

PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E AS VANTAGENS / DESVANTAGENS DO USO DE PLASMA FRIO NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

Bruna aparecida da Silva¹, Neyeli Cristine da Silva¹, Vildes Maria Scussel¹, Giustino Tribuzi¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil (bs131094@gmail.com)

O Plasma Frio (PF) possui diversas aplicações na indústria alimentícia. O objetivo desta revisão foi elucidar os princípios de funcionamento do PF na indústria de alimentos, através de artigos sobre essa temática. Inúmeras são as formas de gerar plasma, apesar do princípio básico da ausência do equilíbrio termodinâmico, cada forma conduzirá a um subtipo de PF. Quanto à aplicação de PF nos alimentos, mostrou-se eficaz na descontaminação, inativação de enzimas, remoção de toxinas, e outros.

Palavras-chave: descontaminação; tecnologia verde; reatores de plasma.

INTRODUÇÃO

O plasma frio (PF), também conhecido como plasma não-térmico ou de baixa temperatura, é um gás formado por multicomponentes como elétrons, átomos, moléculas neutras e altamente excitadas, íons, radicais, fótons e partículas neutras (HEINLIN et al., 2011; AFSHARI; HOSSEINI, 2014). No processo de PF, somente os elétrons são aquecidos, assim, estão em um nível de temperatura mais alto do que os íons e as partículas pesadas sem carga. A diferença de massa é tão grande que os elétrons podem estar a altas temperaturas, ao mesmo tempo que o plasma inteiro mantém-se próximo da temperatura ambiente. Devido a esse aspecto, o PF é usado para tratar objetos sensíveis ao calor ou materiais biológicos (LAROUSSE, 2009) operando sob moderadas temperaturas e utilizando gases atóxicos, restringindo, dessa forma, danos químicos e térmicos ao substrato (PHILIP, et al., 2002; SLADEK; STOFFELS, 2005), além de fornecer esterilização e assepsia eficientes em poucos segundos/minutos (HEINLIN, et al., 2011). Geralmente utilizado para tratar tecidos, vidros, papel e outros produtos, uma nova tendência de pesquisa sugere que o PF é uma tecnologia poderosa e lucrativa para a indústria de alimentos (BUTSCHER et al., 2016; CHOI et al., 2017; DEVI et al., 2017; JUNG et al., 2017; MIN et al., 2017; PATANGE et al., 2017; SOHBATZADEH et al., 2016). A tecnologia de plasma, perante a indústria alimentícia, é considerada uma técnica moderna não convencional e bastante vantajosa quando se trata de descontaminação microbiana em diferentes substratos (frutas, vegetais, aves, produtos cárneos, queijo, etc), desde a esporulação e deterioração de organismos patogênicos, até a degradação de resíduos de

agrotóxicos. Também é utilizada na preparação de amidos modificados, alterando suas propriedades físicas e químicas, e tem sido empregada para alterar a taxa de germinação de sementes e processamento de materiais de embalagem a fim de melhorar as propriedades de barreira e conferir atividade antimicrobiana (BUTSCHER et al., 2016; CHOI et al., 2017; DEVI et al., 2017; JUNG et al., 2017; MIN et al., 2017; PATANGE et al., 2017; SOHBATZADEH et al., 2016; OH et al., 2016; PULIGUNDLA; LEE; MOK, 2016).

Diante do exposto, o objetivo desta revisão foi de elucidar os principais princípios de funcionamento do PF na indústria de alimentos, as vantagens e desvantagens do seu uso, assim como, a comparação desta tecnologia com a aplicação de ozônio e pasteurização.

MATERIAL E MÉTODOS

Trata-se de uma revisão integrativa de literatura baseada na análise de artigos referentes ao uso de Plasma Frio (PF) na indústria de alimentos. O presente estudo foi elaborado a partir das seis etapas recomendadas (MENDES; SILVEIRA; GALVÃO, 2008; SOUZA; SILVA; CARVALHO, 2010) para a elaboração de uma revisão integrativa de qualidade: seleção do tema e questão norteadora; estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão; seleção dos artigos; categorização dos artigos selecionados; análise e interpretação dos dados.

A etapa inicial, que corresponde à busca, foi executada nos idiomas português e inglês, por meio dos descritores “plasma frio” “plasma frio em alimentos” “plasma frio na qualidade de alimentos” “descontaminação com plasma frio” “efeito do plasma

frio em alimentos". Utilizaram-se as bases eletrônicas: Academic Search Premier; *SciELO*; *Scopus*; ScienceDirect; Elsevier; Wiley Online Library e Taylor & Francis, em março de 2022.

Os critérios de inclusão estabelecidos foram: publicações com a temática PF na indústria de alimentos, classificadas como artigos originais de natureza primária, disponibilizados online e na íntegra; constar o descritor "plasma frio" no título, resumo ou palavras-chave, sem restrição de ano de publicação. Foram excluídos editoriais, cartas ao editor e comentários críticos abordando o assunto, assim como duplicatas e artigos não disponíveis na íntegra, mesmo com o auxílio do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Primeiramente os estudos foram analisados por meio da avaliação dos títulos, seguida da leitura dos resumos e, por fim, da leitura do artigo na íntegra. Posteriormente, foram selecionados e categorizados (organização de dados referentes a cada estudo) através da análise e interpretação dos resultados para apreciação qualitativa das informações, contendo: referência completa e objetivo do estudo. A seleção de artigos respeitou os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Plasma Frio

O plasma é um gás parcialmente ionizado neutro, também conhecido como quarto estado da matéria (Figura 1) (FRIDMAN, 2008; D'AGOSTINO et al., 2008) e constitui 99% do universo visível, além disso, o mesmo pode ocorrer natural ou artificialmente (FRIDMAN, 2008; ELIEZER, ELIEZER, 2001). À medida que os materiais adquirem energia, mudam de estado, ou seja, de sólido (menos energético) para líquido e posteriormente, gás. Em cada transição de fase, as interações e as estruturas entre as moléculas ficam mais frouxas até degradar-se completamente, fato que explica o quarto estado da matéria (FRIDMAN, 2008; NIEMIRA, 2012).

