise cientométrica do software *Vosviewer* para identificar o vínculo entre as palavras-chave que compõem os artigos dessa base. Após esta primeira busca foram identificados 196 artigos (Quadro 1). No entanto, desses artigos, apenas 18 tinham ligação direta com os termos pesquisados.

**Quadro 1** - Termos de guia para a pesquisa e resultados.

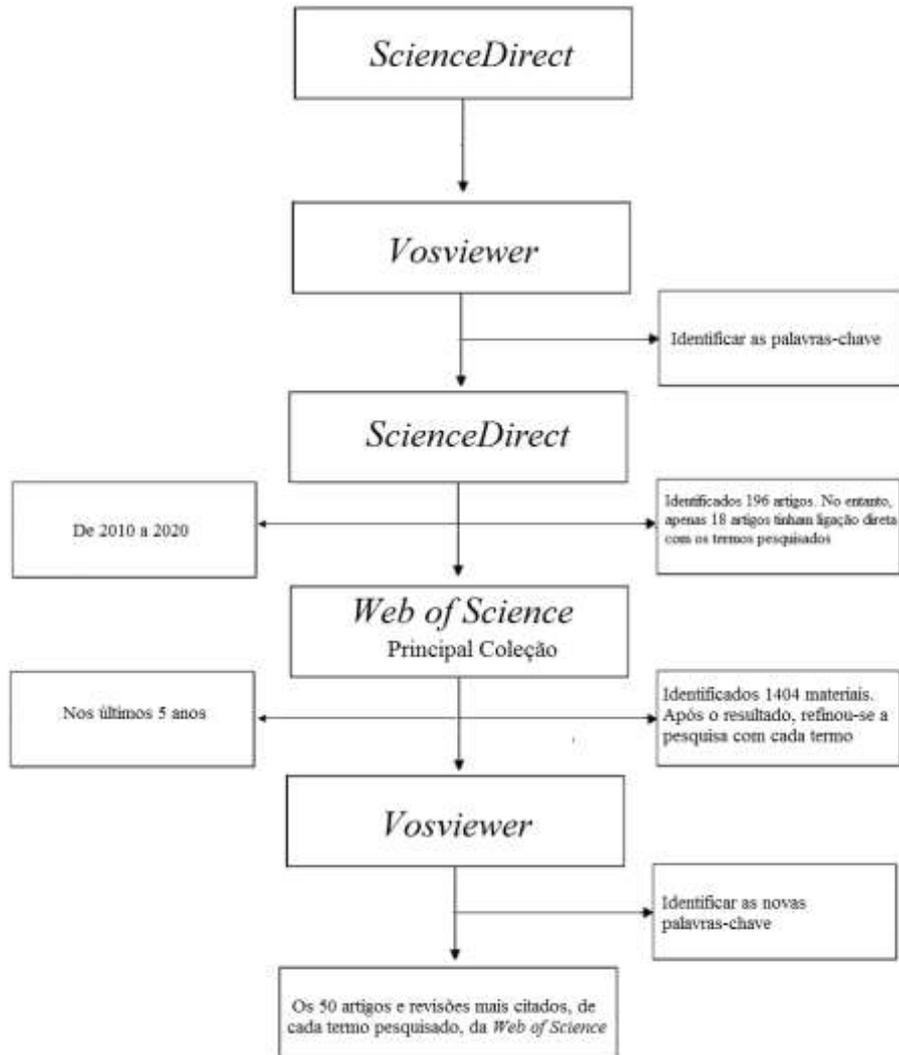
Realizada em:	26 de outubro de 2020
Termos de pesquisa:	<i>non-thermal technologies</i>
Período:	2010 to 2020
Campos de Pesquisa:	Títulos, palavras-chave e resumo
Tipo de Publicação:	Só artigos com textos completos
Nível de Publicação:	Sem restrições
Periódicos:	base <i>Science Direct</i>
Idiomas:	Inglês
Retornos:	Quantidade de documentos: 196

Fonte: Autores.

Em razão do número de artigos que tinham ligação direta com os termos pesquisados na base *ScienceDirect*, os autores decidiram realizar uma nova pesquisa na base da *Web of Science*, Principal Coleção, com os mesmos termos, no título, nos últimos cinco anos, incluindo artigos e revisões. Como resultados, obtiveram 1404 materiais. Após o resultado, refinou-se a pesquisa com cada termo *cold plasma*, *high hydrostatic pressure* e *pulsed electric fields*, em que foram identificados, respectivamente, 587, 571 e 292 artigos e revisões.

