



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Faculdade de Engenharia Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4285 - secdireq@feq.ufu.br - www.feq.ufu.br



HOMOLOGAÇÃO Nº 59

ISABELA SILVA RODRIGUES

Aplicação de plasma frio na produção de carnes e derivados: uma revisão

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado nesta data para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - *campus* Patos de Minas (MG) pela banca examinadora constituída por:

Prof.ª Dr.ª Marieli de Lima
Orientador(a) - FEQUI/UFU

Prof.ª Dr.ª Edna Regina Amante
UFSC

Prof.ª Dr.ª Michelle Andriati Sentanin
FEQUI/UFU

Patos de Minas, 17 de dezembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Edna Regina Amante, Usuário Externo**, em 17/12/2021, às 11:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marieli de Lima, Professor(a) do Magistério Superior**, em 17/12/2021, às 11:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Michelle Andriati Sentanin, Professor(a) do Magistério Superior**, em 17/12/2021, às 14:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3266546** e o código CRC **7EC6924C**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ALIMENTOS



ISABELA SILVA RODRIGUES

APLICAÇÃO DE PLASMA FRIO NA PRODUÇÃO DE CARNES E DERIVADOS:
UMA REVISÃO

Patos de Minas - MG

2021

ISABELA SILVA RODRIGUES

APLICAÇÃO DE PLASMA FRIO NA PRODUÇÃO DE CARNES E DERIVADOS:
UMA REVISÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marieli de Lima

Coorientador: Prof. Dr. Luís Carlos Oliveira
dos Santos Jr

Patos de Minas - MG

2021

ISABELA SILVA RODRIGUES

APLICAÇÃO DE PLASMA FRIO NA PRODUÇÃO DE CARNES E DERIVADOS:
UMA REVISÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Alimentos.

Patos de Minas, 08 de dezembro de 2021.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Marieli de Lima – Orientadora - FEQUI/UFU

Prof.^a Dr.^a Michelle Andriati Sentanin – FEQUI/UFU

Prof.^a Dr.^a Edna Regina Amante – UFSC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois através da sua força me permitiu que chegasse até aqui, toda honra e glória a ti Senhor.

A minha mãe, Seni, que sempre esteve comigo nessa caminhada e nunca me desamparou nem nos momentos mais difíceis.

Ao meu pai, Marcelo, pelo apoio dado, que foi fundamental ao longo desses anos para que eu conseguisse estudar e morar fora.

Ao meu esposo, que esteve comigo quase desde o início dessa jornada e sempre me motivou a continuar.

À toda minha família, que sempre esteve presente, mesmo que distantes, na minha vida.

A todos os professores que contribuíram para minha formação desde a pré-escola até hoje. Especialmente a minha orientadora Prof.^a Dr.^a Marieli de Lima, pela paciência e por ter aceitado desde o primeiro momento me orientar, mesmo com as dificuldades que tive ao longo desse processo. Muito obrigada, por não ter desistido de mim e ter dado o seu melhor para contribuir com o encerramento desse ciclo em minha vida, se não fosse por você, eu não teria chegado até aqui.

Agradeço meu co-orientador, Prof. Dr. Luís Carlos Oliveira dos Santos Jr, por ter aceitado o convite e contribuído com sua sabedoria na orientação desse trabalho.

À banca examinadora, Prof.^a Dr.^a Michelle Andriati Sentanin e Prof.^a Dr.^a Edna Regina Amante por terem aceitado o convite.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para esse momento tão sonhado.

RESUMO

A crescente demanda por alimentos que proporcionem segurança ao consumidor, e que ao mesmo tempo atendam à qualidade e aos aspectos sensoriais semelhantes ao alimento natural faz com que a indústria de alimentos adote novas tecnologias de processamento. Diante disso, o trabalho tem como objetivo revisar e informar sobre a tecnologia de plasma a frio na indústria de carnes, visando destacar os pontos relevantes nesta tecnologia emergente. Foi realizada uma análise do mecanismo de ação do plasma sobre os micro-organismos, e destacados os diferentes sistemas de geração de plasma, além de citar estudos recentes da aplicação de plasma a frio em produtos carnes e derivados. Além disso, foram salientados os desafios dessa tecnologia não térmica, seus efeitos sobre a qualidade dos alimentos e as perspectivas futuras. A partir do levantamento bibliográfico, foi possível observar que o plasma frio é claramente uma ferramenta útil para a indústria de alimentos, ainda exigindo muito mais pesquisa e desenvolvimento para elucidar suas interações relacionadas aos alimentos. Conclui-se que os estudos com plasma a frio são promissores para descontaminação de produtos carnes e dependendo das variáveis de operação, como período curto de aplicação, não há a deterioração significativa nos alimentos. O método de descarga de barreira dielétrica (DBD) mostrou-se o mais adotado para as carnes, por ser uma alternativa segura e de baixo custo para a indústria de processamento.

Palavras-chave: Processos não térmicos, plasma frio, descarga elétrica, produtos de origem animal, produtos carnes

ABSTRACT

The growing demand for foods that provide consumer safety, and at the same time meet the quality and sensory aspects similar to natural food, makes the food industry adopt new processing technologies. Therefore, the work aims to review and inform about cold plasma technology in the meat industry, aiming to highlight the relevant points in this emerging technology. An analysis of the mechanism of action of plasma on microorganisms was carried out, and the different plasma generation systems were highlighted, in addition to mentioning recent studies on the application of cold plasma in meat and meat products. Furthermore, the challenges of this non-thermal technology, its effects on food quality and future prospects were highlighted. From the literature review, it was possible to observe that cold plasma is clearly a useful tool for the food industry, still requiring much more research and development to elucidate its interactions related to food. It is concluded that studies with cold plasma are promising for the decontamination of meat products and depending on operating variables, such as short application period, there is no significant deterioration in the food. The dielectric barrier discharge (DBD) method proved to be the most adopted for meat, as it is a safe and low-cost alternative for the processing industry.