Portanto, o plasma frio (PF), também chamado de plasma não-térmico ou de baixa temperatura, é definido como um gás formado por multicomponentes como elétrons, átomos, moléculas neutras e altamente excitadas, íons, radicais, fótons e partículas neutras (HEINLIN et al., 2011; AFSHARI; HOSSEINI, 2014).

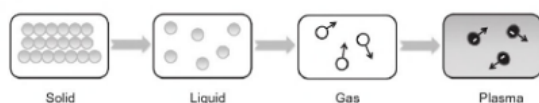


Figura 1 – Características dos quatro estados da matéria: sólido, líquido, gasoso e plasma (MISRA; SCHLÜTER; CULLEN, 2016)

Plasmas são geralmente classificados conforme seu nível de energia, densidade iônica e temperatura, em plasmas de alta temperatura, plasmas térmicos e plasmas frios (LIU; XU; WANG, 1999). O plasma térmico é caracterizado pelo equilíbrio termodinâmico entre os elétrons e as partículas pesadas do gás, havendo uma quase singular temperatura em cada ponto do espaço. Este tipo de plasma requer pressões mais altas (≥ 105 Pa) e uma quantidade maior de energia para ser formado quando comparado ao não-térmico (FRIDMAN et al., 2008).

Já para os plasmas não-térmicos, somente os elétrons são aquecidos, assim, estão em um nível de temperatura mais alto do que os íons e as partículas pesadas sem carga. A diferença de massa é tão grande que os elétrons podem estar a altas temperaturas, ao mesmo tempo que o plasma inteiro mantém-se próximo da temperatura ambiente. Devido a esse aspecto, os plasmas não-térmicos são usados para tratar objetos sensíveis ao calor ou matéria biológica (LAROUSSE, 2009). Estes plasmas operam sob moderadas temperaturas e utilizam gases atóxicos, logo, danos químicos e térmicos ao substrato são minimizados (PHILIP, et al., 2002; SLADEK; STOFFELS, 2005), além de fornecer esterilização e assepsia eficientes em poucos segundos/minutos (HEINLIN, et al., 2011).

1.1 Funções e Uso Geral

Os plasmas produzidos pelo homem se encontram presentes em uma série de produtos e processos do cotidiano, como nas lâmpadas fluorescentes, televisores, cortes e soldas. Podem ser encontrados também em uma série de outras aplicações em produtos ou serviços, como no setor ambiental em tratamentos de efluentes líquidos e gasosos (GERRITY et al., 2010); na eletrônica, na esterilização e refrigeração de componentes; na modificação química de superfícies de polímeros e pré-tratamento de pinturas (DA SILVA et al., 2012); na medicina, na esterilização e no tratamento de melanomas e úlceras dérmicas (HEINLIN et al., 2011); entre outros.

O PF foi originalmente empregado para melhorar as propriedades de impressão e adesão de polímeros, aumentando a energia de superfície dos materiais e uma variedade de domínios de uso em eletrônica. Geralmente é utilizado para tratar tecidos, vidros, papel e outros produtos. Uma nova tendência de pesquisa sugere que a tecnologia PF é uma tecnologia poderosa e lucrativa para a indústria de alimentos (BUTSCHER et al., 2016; CHOI et al., 2017; DEVI et al., 2017; JUNG et al., 2017; MIN et al., 2017; PATANGE et al., 2017; SOHBATZADEH et al., 2016).

A tecnologia de plasma, perante a indústria alimentícia, é considerada uma técnica moderna não convencional e bastante vantajosa quando se trata de descontaminação microbiana em diferentes substratos (frutas, vegetais, aves, produtos cárneos, queijo, etc.), desde a esporulação e deterioração de organismos patogênicos, até a degradação de resíduos de agrotóxicos. Também é utilizada na preparação de amidos modificados, alterando suas propriedades físicas e químicas, e tem sido empregada para alterar a taxa de germinação de sementes e processamento de materiais de embalagem a fim de melhorar as propriedades de barreira e conferir atividade antimicrobiana (BUTSCHER et al., 2016; CHOI et al., 2017; DEVI et al., 2017; JUNG et al., 2017; MIN et al., 2017; PATANGE et al., 2017; SOHBATZADEH et al., 2016; OH et al., 2016; PULIGUNDLA; LEE; MOK, 2016). É um processo ecológico que é usado na preservação de alimentos e outras aplicações potenciais como uma alternativa às técnicas comuns (THIRUMDAS et al., 2015).

1.2 Princípios de Funcionamento do Plasma Frio

O PF pode ser definido como um meio altamente reativo e energético, formado por espécies químicas radicalares, iônicas, excitadas com elétrons de alta energia, em que o gás plasmogênico encontra-se em temperatura ambiente (FRIDMAN, 2008; D'AGOSTINO et al., 2008; ELIEZER; ELIEZER, 2001; ROTH, 1995; KIEFT, 2005). Trata-se de um meio em constante atividade física e química, cujas reações químicas resultantes são direcionadas e influenciadas principalmente pela excitação do elétron (FRIDMAN, 2008; D'AGOSTINO et al., 2008; ELIEZER; ELIEZER, 2001).