Para a redação desta revisão bibliográfica, foram selecionados os 50 artigos e revisões mais citados, de cada termo pesquisado, da *Web of Science*. A partir desses filtros, processaram novos mapas de densidade, por meio do *software Vosviewer*, a fim de identificar o vínculo entre as novas palavras-chave que compõem esses artigos. Esses resultados, bem os mapas de densidade, serão discutidos no tópico seguinte. A sequência completa da pesquisa científica para esta revisão encontra-se resumida na Figura 1.

**Figura 1** - Pesquisas nas bases de dados.



Fonte: Autores (2020).

### 3. Resultados

O software *Vosviewer* elaborou o mapa de densidade e as três palavras mais destacadas foram *cold plasma*, *high hydrostatic pressure* e *pulsed electric fields* (Figura 2).







Para células Gram-negativas, o envelope celular é o principal alvo das ROS. Reações de ROS com componentes celulares causam ruptura do envelope celular e resultam em vazamento, com alguns possíveis danos aos componentes intracelulares (por exemplo, DNA). Para células Gram-positivas, os componentes intracelulares são os principais alvos das ROS. As reações de ROS causarão danos graves aos componentes intracelulares, mas não o vazamento celular (Gavahian et al., 2018; Han et al., 2015).

No estudo de Mai-Prochnow et al. (2016) foi relatado que a eficácia do plasma frio está diretamente correlacionada à espessura da parede celular bacteriana em várias espécies. Biofilmes de *Bacillus subtilis* Gram positivo, possuindo parede celular de 55,4 nm, apresentaram maior resistência ao plasma frio, com menos de uma redução  $\log_{10}$  após 10 min de tratamento. Em contrapartida, os biofilmes Gram negativos de *Pseudomonas aeruginosa*, possuindo apenas uma parede celular de 2,4 nm, foram quase completamente erradicados nas mesmas condições de tratamento.

Numerosos estudos demonstraram que a CP tem efeitos de inativação em bactérias via parede/membrana celular bacteriana ou rompimento de substância polimérica extracelular ou via ação em componentes intracelulares (Han et al., 2015; Liao et al., 2018; Mai-Prochnow et al., 2016), atividade metabólica ou fatores de virulência, como prevenção da formação de biofilme levando à morte celular (Bourke et al., 2017; Delben et al., 2016).

São vários os efeitos da inativação bacteriana na utilização de alta pressão hidrostática, onde Shahbaz et al. (2016) cita que a tecnologia pode gerar a inativação com muitas alterações nas estruturas celulares, como danos à membrana e ruptura da parede celular, alargamento de células e degradação de DNA cromossômico. Além disso, a pressão gera certas desnaturações proteicas, elevando os níveis de absorvidade, inibindo reações energéticas e desnaturando enzimas cruciais para o desenvolvimento de micro-organismos.

Lee et al. (2019) cita que a inativação e a lesão subletal de bactérias patogênicas por HHP dependem da morfologia da célula bacteriana, a composição da amostra e o estágio de crescimento da bactéria. Com isso, de acordo com Christofi et al. (2020), o HHP afeta principalmente as ligações não covalentes (ligações de hidrogênio, iônicas e hidrofóbicas). Desta forma, os componentes de baixo peso molecular são normalmente menos afetados, enquanto os compostos de alto peso molecular são mais sensíveis ao HHP.

Huang et al. (2019) ressalta sobre uma das regras definidas por uma autoridade sanitária canadense em que recomenda-se que a pressão e a duração da sustentação da pressão para produtos precisam ter ao menos 600MPa de pressão mínima e com duração de ao menos 3 min para a redução efetiva de *Listeria monocytogenes* em produtos cárneos prontos para consumo. Como o HHP não inibe efetivamente os esporos microbianos, seu uso para pasteurização de produtos distribuídos em condições de temperatura ambiente não é recomendado.

#### 4.2 Fatores que afetam a eficiência na inativação

Diversos fatores têm potencial para afetar tecnologias não térmicas na inativação de micro-organismo. Segundo o estudo realizado por Cebrián, Manãs e Condón (2016), a resistência microbiana pode estar condicionada ao pH, sendo que a *Listeria monocytogenes* apresentou resistência ao uso da tecnologia de campos elétricos pulsados em pH neutro e os Gram-negativos (*Escherichia coli*, *Salmonella* spp., *Cronobacter sakazakii*, *Campylobacter jejuni*) exibiram uma resistência semelhante ou ainda maior em pH ácido. Outros fatores que os pesquisadores concluíram que possuem relação direta com a letalidade dos micro-organismos foram a atividade da água e a temperatura de tratamento.

Já no caso da alta pressão hidrostática, Huang et al. (2019) afirma que a ação de controle microbiológico tem como influência os padrões do processo, níveis de pressão e temperatura, além do tempo em que o produto estará exposto, considerando também as características inerentes do alimento, como o pH e as fases de evolução do micro-organismo.

Corroborando com os estudos de Cebrián, Manãs e Condón (2016) e Pillet et al. (2016), na área da saúde, Wang et al. (2016) investigaram as relações entre a temperatura, a composição de ácidos graxos da membrana e a eficácia do tratamento com campos elétricos pulsados em *Staphylococcus aureus*. Durante o trabalho constataram que essa bactéria mudou sua composição de ácidos graxos da membrana e sua fluidez quando exposta a diferentes temperaturas. E com isso, concluíram que a inativação de bactérias por campos elétricos pulsados está diretamente relacionada à estrutura e fluidez da membrana celular, força do campo elétrico e tempo de tratamento.

#### **4.3 Tecnologias não térmicas, meio ambiente e sustentabilidade**

Em relação ao desenvolvimento sustentável, Golberg et al. (2016) destacou-se um estudo de campos elétricos pulsados aplicados em biorrefinarias, objetivando a bioeconomia, uma economia baseada em alimentos, rações, produtos químicos, materiais e combustíveis derivados de biomassa sustentável. Assim, concluíram que por meio dessa tecnologia, através da eletroporação, que aumenta a permeabilidade da membrana celular, é possível manipular estoques de biomassa e sua conversão em produtos úteis. Além dessas vantagens, o campo elétrico pulsado influenciou na metanização, reduzindo gastos de energia e acelerando a atividade de fermentação, digestão anaeróbia e produção de biogás.

Levando em consideração a sustentabilidade com a utilização de alta pressão hidrostática, segundo Huang et al. (2019), o HHP é superior às tecnologias tradicionais pela sua realização em temperatura mais amena, eliminando o consumo energético de energia elétrica, vapor e etc, comparado com o processo de aquecimento e posterior resfriamento. Ademais, os produtos pós pasteurização por pressurização continuam em sua embalagem final, não entrando em contato direto com o equipamento, evitando a ocorrência de contaminação secundária pós pasteurização e possibilitando a recuperação e reaproveitamento do meio pressurizador.

Contaminantes químicos também podem ser reduzidos por meio da aplicação de métodos não térmicos. Agrotóxicos na água provocam grande preocupação devido ao impacto negativo ao meio ambiente, bem como à potencial exposição humana. O tratamento com plasma frio pode resolver esses problemas reduzindo a poluição da água. Sarangapani et al. (2016) concluíram que o plasma de descarga de barreira dielétrica de pressão atmosférica reduziu com sucesso a degradação de pesticidas na água. A degradação máxima alcançada foi de 78,98%, 69,62% e 57,71% para os pesticidas diclorvos, malatião e endossulfan, respectivamente. Espécies ativas, como  $O_3$ ,  $H_2O_2$ ,  $OH$  e outras espécies de plasma são responsáveis pela degradação de tais pesticidas. Estas descobertas sugerem que o plasma frio atmosférico é um método eficiente e prospectivo para a remoção de poluentes aquosos.

#### **4.4 Efeitos dos métodos não térmicos nas propriedades físico-químicas, microbiológicas e tecnológicas dos alimentos**

Na indústria de alimentos, Leong, Burritt e Oey (2016) concluíram que o campo elétrico pulsado empregado no processamento de suco de uva resultou em maior rendimento, intensificou a cor e proporcionou liberação maior e mais rápida de antocianina e compostos fenólicos. Similar à esse trabalho Ricci, Parpinello e Versari (2018) revisaram as descobertas mais recentes no campo do processamento de vinho tinto usando o campo elétrico pulsado e depreenderam que, apesar da necessidade de estudos mais detalhados, essa tecnologia potencializa a extração de compostos fenólicos e aumenta a intensidade da cor nos vinhos tintos.

Pankaj et al. (2017) utilizaram o tratamento com plasma frio atmosférico de alta tensão (HVACP) em suco de uva a 80 kV por 4 min. Eles verificaram uma redução de  $7,4 \log_{10}$  UFC  $mL^{-1}$  em *Saccharomyces cerevisiae* sem qualquer mudança significativa ( $P > 0,05$ ) no pH, acidez e condutividade elétrica do suco. Também verificaram um aumento no escurecimento não enzimático, mas a diferença de cor total foi muito baixa e dentro dos limites aceitáveis. Outro ponto abordado foi a diminuição nos fenólicos totais, flavonóides totais, eliminação de radicais livres e capacidade antioxidante, mas eles foram

comparáveis aos resultantes da pasteurização térmica. Com isso eles concluíram que o tratamento HVACP a 80 kV por 4 min foi considerado comparável à pasteurização térmica em termos de parâmetros de qualidade.