Inúmeras são as formas de gerar PF e, portanto, variados são os tipos gerados (luminoso, faísca, corona, entre outros). Apesar do princípio básico e comum da ausência do equilíbrio termodinâmico local, cada forma conduzirá a um subtipo distinto de plasma, cujas características peculiares permitem que sejam destinados às diferentes aplicações. Quantidade e tipo de energia utilizada, pressão de trabalho, identidade química do gás, corrente e tensão elétrica, tipo de reator, são alguns dos preceitos que induzem o tipo de PF produzido (LOCKE et al., 2006). PF pode ser formado a partir de micro-ondas, radiofrequência e descargas elétricas de alta tensão, sendo esta última a mais utilizada forma para se gerar e manter PF (ELIEZER; ELIEZER, 2001; KIEFT, 2005; LOCKE et al., 2006; D'AGOSTINO et al., 2008; FRIDMAN, 2008).

O fundamento principal das fontes de plasma é fornecer meios eficazes para a aplicação de um intenso campo elétrico a um gás (MISRA et al., 2019). Com a diferença de potencial empregue entre dois eletrodos, acontece um aumento do campo elétrico local, no qual

sucede a ionização do gás, conhecida como primeira ionização de Townsend. Isto é, os elétrons primários são acelerados, chocando-se com átomos e/ou moléculas do gás em seu caminho, formando espécies iônicas. Contudo, em virtude da colisão entre elétrons primários e partículas pesadas do gás, geram-se cátions na mesma proporção que percorrem o caminho contrário aos elétrons e ao chegar ao cátodo ocorrerá uma segunda avalanche de elétrons, ou seja, resultando em uma segunda ionização de Townsend, gerando um efeito cascata de multiplicação de elétrons (FRIDMAN; CHIROKOV; GUTSOL, 2005). Assim sendo, os elétrons também são considerados como os principais responsáveis pelo processo de colisão e excitação, devido a energia cinética elevada gerada pelo campo elétrico, fazendo com que eles se movam com velocidade alta em relação às partículas pesadas presentes no meio (TENDERO, et al., 2006).

1.3 Reatores de Plasma Frio

Nos recipientes chamados reatores ocorrem os fenômenos físico-químicos. No contexto do PF de descargas elétricas de alta tensão, esses reatores representam as estruturas que possuem como característica básica a presença de no mínimo um eletrodo metálico por onde é aplicada a diferença de potencial necessária para produzir a descarga elétrica formadora do plasma (D'AGOSTINO et al., 2008). A forma como os eletrodos estão arranajados define o reator de PF, sua funcionalidade e correspondente aplicação. O meio onde a descarga elétrica é formada confere a classificação em três tipos de reatores: reator de descarga em fase gasosa, reator de descarga em fase líquida (chamada de descarga eletro-hidráulica) e reator de descarga híbrida (LOCKE et al., 2006; BRUGGEMAN; LEYS, 2009). É possível observar distintos tipos de descargas elétricas, dentre elas destacam-se: jato de plasma, descarga corona, barreira dielétrica (DBD), descarga de arco, descarga brilhante (glow), e descarga do tipo faísca (Spark) (JIANG et al., 2014). As mais usuais são:

Jato de plasma: composto por no mínimo dois eletrodos com distância de alguns milímetros (Figura 2) dependendo da tensão do reator (WELTMANN et al., 2008). As principais vantagens são suas pequenas dimensões, aplicabilidade e capacidade para penetrar em espaços estreitos (WELTMANN et al., 2008).

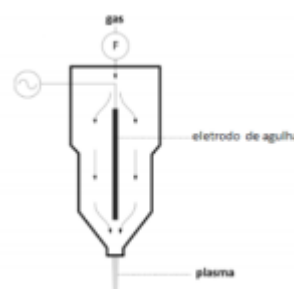


Figura 2 - Reator de plasma frio descarga jato de plasma (SUROWSKY; SCHLUÜTER; KNORR, 2014).

Descarga em barreira dielétrica (DBD): o plasma é gerado entre dois eletrodos que estão separados por uma barreira dielétrica (Figura 3) (EHLBECK et al., 2011; MISRA et al., 2011). As vantagens deste reator são a variedade de gases que podem ser usados, o baixo fluxo de gás necessário em comparação a outras configurações, a possibilidade de inflamar descargas homogêneas até vários metros, bem como, a boa adaptação devido às diferentes geometrias dos eletrodos. No entanto, são necessárias tensões relativamente altas (> 10 kV), dependendo da distância entre os eletrodos, o que faz com que seja essencial precaução e isolamento (EHLBECK et al., 2011; MISRA et al., 2015).

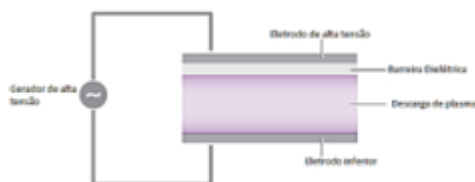


Figura 3 - Reator de Plasma Frio descarga de barreira dielétrica (DBD) (NIEMIRA, 2012).

Descarga corona: produzidas por eletrodos afiados como pontas ou fios finos impostos a alta tensão. Pelo menos um desses eletrodos precisa apresentar um pequeno diâmetro de curvatura, o eletrodo coronário (Figura 4) (SCHOLTZ et al., 2015). As geometrias típicas são as ponta-plano e configurações cilíndricas, que podem ser operadas em corrente contínua alternada, e o eletrodo pode ter potencial negativo ou positivo. A descarga corona normalmente pode ser gerada por dispositivos simples e de baixo custo de produção e operação. Sua aplicação produz tratamentos pouco uniformes, o que confere a esse tipo de reator um modelo destinado à pesquisa experimental.



Figura 4 - Reator de plasma frio descarga corona (SUROWSKY; SCHLUÜTER; KNORR, 2014).

1.4 Plasma Frio: Aplicabilidade

O PF possui aplicação em diversas áreas como a ambiental, biomédica e industrial (MACHALA et al., 2007). Além das aplicações citadas, vários estudos têm mostrado que essa tecnologia é eficaz no tratamento de alimentos, principalmente na descontaminação de produtos, uma vez que apresenta alto potencial antimicrobiano proveniente de espécies reativas geradas durante o tratamento (LOS et al., 2018).

A indústria de alimentos se encontra com um grande desafio de oferecer aos seus consumidores produtos alimentícios nutritivos, seguros e com estabilidade no armazenamento, evitando a contaminação por microrganismos (DA SILVA, 2019). Durante as operações de processamento ou pós-colheita, a contaminação microbiana pode ocorrer em qualquer etapa de fabricação. Geralmente, o processamento térmico é usado para produzir produtos alimentares estáveis e microbiologicamente seguros, no entanto, não é o método preferido devido à perda das qualidades nutricionais e sensoriais, além de a maioria dos consumidores desaprovarem alimentos que contenham conservantes químicos. Esses fatos levaram ao surgimento de tecnologias de descontaminação alternativas, como campos elétricos pulsados, não térmica moderada, processamento de alta pressão, irradiação e PF (EKEZIE; SUN; CHENG, 2017).

O PF tem uma variedade de aplicações para a indústria alimentar, principalmente a descontaminação de alimentos como carnes, produtos lácteos, frutas e vegetais, granulares / particulados (grãos, ervas e especiarias) e sementes germinadas. Esta tecnologia também tem sido aplicada com sucesso para a esterilização superficial em materiais de embalagem (MIR; SHAH; MIR, 2016; MISRA et al., 2015; SCHOLTZ et al., 2015). Essa capacidade do PF em trabalhar a baixas temperaturas tem aberto a possibilidade de usar a tecnologia para o tratamento de alimentos sensíveis ao calor (KORACHI et al., 2015; CULLEN et al., 2017).

Os agentes do plasma contribuem para a ação letal, interagindo com o material biológico. O tratamento com plasma de fato inativa uma extensa gama de microrganismos, incluindo vírus e esporos (DHAYAL et al., 2006). Segundo Moisan et al., (2002) existem três mecanismos principais pelos quais o PF inativa os microrganismos:

- a. interação química de radicais, espécies reativas ou partículas carregadas com membranas celulares;
- b. danos nas membranas e componentes celulares internos pela radiação UV;
- c. quebra das cadeias de DNA por UV gerada durante a recombinação das espécies de plasma.

Enquanto em um determinado produto, um modo de ação pode ser mais significativo do que outro, a maior efetividade saneante resulta do plasma com múltiplos mecanismos antimicrobianos (MOISAN et al., 2002;

LAROUESSI, 2009). Porém, podem existir algumas limitações no processamento do plasma, como aumento na oxidação de lipídios e diminuição da firmeza dos frutos (THIRUMDAS; SARANGAPANI; ANNAPURE, 2015), além de poder afetar também as propriedades de cor dos frutos (MISRA et al., 2014). O uso desse tratamento em alimentos resulta em maior vida útil, segurança e redução do uso de conservantes. Sua aplicabilidade pode ser observada tanto em alimentos sólidos quanto em líquidos, devido às infinidades de configurações (NIEMIRA; 2012; MISRA et al. 2011).

Vale salientar que a eficiência do PF utilizado depende de uma série de fatores como o tipo e a carga inicial de microrganismo, a composição da amostra, o fluxo do gás para a geração do plasma e o estado fisiológico das células (SONG et al., 2009; PHAN et al., 2017). Portanto, os parâmetros de tempo, composição gasosa e características dos reatores de PF (potência, geometria, corrente alternada) contribuem no resultado final (RUNTZEL et al., 2019).

1.5 Plasma Frio: Vantagens e Desvantagens

O uso de altas temperaturas leva a efeitos indesejáveis, como mudança na cor, textura e perda de nutrientes, motivando os pesquisadores a explorar alternativas não térmicas para o processamento de alimentos. O PF é uma das tecnologias não térmicas que apresenta um potencial significativo neste sentido. A inativação por PF de microrganismos patogênicos e deteriorantes pode resultar em produtos alimentícios seguros e minimamente processados com vida útil prolongada. No entanto, a maioria das pesquisas publicadas têm se concentrado na descontaminação microbiana, com estudos limitados sobre o impacto do processamento de PF nos atributos de qualidade (PANKAJ; WAN; KEENER, et al., 2018).

Na última década, o PF ganhou um interesse significativo para uso como tecnologia não térmica para processamento de alimentos. A novidade desta tecnologia está na sua natureza atérmica, destruição mínima de nutrientes e perda de propriedades sensoriais, ausência de subprodutos tóxicos, econômica, versátil, e ecologicamente correta (PANKAJ; WAN; KEENER, et al., 2018). As aplicações de PF para indústrias de alimentos foram demonstradas para descontaminação de alimentos (MISRA et al., 2011), inativação de enzimas (MISRA et al., 2016), remoção de toxinas (MISRA et al., 2015), modificações de embalagens de alimentos (PANKAJ et al., 2014) e tratamento de águas residuais (SARANGAPANI et al., 2016). Particularmente para o processamento de alimentos, o CP demonstrou ser eficaz contra os principais microrganismos patogênicos de origem alimentar, como *E. coli* (BERMÚDEZ-AGUIRRE et al., 2013), *S. typhimurium* (FERNÁNDEZ; NORIEGA;

THOMPSON, 2013), *S. aureus* (KIM et al., 2014) e *L. monocytogenes* (ZIUZINA et al., 2014).

As principais limitações do PF são o estado relativamente inicial de desenvolvimento de tecnologia, a variedade e complexidade do equipamento necessário e os impactos amplamente inexplorados do tratamento com PF nas qualidades sensoriais e nutricionais dos alimentos tratados. Além disso, os modos de ação antimicrobianos para vários sistemas de PF variam dependendo do tipo de PF gerado (NIEMIRA, 2012).