Motivados pela busca da melhoria de sucos prensados para vendas comerciais, Souza et al. (2020) comparou os efeitos da utilização da alta pressão hidrostática e os tratamentos térmicos com UV-C (tecnologia não térmica que utiliza pulsos curtos de luz ultravioleta para inativação de micro-organismos) em sucos prensados a frio nos sabores: limão, frutas cítricas e suco verde. Com isso, os testes realizados geraram boa retenção de ácidos e antioxidantes, além de classificar como neutra ou positiva a aceitação de todos os sucos tratados com HHP pelos consumidores, enquanto os sucos tratados com UV-C causaram alterações sensoriais indesejáveis nos sucos de sabores verde e frutas cítricas.

A busca por alimentos mais nutritivos levou Soliva-Fortuny et al. (2017) a estudarem os efeitos do campo elétrico pulsado como pré-tratamentos de maçãs. Com isso, eles deduziram que essa tecnologia associada às condições de armazenamento, como tempo e temperatura, pode ser usada para aumentar o potencial antioxidante das maçãs. Semelhante a esse estudo, Redondo et al. (2018) verificaram que o uso dessa tecnologia possibilita o aumento da extração de compostos bioativos de frutos de pêssego, por meio da permeabilidade celular alcançada durante o tratamento.

Em relação ao tratamento com plasma frio, Tappi et al. (2016) avaliaram os efeitos na qualidade de melão minimamente processado usando um gerador de descarga de barreira dielétrica. Eles concluíram que os parâmetros qualitativos do melão minimamente processado (teor de sólidos solúveis, matéria seca, cor, textura) foram apenas fracamente afetados pelo tratamento com plasma e as atividades da peroxidase e da pectina metilesterase foram ligeiramente inibidas pelo tratamento até cerca de 17 e 7%, respectivamente. Além do mais verificaram aumento da translucidez e não houve alteração nos parâmetros texturais.

Avaliando a relação do valor agregado em alimentos funcionais que possam apresentar melhoria funcional na qualidade de vida e saúde do consumidor, Fernández-Jalao et al. (2020) avaliaram a digestão gastrointestinal dinâmica de maçãs do tipo 'Golden Delicious' com tratamento HHP e sem este tratamento. Comparativamente, a maçã tratada com HHP com a maçã não tratada apresentou elevação no índice de recuperação para ácidos hidroxicinâmicos (67% e 52%) e maior bioacessibilidade para ácidos hidroxicinâmicos (40% e 31%) e di-hidrocalconas (30% e 19,5%). Com isso, entende-se que a utilização do HHP tornou os compostos bioativos presentes no alimento mais eficazes, cumprindo a ação biológica para a qual foram concebidos.

Ali et al. (2019) demonstra que o tratamento térmico na temperatura de 75°C por 15 segundos resultaram em uma diminuição substancial no conteúdo fenólico total e no teor de vitamina C de suco para 218,9 mg GAE/100 mL e 6,69 mg/100 mL, respectivamente, onde foram significativamente menores do que o grupo de controle (341,8 mg GAE/100 mL e 9,03 mg/100 mL, respectivamente) e do grupo tratado com alta pressão (316,1 mg GAE/100 mL e 9,03 mg/100 mL). Estes resultados indicam que o HHP promove a extração de substâncias antioxidantes, permitem a retenção de componentes funcionais e reduzem a destruição de nutrientes naturais em frutas e vegetais, o que tornam uma tecnologia adequada para a pasteurização de produtos alimentícios sensíveis ao calor.

O campo elétrico pulsado está sendo empregado na indústria de alimentos como pré-tratamento da desidratação osmótica, possibilitando novos produtos de confeitaria de frutas com alta desidratação e menor teor de açúcar e calorias. Essa desidratação é realizada por mecanismo de transferência de massa associado aos transportes ativo e passivo da matriz vegetal, geralmente impulsionado por eletrólitos (Traffano-Schiffo et al., 2016). Assim, com essa finalidade, Trajano-Schifo et al. (2016) aplicaram essa tecnologia à kiwis e verificaram que houve aumento da transferência de massa de água e reduziu a concentração final de açúcar. Similar à esse estudo, Dermesonlouoglou et al. (2016) consideraram que o kiwi desidratado processado com essa tecnologia resultou em um produto de alta qualidade, visto que apresentou nível aceitável de mudança de cor, maior firmeza e alto teor de vitamina C.

Thirumdas et al. (2016) avaliaram a influência do tratamento com plasma frio nas propriedades físico-químicas do arroz integral. Eles verificaram que o tempo de cocção foi reduzido em 28% após a aplicação do plasma e que a quantidade de absorção de água pelas amostras tratadas aumentou 7,2%. Aumento semelhante de absorção de água também foi relatado por Lee et al. (2016) após aplicação do plasma nas amostras de arroz integral, também foi relatado um aumento na atividade da  $\alpha$ -amilase e diminuição da dureza do grão.