1.6 Plasma Frio versus Ozônio

O ozônio (O₃) é um importante gás oxidante e agente germicida bastante utilizado na indústria alimentícia, mostrando ser eficiente contra fungos, micotoxinas, bactérias e pesticidas. É reconhecido como uma técnica segura que não deixa resíduo no alimento e ambiente, pois é convertido em oxigênio (DA SILVA et al., 2019). Por ser instável, requer que ele seja produzido no seu local de aplicação reduzindo assim gastos e perigos relacionados como seu transporte e estocagem (TATAPUDI; FENTON, 1994).

O PF, tecnologia mais recente, vem sendo utilizado na indústria de alimentos com o mesmo objetivo. Seu uso não altera sabor e odor do alimento, apresenta tratamento uniforme e não deixa resíduos. O plasma tem sido aplicado em alimentos para a descontaminação, além de ser usado também para esterilização superficial de embalagens. Essas duas tecnologias não-térmicas de descontaminação, demonstraram seu potencial em alimentos para humanos e animais (DA SILVA et al., 2019).

Uma das maiores limitações do PF em alimentos é referente a sua eficácia na descontaminação de microrganismos, que varia de acordo com a matriz alimentar e a estrutura da superfície (BOURKE et al., 2018). Em estudo realizado por Smet et al. (2017), constatou-se que as células em um veículo líquido são mais resistentes à inativação do plasma do que em superfícies sólidas, devido à dificuldade de espécies reativas se difundirem em meio líquido. O mesmo é observado na umidade relativa do gás indutor, que mostrou influenciar significativamente na eficácia antimicrobiana do PF (ZIUZINA et al., 2014). A estrutura dos alimentos precisa também ser levada em conta nos tratamentos de PF para garantir eficácia e segurança, fissuras e fendas na superfície do alimento podem dificultar a eficácia do tratamento contra microrganismos, já que a tecnologia atinge somente a superfície (ZIUZINA et al., 2014). Fatores intrínsecos como osmolaridade e pH também afetam a eficácia do tratamento com PF, pois podem resultar em endurecimento por estresse das bactérias, tornando-as mais resistente, assim como alguns componentes dos

alimentos como seu teor lipídico e o estado antioxidante que podem diminuir a atividade de espécies reativas plasmática (BOURKE et al., 2018). Já a principal limitação do O₃, segundo Prabha et al. (2015), é a toxicidade quando inalado, causando problemas nas vias respiratórias. É um gás altamente instável, portanto não é possível seu armazenamento. Ainda em relação a suas limitações em alimentos, o ozônio não pode ser considerado universalmente benéfico, pois em altas concentrações, pode promover a degradação oxidativa, alterando o sabor e a coloração do produto alimentício (DA SILVA et al., 2012). Apesar do O₃ ter um efeito imediato na eliminação de microrganismos em alimentos e água, posteriormente pode haver uma recontaminação, pois o residual de O₃ é praticamente nulo (DA SILVA et al., 2012).

As tecnologias de PF e O₃ em alimentos, mostram resultados promissores na descontaminação de bactérias, fungos, micotoxinas e pesticidas. No entanto, a elucidação das modificações no alimento seja sensorial, química ou física precisam ser mais estudadas, assim como o potencial tóxico do PF. Em relação ao uso dessas tecnologias na indústria, as duas mostram ser eficazes em relação a descontaminação de microrganismos na superfície, são tecnologias verdes e com sustentabilidade ambiental, pois não geram resíduos, e necessitam de baixa energia para suas operações comparadas aos processamentos térmicos. No entanto, para o PF ainda há a necessidade de desenvolvimento de projetos para uma escala industrial, validação e aprovação regulatória por órgãos responsáveis, além da aceitação do consumidor. Apesar dos benefícios comprovados das duas tecnologias na obtenção de alimentos seguros e de alta qualidade, condições específicas de tratamento devem ser padronizadas para cada produto alimentício. Por fim, a aceitação do consumidor, custo-efetividade, aspectos legais e segurança precisam ser levados em consideração em estudos futuros (DA SILVA et al., 2019).

1.7 Plasma Frio *versus* Pasteurização

A pasteurização é eficaz na inativação dos microrganismos, porém a temperatura desnatura também os compostos de interesse no produto, como aspectos sensoriais e físico-químicos (CARNEIRO et al., 2000). Todavia, existem outras técnicas em momento ascendente que buscam manter o alimento de modo natural (MONTENEGRO et al., 2002). Para Laroussi & Leipold (2004), o plasma é um germicida eficiente, que atua por meio de radiação ultravioleta e da interação das espécies reativas com a superfície do alimento, sem qualquer aquecimento do meio, isso é também considerado por Shi et al., (2011), destacando que a ausência de geração de calor evita efeitos negativos para os aspectos nutricionais dos alimentos.

CONCLUSÃO

Como visto na literatura, existem diversas formas de gerar plasma, devido a isto, variados são os tipos gerados, cujas características peculiares permitem que sejam destinados às diferentes aplicações.

Esta tecnologia é considerada uma técnica moderna não convencional e bastante vantajosa, principalmente na descontaminação microbiana, desde a esporulação e deterioração de organismos patogênicos, até a degradação de resíduos de agrotóxicos.

As tecnologias de PF e O₃ em alimentos, mostram resultados promissores na descontaminação de bactérias, fungos, micotoxinas e pesticidas, sendo as duas consideradas tecnologias verdes, que não geram resíduos, e necessitam de baixa energia para suas operações.

Quando comparado com a pasteurização, o ponto de maior relevância em seu uso se dá pela ausência da geração de calor, evitando efeitos negativos para os aspectos nutricionais, sensoriais e físico-químicos dos alimentos.