De acordo com Gómez et al. (2019) o campo elétrico pulsado aplicado no processamento de carnes e peixes pode ser atribuído à várias melhorias em relação à preservação e ao amaciamento. Além disso, pode valorizar os subprodutos, devido à sua habilidade de potencializar a extração de compostos de alto valor agregado e aumentar as propriedades de retenção de água dos produtos pesqueiros, bem como para a secagem dos peixes.

Wu et al. (2016) concluíram que o campo elétrico pulsado tem potencial no processamento de alimentos com alta atividade biológica e propriedades sensíveis ao calor. Sendo que no estudo realizado por eles, a fim de garantir a segurança microbiana do ovo líquido, é necessário submetê-lo à processo de pasteurização, no entanto, em razão da presença de proteínas sensíveis ao calor, eles aplicaram o campo elétrico pulsado e constataram que há um impacto mínimo na estrutura da proteína da clara do ovo.

## 5. Conclusão

As tecnologias de processamento não térmicas têm se tornado cada vez mais atrativas para implementação industrial, uma vez que demonstram resultados promissores para a segurança microbiológica aos consumidores. Os métodos abordados neste estudo apresentam diversas vantagens, como redução do tempo para o tratamento, maior eficiência energética e efeitos mínimos sobre os alimentos em relação às características sensoriais e nutricionais.

Quanto à inativação microbiana, essas tecnologias apresentam eficiência na redução da carga microbiana, sendo que essa capacidade está especialmente relacionada com a estrutura celular, visto que é uma questão crucial diante do mecanismo de ação de cada tecnologia.

A área mais abordada na literatura, nos últimos cinco anos, foi o uso crescente dessas tecnologias no processamento e na conservação de alimentos. Ademais, destaca-se o potencial dessas tecnologias minimizarem as alterações das propriedades físico-químicas e nutricionais dos alimentos. Além de que suas aplicações são favoráveis para o desenvolvimento sustentável.

Apesar das diversas vantagens apresentadas, as principais limitações da aplicabilidade tecnológica estão associadas com o alto valor do investimento de capital inicial para alterar as linhas atuais de processamento, bem como a aplicar a tecnologia em escala industrial e a necessidade de elaborar individualmente protocolos para diferentes operações e tipos de produtos alimentícios. Portanto, esta revisão proporciona informações relevantes referente às tecnologias não térmicas, que podem ser utilizadas para direcionar implementações industriais e pesquisas futuras.

## Referências

- Ali, N., Popovic, V. K., Warriner, K., & Zhu, Y. (2019). Effect of thermal, high hydrostatic pressure and ultraviolet-C processing on the microbial inactivation vitamins, chlorophyll, antioxidants, enzyme activity, and color of wheatgrass juice. *Journal of Food Process Engineering*, 43, 1-8. 10.1111/jfpe.13036
- Bahrami, N., Bayliss, D., Chope, G., Penson, S., Pehinec, T., & Fisk, I. D. (2016). Cold plasma: A new technology to modify wheat flour functionality. *Food Chemistry*, 202, 247-253. 10.1016/j.foodchem.2016.01.113
- Bourke, P., Ziuzina, D., Boehm, D., Cullen, P. J., & Keener, K. (2018). The Potential of Cold Plasma for Safe and Sustainable Food Production. *Trends in Biotechnology*, 36(16), 615-626. 10.1016/j.tibtech.2017.11.001
- Bourke, P., Ziuzina, D., Han, L., Cullen, P. J., & Gilmore, B. F. (2017). Microbiological interactions with cold plasma. *Journal of Applied Microbiology*, 123, 308-324. 10.1111/jam.13429
- Cebrián, G., Mañas, P., & Condón, S. (2016). Comparative Resistance of Bacterial Foodborne Pathogens to Non-thermal Technologies for Food Preservation. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1-17. 10.3389/fmicb.2016.00734

- Christofi, S., Dimitris, M., Katsaros, G., Panagou, E., & Kallithraka, S. (2020). Limit SO<sub>2</sub> content of wines by applying High Hydrostatic Pressure, 62, 1-10. 10.1016/j.ifset.2020.102342
- Delben, J. A., Zago, C. E., Tyhovich, N., Duarte, S., & Vergani, C. E. (2016). Effect of Atmospheric-Pressure Cold Plasma on Pathogenic Oral Biofilms and In Vitro Reconstituted Oral Epithelium. *Plos One*, 11(5), 1-18. 10.1371/journal.pone.0155427
- Dermesonlouoglou, E., Zachariou, I., Andreou, V., & Taoukis, P. S. (2016). Effect of pulsed electric fields on mass transfer and quality of osmotically dehydrated kiwifruit. *Food and Bioproducts Processing*, 100, 535-544. 10.1016/j.fbp.2016.08.009.
- Devi, Y., Thirumdas, R., Sarangapani, C., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2017). Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts. *Food Control*, 77, 187-191. 10.1016/j.foodcont.2017.02.019
- Dimitrakellis, P., & Gogolides, E. (2018). Hydrophobic and superhydrophobic surfaces fabricated using atmospheric pressure cold plasma technology: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 254, 1-21. 10.1016/j.cis.2018.03.009
- Fernández-Jalao, I., Balderas, C., Sánchez-Moreno, C., & De Ancos, B. (2020). Impact of an in vitro dynamic gastrointestinal digestion on phenolic compounds and antioxidant capacity of apple treated by high-pressure processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 1-12. 10.1016/j.ifset.2020.102486
- Franck, M., Perreault, V., Suwal, S., Marciniak, A., Bazinet, L., & Doyen, A. (2019). High hydrostatic pressure-assisted enzymatic hydrolysis improved protein digestion of flaxseed protein isolate and generation of peptide with antioxidant activity. *Food Research International*, 115, 467-473. 10.1016/j.foodres.2018.10.034
- Gabrić, D., Barba, F., Roohinejad, S., Gharibzahedi, S. M. T., Radojčin, M., Putnik, P., & Kovačević, D. B. (2017). Pulsed electric fields as an alternative to thermal processing for preservation of nutritive and physicochemical properties of beverages: a review. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1), 1-14. 10.1111/jfpe.12638
- Gavahian, M., Chu, Y.-H., Khaneghah, A. M., Barba, F. J., Misra, N. N. (2018). A critical analysis of the cold plasma induced lipid oxidation in foods. *Trends in Food Science and Technology*, 77, 32-41. 10.1016/j.tifs.2018.04.009
- Golberg, A., Sack, M., Teissie, J., Pataro, G., Pliquet, U., Saulis, G., Stefan, T., Miklavcic, D., Vorobiev, E., & Frey, W. (2016). Energy-efficient biomass processing with pulsed electric fields for bioeconomy and sustainable development. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), 1-22. 10.1186/s13068-016-0508-z
- Gómez, B., Munekata, P. E. S., Gavahian, M., Barba, F. J., Martí-Quijal, F. J., Bolumar, T., Campagnol, P. C. B., Tomasevic, I., & Lorenzo, J. M. (2019). Application of pulsed electric fields in meat and fish processing industries: an overview. *Food Research International*, 123, 95-105. 10.1016/j.foodres.2019.04.047
- Han, L., Patil, S., Boehm, D., Milosavljevic, V., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2015). Mechanisms of Inactivation by High-Voltage Atmospheric Cold Plasma Differ for Escherichia coli and Staphylococcus aureus. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(2), 450-458. 10.1128/AEM.02660-15
- Hanna, H., Denzi, A., Liberti, M., André, F. M., & Mir, L. M. (2017). Electroporabilization of Inner and Outer Cell Membranes with Microsecond Pulsed Electric Fields: quantitative study with calcium ions. *Scientific Reports*, 7(1). 10.1038/s41598-017-12960-w
- Huang, H.-W., Hsu, C.-P., & Wang, C.-Y. (2020). Healthy expectations of high hydrostatic pressure treatment in food processing industry. *Journal of Food and Drug Analysis*, 28(1), 1-13. 10.1016/j.jfda.2019.10.002
- Lee, H., Shahbaz, H. M., Ha, N., Kim, J. U., Lee, S. J., & Park, J. (2020). Development of ginseng powder using high hydrostatic pressure treatment combined with UV-TiO<sub>2</sub> photocatalysis. *The Korean Society of Ginseng*, 44(1), 154-160. 10.1016/j.jgr.2018.11.004
- Lee, H., Song, K. B., Choi, E. J., Kim, H. K., Park, H. W., & Chun, H. H. (2019). Combined effects of high hydrostatic pressure treatment and red ginseng concentrate supplementation on the inactivation of foodborne pathogens and the quality of ready-to-use kimchi sauce. *LWT – Food Science and Technology*, 114(1), 1-9. 10.1016/j.lwt.2019.108410
- Lee K. H., Kim, H.-J., Woo, K. S., Jo, C., Kim, J.-K., Kim S. H., Park, H. Y., Oh, S.-K., & Kim, W. H. (2016). Evaluation of cold plasma treatments for improved microbial and physicochemical qualities of brown rice. *Food Science and Technology*, 73, 442-447. 10.1016/j.lwt.2016.06.055
- Leong, S. Y., Burritt, D. J., & Oey, I. (2016). Evaluation of the anthocyanin release and health-promoting properties of Pinot Noir grape juices after pulsed electric fields. *Food Chemistry*, 196, 833-841. 10.1016/j.foodchem.2015.10.025
- Liao, X., Li, J., Muhammad, A. I., Suo, Y., Chen, S., Ye, D. L., & Ding, T. (2018). Application of a Dielectric Barrier Discharge Atmospheric Cold Plasma (Dbd-Acp) for Escherichia Coli Inactivation in Apple Juice. *Food Science*, 83(2), 801-408. 10.1111/1750-3841.14045
- Mai-Prochnow, A., Clauson, M., Hong, J., & Murphy, A. B. (2016). Gram positive and Gram negative bacteria differ in their sensitivity to cold plasma. *Scientific Reports*. 10.1038/srep38610
- Mandal, R., Singh, A., & Singh, A. P. (2018). Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 80, 93-103. 10.1016/j.tifs.2018.07.014
- Marciniak, A., Suwal, S., Naderi, N., Pouliot, Y., & Doyen, A. (2018). Enhancing enzymatic hydrolysis of food proteins and production of bioactive peptides using high hydrostatic pressure technology. *Trends in Food Science & Technology*, 80(1), 187-198. 10.1016/j.tifs.2018.08.013
- Min, M. C., Roh, S. H., Niemira, B. A., Sites, J., Boyd, G., & Lacombe, A. (2016). Dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma inhibits Escherichia coli O157:H7, Salmonella, Listeria monocytogenes, and Tulane virus in Romaine lettuce. *International Journal of Food Microbiology*, 237, 114-120. 10.1016/j.ijfoodmicro.2016.08.025