Por fim, as principais limitações do PF são o estado relativamente inicial de desenvolvimento de tecnologia, a variedade e complexidade do equipamento necessário e os impactos amplamente inexplorados do tratamento com PF nas qualidades sensoriais e nutricionais dos alimentos tratados. Além disso, os modos de ação antimicrobianos para vários sistemas de PF variam dependendo do tipo de PF gerado.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AFSHARI, Roya; HOSSEINI, Hedayat. Non-thermal plasma as a new food preservation method, its present and future prospect. **J Paramed Sci**, v. 5, p. 2008-78, 2014.

BERMÚDEZ-AGUIRRE, Daniela; WEMLINGER, Erik; PEDROW, Patrick; BARBOSA-CÁNOVAS, Gustavo; PEREZ, Manuel Garcia. Effect of atmospheric pressure cold plasma (APCP) on the inactivation of *Escherichia coli* in fresh produce. **Food Control**, v. 34, n. 1, p. 149-157, 2013.

BOURKE, Paula; ZIUZINA, Dana; BOEHM, Daniela; CULLEN, Patrick; KEENER, Kevin. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production. **Trends in Biotechnology**, p.1-12, 2018.

- BRUGGEMAN, Peter; LEYS, Christophe. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 42, n. 5, p. 053001, 2009.
- BUTSCHER, Denis; ZIMMERMANN, Daniel; SCHUPPLER, Markus; VON ROHR, Philipp Rudolf. Plasma inactivation of bacterial endospores on wheat grains and polymeric model substrates in a dielectric barrier discharge. **Food Control**, v. 60, p. 636-645, 2016.
- CARNEIRO, Lucia Cesar; GOMES, Flavia dos Santos; CABRAL, FURTADO, Angela Aparecida Lemos; CABRAL, Lourdes Maria Correa. Esterilização de suco de abacaxi por microfiltração. **Embrapa Agroindústria de Alimentos-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2000.
- CHOI, Soee; PULIGUNDLA, Pradeep; MOK, Chulkyoon. Effect of corona discharge plasma on microbial decontamination of dried squid shreds including physico-chemical and sensory evaluation. **Lwt**, v. 75, p. 323-328, 2017.
- CULLEN, Patrick; LALOR, James; SCALLY, Laurenci; BOEHM, Daniela; MILOSAVLJEVIC, Vladimir; BOURKE, Paula; KEENER, Kevin. Translation of plasma technology from the lab to the food industry. **Plasma Processes and Polymers**, v. 15, n. 2, p. 1700085, 2018.
- D'AGOSTINO, Riccardo; FLAVIA, Pietro; KAWAI, Yoshinobu; IKEGAMI, Hideo; SATO, Noriyoshi; AREFI-KHONSARI, Farzaneh. **Advanced plasma technology**. John Wiley & Sons, 2008.
- DA SILVA, JULIANA REGINA, et al. Fungos: estratégias de descontaminação por plasma a frio e ozônio gasoso na segurança de alimentos extrusados. 2019.
- DA SILVA, Ruthilene; JÚNIOR, Clodomiro Alves; OLIVEIRA, Heriberto. Surface modification of polyester fabric by non-thermal plasma treatment. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2012.
- DEVI, Yamuna; THIRUMDAS, Rohit; SARANGAPANI, Chaitanya; DESHMUKH, Rajendra; ANNAPURE, Uday. Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts. **Food Control**, n.77, p.187-191, 2017.
- DHAYAL, Marshal; LEE, Sook-Young; PARK, Sang-Un. Using low-pressure plasma for *Carthamus tinctorius* L. seed surface modification. **Vacuum**, v. 80, n. 5, p. 499-506, 2006.
- EHLBECK, Jorg; SCHNABEL, Uta; POLAK, Martin; WINTER, Jorn; VON WOEDTKE, Th; BRANDENBURG, Ronny; HAGEN, T. V. D.; WELTMANN, Klaus-Dieter. Low temperature atmospheric pressure plasma sources for microbial decontamination. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 44, n. 1, 2011.
- EKEZIE, Flora-Glad Chizoba; SUN, Da-Wen; CHENG, Jun-Hu. 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.
- ELIEZER, Shalom; ELIEZER, Yaffa. **The fourth state of matter: an introduction to plasma science**. CRC Press, 2001.
- FERNANDEZ, Ana; NORIEGA, Estefania; THOMPSON, Arthur. Inactivation of Salmonella enterica serovar Typhimurium on fresh produce by cold atmospheric gas plasma technology. **Food Microbiology**, v. 33, n. 1, p. 24-29, 2013.
- FRIDMAN, A.; CHIROKOV, A.; GUTSOL, A. Non-thermal atmospheric pressure discharges. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 38, n. 2, p. R1, 2005.
- FRIDMAN, Alexander. **Plasma chemistry**. Cambridge university press, 2008.
- GERRITY, Daniel; STANFORD, Benjamin; TRENHOLM, Rebecca; SNYDER, Shane. An evaluation of a pilot-scale nonthermal plasma advanced oxidation process for trace organic compound degradation. **water research**, v. 44, n. 2, p. 493-504, 2010.
- HEINLIN, Julia; ISBARY, Georg; STOLZ, Wilhelm; MORFILL, G; LANDTHALER, Michael; SHIMIZU, T; STEFFES, B, NOSENKO, Tetyana; ZIMMERMANN, Ji; KARRER, Sigrid. Plasma applications in medicine with a special focus on dermatology. **Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology**, v. 25, n. 1, p. 1-11, 2011.
- JIANG, Bo; ZHENG, Jingtang; QIU, Shi; WU, Mingbo; ZHANG, Qinhui; YAN, Zifeng; XUE, Qingzhong. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. **Chemical Engineering Journal**, Shandong, v.236, p.348-368, jan. 2014.
- JUNG, Samooel; LEE, Juri; LIM, Youbong; CHOE, Wonho; YONG, Hae In; JO, Cheorun. Direct infusion of nitrite into meat batter by atmospheric pressure plasma treatment. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 39, p. 113-118, 2017.
- KIEFT, Ingrid Elisabeth. **Plasma needle: exploring biomedical applications of non-thermal plasmas**. Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- KORACHI, May; OZEN, F; ASLAN, N; VANNINI, L, GUERZONI, M; GOTTARDI, D; EKLINCL, F. Biochemical changes to milk following treatment by a

novel, cold atmospheric plasma system. **International Dairy Journal**, v. 42, p. 64-69, 2015.