- Misra, N. N., Pankaj, S. K., Segat, A., & Ishikawa, K. (2016). Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. *Trends in Food Science and Technology*, 55, 39-47. 10.1016/j.tifs.2016.07.001
- Misra, N. N., Yafav, B., Roopesh, M. S., & Jo, C. (2019). Cold Plasma for Effective Fungal and Mycotoxin Control in Foods: Mechanisms, Inactivation Effects, and Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(1), 106-120. 10.1111/1541-4337.12398
- Mok, I., Nguyen, T. T. H., Kim, D. H., Lee, J. W., Lim, S., Jung, H., Lim, T., Pal, K., & Kim, D. (2020). Enhancement of neuroprotection, antioxidant capacity, and water-solubility of crocins by transglucosylation using dextranase under high hydrostatic pressure. *Enzyme and Microbial Technology*, 140(1), 1-9. 10.1016/j.enzmictec.2020.109630
- Oh, Y. A., Roh, S. H., & Min, S. C. (2016). Cold plasma treatments for improvement of the applicability of defatted soybean meal-based edible film in food packaging. *Food Hydrocolloids*, 58, 150-159. 10.1016/j.foodhyd.2016.02.022
- Pankaj, S. H., Wan, Z., Colonna, W., & Keener, K. M. (2017). Effect of high voltage atmospheric cold plasma on white grape juice quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(12), 4016-4021. 10.1002/jsfa.8268
- Pankaj, S. K., Wan, Z., & Keener, K. M. (2018). Effects of Cold Plasma on Food Quality: A Review. *Foods*, 7, 1-21. 10.3390/foods7010004
- Pasquali, F., Stratakos, A. C., Koidis, A., Berardinelli, A., Cevoli, C., Ragni, L., Mancusi, R., Manfreda, G., & Trevisani, M. (2016). Atmospheric cold plasma process for vegetable leaf decontamination: A feasibility study on radicchio (red chicory, *Cichorium intybus* L.). *Food Control*, 60, 552-559. 10.1016/j.foodcont.2015.08.043
- Pillet, F., Formosa-Dague, C., Baaziz, H., Dague, E., & Rols, M.-P. (2016). Cell wall as a target for bacteria inactivation by pulsed electric fields. *Scientific Reports*, 6(1), 1-8. 10.1038/srep19778
- Redondo, D., Venturini, M. E., Luengo, E., Raso, J., & Arias, E. (2018). Pulsed electric fields as a green technology for the extraction of bioactive compounds from thinned peach by-products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 45, 335-343. 10.1016/j.ifset.2017.12.004
- Ricci, A., Parpinello, G. P., & Versari, A. (2018). Recent Advances and Applications of Pulsed Electric Fields (PEF) to Improve Polyphenol Extraction and Color Release during Red Winemaking. *Beverages*, 4(1), 1-12. 10.3390/beverages4010018
- Sarangapani, C., Misra, N. N., Milosavljevic, V., Bourke, P., O'Regan, F., & Cullen, P. J. (2016). Pesticide degradation in water using atmospheric air cold plasma. *Journal of Water Process Engineering*, 9, 225-232. 10.1016/j.jwpe.2016.01.003
- Sarangapani, C., O'Toole, G., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2017). Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 44, 235-241. 10.1016/j.ifset.2017.02.012.
- Shi, H., Heleji, K., Stroshine, R. L., Keener, K., & Jensen, J. L. (2017). Reduction of Aflatoxin in Corn by High Voltage Atmospheric Cold Plasma. *Food Bioprocess Technol.*, 10, 1042-1052. 10.1007/s11947-017-1873-8
- Sitzmann, W., Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2016). Applications of electricity and specifically pulsed electric fields in food processing: historical backgrounds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 302-311. 10.1016/j.ifset.2016.09.021