LAROUSSI, Mounir; LEIPOLD, F. Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure. **International Journal of Mass Spectrometry**, v. 233, n. 1-3, p. 81-86, 2004.

LAROUSSI, Mounir. Low-temperature plasmas for medicine?. **IEEE Transactions on plasma science**, v. 37, n. 6, p. 714-725, 2009.

LIU, Chang-jun; XU, Gen-hui; WANG, Timing. Non-thermal plasma approaches in CO₂ utilization. **Fuel Processing Technology**, v. 58, n. 2-3, p. 119-134, 1999.

LOS, Agata; ZIUZINA, Dana; AKKERMANS, Simen; BOEHM, Daniela; CULLEN, Patrick; VAN IMPE, Jan; BOURKE, Paula. Improving microbiological safety and quality characteristics of wheat and barley by high voltage atmospheric cold plasma closed processing. **Food Research International**, v. 106, p. 509-521, 2018.

MACHALA, Zdenko; JANDA, M; HENSEL, K; JEDLOVSKY, I. Emission spectroscopy of atmospheric pressure plasmas for bio-medical and environmental applications. **Journal of Molecular Spectroscopy**, v. 243, n. 2, p. 194-201, 2007.

MENDES, Karina D. S.; SILVEIRA, Renata C. de C. P.; GALVÃO, Cristina M. Revisão integrativa da literatura: um método de pesquisa para incorporar evidências em saúde e enfermagem. **Texto & Contexto-Enfermagem**, v. 17, p. 758-764, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-07072008000400018>>

MIN, Sea; ROH, Si Hyeon; NIEMIRA, Brendan; BOYD, Glenn; SITES, Joseph; UKNAILS, Joseph; FAN, Xuetong. In-package inhibition of E. coli O157: H7 on bulk Romaine lettuce using cold plasma. **Food microbiology**, v. 65, p. 1-6, 2017.

MIR, Shabir Ahmad; SHAH, Manzoor Ahmad; MIR, Mohammad Maqbool. Understanding the role of plasma technology in food industry. **Food and Bioprocess Technology**, v. 9, n. 5, p. 734-750, 2016.

MISRA, N; KAUR; Seeratpreet; KUMAR, Tiwari Brijesh; KAUR, Amritpal; SINGHN, Narpinder; CULLEN, Patrick. Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of wheat flour. **Food Hydrocolloids**, v. 44, p. 115-121, 2015.

MISRA, N; KUMAR, Tiwari Brijesh; RAGHAVARAO Ksms; CULLEN, Patrick. Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens. **Food Engineering Reviews**, v. 3, n. 3-4, p. 159-170, 2011.

MISRA, N; MOISEEV, Tamara; PATIL, Sonal; PANKAJ, Shashi Kishor; BOURKE, Paula; MOSNIER, J; KEENER, Kevin; CULLEN, Patrick. Cold plasma in modified atmospheres for post-harvest treatment of strawberries. **Food and bioprocess technology**, v. 7, n. 10, p. 3045-3054, 2014.

MISRA, N; PANKAJ, Shashi Kishor; SEGAT, Annalisa; ISHIKAWA, Kenji. Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. **Trends in Food Science & Technology**, v. 55, p. 39-47, 2016.

MISRA, N; PANKAJ, Shashi Kishor; WALSH, Tony; O'REGAN, Finbarr; BOURKE, Paula; CULLEN, Patrick. In-package nonthermal plasma degradation of pesticides on fresh produce. **Journal of hazardous materials**, v. 271, p. 33-40, 2014.

MISRA, N; YADAV, Barun; ROOPESH, M; JO, Cheorun. Cold plasma for effective fungal and mycotoxin control in foods: mechanisms, inactivation effects, and applications. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 18, n. 1, p. 106-120, 2019.

MOISAN, Michel; CREVIER, Marie-Charlotte; PELLETIER, Jacques; BARBEAU, Jean. Plasma sterilization. Methods and mechanisms. **Pure and applied chemistry**, v. 74, n. 3, p. 349-358, 2002.

MONTENEGRO, J; RUAN, Roger; MA, Hongbin; CHEN, Paul. Inactivation of E. coli O157: H7 using a pulsed nonthermal plasma system. **Journal of food science**, v. 67, n. 2, p. 646-648, 2002.

NIEMIRA, Brendan A. Cold plasma decontamination of foods. **Annual review of food science and technology**, v. 3, p. 125-142, 2012.

OH, Yoon Ah; ROH, Si Hyeon; MIN, Sea C. Cold plasma treatments for improvement of the applicability of defatted soybean meal-based edible film in food packaging. **Food Hydrocolloids**, v. 58, p. 150-159, 2016.

PANKAJ, Shashi Kishor; BUENO-FERRER, Carmen; MISRA, N; O'DONNELL, C; MILOSAVLJEVIC, Vladimir; BOURKE, Paula; KEENER, Kevin; CULLEN, Patrick. Applications of cold plasma technology in food packaging. **Trends in Food Science & Technology**, v. 35, n. 1, p. 5-17, 2014.