- Soares, S. V., Picolli, I. R. A., & Casagrande, J. (2018). Pesquisa Bibliográfica. Pesquisa Bibliométrica, Artigo de Revisão e Ensaio Teórico em Administração e Contabilidade. *Administração: Ensino e Pesquisa*, 19(2), 308-339. 10.13058/raep.2018.v19n2.970
- Soliva-Fortuny, R., Vendrell-Pacheco, M., Martín-Belloso, O., & Elez-Martínez, P. (2016). Effect of pulsed electric fields on the antioxidant potential of apples stored at different temperatures. *Postharvest Biology and Technology*, 132, 195-201. 10.1016/j.postharvbio.2017.03.015
- Souza, V. R. D., Popovic, V., Bissonnette, S., Ros, I., Duizer, L., Warriner, K., & Koutchma, T. (2020). Quality changes in cold pressed juices after processing by high hydrostatic pressure, ultraviolet-c light and thermal treatment at commercial regimes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64(1), 1-11. 10.1016/j.ifset.2020.102398
- Tappi, S., Gozzi, G., Vannini, L., Berardinelli, A., Romani, S., Ragni, L., & Rocculi, P. (2016). Cold plasma treatment for fresh-cut melon stabilization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 225-233. 10.1016/j.ifset.2015.12.022
- Tao, Z., Sun, D.-W., Górecki, A., Blaszcak, W., Lamparski, G., Amarowicz, R. F., & Józef, J. (2016). A preliminary study about the influence of high hydrostatic pressure processing in parallel with oak chip maceration on the physicochemical and sensory properties of a young red wine. *Food Chemistry*, 194(1), 545-554. 10.1016/j.foodchem.2015.07.041
- Traffano-Schiffo, M. V., Tylewicz, U., Castro-Giraldez, M., Fito, P. J., Ragni, L., & Rosa, M. D. (2016). Effect of pulsed electric fields pre-treatment on mass transport during the osmotic dehydration of organic kiwifruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38, 243-251. 10.1016/j.ifset.2016.10.011
- Thirumdas, R., Saragapani, C., Ajinkya, M. T., Deshmukh, R. R., & Annappure, U. S. (2016). Influence of low pressure cold plasma on cooking and textural properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 53-60. 10.1016/j.ifset.2016.08.009
- Thirumdas, R., Trimukhe, A., Deshmukh, R. R., & Annappure, U. S. (2016). Functional and rheological properties of cold plasma treated rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 157, 1723-1731. 10.1016/j.carbpol.2016.11.050
- Wang, L.-H., Wang, M.-S., Zeng, X.-A., & Liu, Z.-W. (2016). Temperature-mediated variations in cellular membrane fatty acid composition of *Staphylococcus aureus* in resistance to pulsed electric fields. *Biochimica et Biophysica Acta (Bba) - Biomembranes*, 1858(8), 1791-1800. 10.1016/j.bbamem.2016.05.003
- Wu, L., Zhao, W., Yang, R., Yan, W., & Sun, Q. (2016). Aggregation of egg white proteins with pulsed electric fields and thermal processes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(10), 3334-3341. 10.1002/jsfa.7512

Xie, F., Zhang, W., Lan, X., Gong, S., Wu, J., & Wang, Z. (2018). Effects of high hydrostatic pressure and high pressure homogenization processing on characteristics of potato peel waste pectin. *Carbohydrate Polymers*, 196(1), 474-482. 10.1016/j.carbpol.2018.05.061

Xu, L., Garner, A. L., Tao, B., & Keener, K. M. (2017). Microbial Inactivation and Quality Changes in Orange Juice Treated by High Voltage Atmospheric Cold Plasma. *Food Bioprocess Technol*, 10(10), 1778-1791. 10.1007/s11947-017-1947-7

Zhang, Z.-H., Wang, L.-H., Zeng, X.-A., Han, Z., & Brennan, C. S. (2018). Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(1), 1-13. 10.1111/ijfs.13903