PANKAJ, Shashi; WAN, Zifan; KEENER, Kevin. Effects of cold plasma on food quality: A review. **Foods**, v. 7, n. 1, p. 4, 2018.

PATANGE, Apurva; BOEHM, Daniela; BUENO-FERRER, Carmen; CULLEN, Patrick; BOURKE, Paula. Controlling *Brochothrix thermosphacta* as a spoilage risk using in-package atmospheric cold plasma. **Food microbiology**, v. 66, p. 48-54, 2017.

PHAN, Khanh Thi Kim; PHAN, Huan Tai; KASEMSAK, Uthaihana; YUTHANA, PHIMOLSIRIPOL. Effect of non-thermal plasma on physicochemical properties of Nam Dok Mai mango. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 7, n. 1, p. 263-268, 2017.

PHILIP, Nicolas; SAOUDI, Bachir; CREVIER, M; MOISAN, Michel. The respective roles of UV photons and oxygen atoms in plasma sterilization at reduced gas pressure: The case of N/sub 2/-O/sub 2/-mixtures. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 30, n. 4, p. 1429-1436, 2002.

PULIGUNDLA, Pradeep; LEE, Taehoon; MOK, Chulkyoon. Inactivation effect of dielectric barrier discharge plasma against foodborne pathogens on the surfaces of different packaging materials. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 36, p. 221-227, 2016.

ROTH, J Reece. **Principles, industrial plasma engineering**. Vol. I. 1995.

RÜNTZEL, Cristina Link, DA SILVA, Juliana Regina; DA SILVA, Bruna Aparecida; MOECKE, Elisa Siegel; SCUSSEL, Vildes Maria. Effect of cold plasma on black beans (*Phaseolus vulgaris* L.), fungi inactivation and micro-structures stability. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, p. 864-873, 2019.

SARANGAPANI, Chaitanya, BOURKE, Paula; MISRA, N. Pesticide degradation in water using atmospheric air cold plasma. **Journal of Water Process Engineering**, v. 9, p. 225-232, 2016.

SCHOLTZ, Vladimir; PAZLAROVA, Jarmila; SOUSKOVA, Hana; KHUN, Josef; JULAK, Jaroslav. Nonthermal plasma-A tool for decontamination and disinfection. **Biotechnology Advances**, v.33, n.1, p.1108-1119, 2015.

SHI, Xing Min; ZHANG, Guan Jun; WU, Xi Li; LI, Ya Xi; MA, Yue; SHAO, Xian Jun. Effect of low-temperature plasma on microorganism inactivation and quality of freshly squeezed orange juice. **Plasma Science, IEEE Transactions on**, n.39, p.1591-1597, 2011.

SHI, Xing Min; ZHANG, Guan Jun; WU, Xi Li; LI, Ya XI. Effect of low-temperature plasma on microorganism inactivation and quality of freshly squeezed orange juice. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 39, n. 7, p. 1591-1597, 2011.

SLADEK, R E J; STOFFELS, Eva. Deactivation of *Escherichia coli* by the plasma needle. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 38, n. 11, p. 1716, 2005.

SOHBATZADEH, F; MIRZANEJHAD, S; SHOKRI, H; NIKPOUR, M. Inactivation of *Aspergillus flavus*

spores in a sealed package by cold plasma streamers. **Journal of Theoretical and Applied Physics**, v. 10, n. 2, p. 99-106, 2016.

SONG, Hyun Pa; KIM, Binna; CHOE, Jun Ro; JUNG, Samooel; JO, Cheorun. Evaluation of atmospheric pressure plasma to improve the safety of sliced cheese and ham inoculated by 3-strain cocktail *Listeria monocytogenes*. **Food Microbiology**, n.26, p.432-436, 2009.

SOUZA, Marcela T.; SILVA, Michelly D.; CARVALHO, Raquel. Revisão integrativa: o que é? Como fazer isso?. **Einstein (São Paulo)**, v. 8, p. 102-106, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1679-45082010RW1134>

SUROWSKY, Bjorn; SCHLÜTER, Oliver; KNORR, Dietrich. Interactions of Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma with Solid and Liquid Food Systems: A Review. **Food Engineering Reviews**, v.7, n.2, p.82-108, jul. 2014.

TATAPUDI, Pallav; FENTON, James M. Electrochemical oxidant generation for wastewater treatment. In: SEQUEIRA, C.A.C. **Environmental Oriented Electrochemistry**. Amsterdam: Elsevier, p. 103-130, 1994.

TENDERO, Claire; TIXIER, Christelle; TRISTANT; Pascal; DESMAISON, Jean; LEPRINCE, Phillippe. Atmospheric pressure plasmas: A review. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 61, n. 1, p. 2-30, 2006.

THIRUMDAS, Rohit; SARANGAPANI, Chaitanya; ANNAPURE, Uday S. Cold plasma: a novel non-thermal technology for food processing. **Food biophysics**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2015.

WELTMANN, Klaus Dieter; BRANDENBURG, Ronny; VON WOEDTKE, Th.; EHLBECK, Jorg; FOEST, R.; STIEBER, Manfred; KINDEL, E. Antimicrobial treatment of heat sensitive products by miniaturized atmospheric pressure plasma jets (APPJs). **Journal of Physical Application Physics**, v.41, n.19, set. 2008.

ZIUZINA, Dana; PATIL, Sonal; CULLEN, Patrick; KEENER, Kevin; BOURKE, Paula. Atmospheric cold plasma inactivation of *Escherichia coli*, *Salmonella entericaserovar Typhimurium* and *Listeria monocytogenes* inoculated on fresh produce. **Food Microbiology**, n.42, p.109-116, 2014.