Keywords: Non-thermal processes, cold plasma, electrical discharge, animal products, meat products

Sumário

1	Introdução às tecnologias não térmicas em carnes e derivados	1
2	Tratamentos por plasma a frio: histórico e conceitos.....	3
3	Aplicação do plasma a frio em carnes e produtos cárneos.....	10
4	Mecanismo de ação e impacto do plasma na superfície de produtos cárneos.....	19
4.1	Inativação microbiana em carnes e produtos cárneos.....	21
4.2	Manutenção de propriedades químicas e físicas das carnes e produtos cárneos	23
4.3	Preservação das características sensoriais das carnes e produtos cárneos	31
	Considerações finais	32
	Referências	33

1 Introdução às tecnologias não térmicas em carnes e derivados

O interesse da indústria, diante da demanda por alimentos mais próximos de sua forma original, que apresentem qualidade e segurança sem perder suas características nutricionais, funcionais e sensoriais, aumenta a busca por tratamentos não térmicos. Essas tecnologias vêm ganhando destaque no setor alimentício, pois utilizam temperaturas brandas na conservação de alimentos. Contrariando aos métodos convencionais térmicos como esterilização, pasteurização e secagem em alta temperatura, que embora sejam eficientes para estender a vida útil de alimentos, provocam mudanças sensoriais na textura, cor, aroma e perdas nutricionais (OLATUNDE; BENJAKUL, 2018b; PANKAJ et al., 2018). Diante desses desafios, os métodos não térmicos se mostram confiáveis por possuírem propriedades que inativam micro-organismos com temperaturas moderadas em pequenos períodos de tratamento, o que é benéfico em comparação com tratamentos térmicos convencionais (PEREIRA et al., 2010; SUROWSKY et al., 2015; HOJNIK et al., 2017).

As vantagens dos tratamentos não térmicos consistem na melhoria da manutenção dos aspectos físico-químicos e sensoriais dos produtos em relação aos processamentos que operam com o uso de calor, além de uma diminuição no gasto energético, aumento da estabilidade e da vida útil dos alimentos (RAMOS et al., 2006; WAN et al., 2009; PEREIRA et al., 2010; MUKHOPADHYAY et al., 2012; SUROWSKY et al., 2015; TROY et al., 2016; ZHU et al., 2016).

As tecnologias não térmicas podem ser classificadas em dois grupos: um deles refere-se aos processos em combinação com calor como a alta pressão, radiação ultravioleta (UV), luz pulsada, ultrassom e o campo elétrico pulsado. O outro grupo se refere a tecnologias que possam ser consideradas como puramente não térmicas, que incluem o plasma frio e a irradiação. Alguns processos não térmicos podem envolver o aquecimento devido à geração de energia interna no alimento, porém são denominados assim devido à não utilização de temperaturas elevadas para processamento e não haver modificações bruscas nas propriedades sensoriais, cor e valor nutritivo dos alimentos (PEREIRA et al., 2010; BERMÚDEZ-AGUIRRE et al., 2013).

Com base no processo, o plasma frio é classificado como plasma não térmico (plasmas fora do equilíbrio) e plasma térmico (plasmas próximos do equilíbrio). Os plasmas térmicos são caracterizados por elétrons de alta temperatura e partículas densas, enquanto os plasmas frios são compostos de elétrons de temperatura relativamente alta e partículas de baixa temperatura (FARBER et al., 2019). Para aplicação prática e para fins de pesquisa, o plasma não térmico é

preferível, devido à ausência de resíduos tóxicos, baixo consumo de energia, equipamentos simples e condições operacionais sem emprego de temperatura (FARBER et al., 2019). O plasma origina-se a partir de elétrons, que através da ionização produzem a excitação atômica ou molecular, dissociação e produção de estados moleculares radicais e metaestáveis formando, com isso, um meio gasoso ativo que pode ser utilizado de forma segura, sem provocar danos aos meios que o circunda (SUROWSKY et al., 2015; MISRA et al., 2015).

A carne e os produtos cárneos são susceptíveis ao ataque de micro-organismos ao longo de toda sua cadeia produtiva, por apresentarem alta atividade de água e possuírem em sua composição um elevado teor de nutrientes, fatores necessários para formar um ambiente favorável ao crescimento microbiano (JAYASENA et al., 2014). Apesar de serem produtos perecíveis, a descontaminação das carnes e produtos cárneos atribui uma vulnerabilidade grande em termos de perda de atributos sensoriais, quando expostos a tratamentos convencionais de alta temperatura, como esterilização (MISRA; JO, 2017). Ademais, processos comuns empregados na conservação destes produtos, como congelamento, resfriamento e desidratação (MISRA; JO, 2017), tecnologias envolvendo redução da atividade de água e pH, como sal ou açúcar, e embalagens ativas são comuns no processamento de carnes e derivados (BARBOSA-CANOVAS et al., 2014). No processamento térmico de carnes, as principais mudanças negativas na estrutura alimentar é a perda de textura, oxidação lipídica e formação de compostos indesejáveis como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), aminas heterocíclicas e compostos nitrosos (BEHSNILIAN et al., 2014; MISRA; JO, 2017).

A importância de estudar e aprofundar novas tecnologias são de suma importância para manutenção da qualidade dos produtos cárneos, principalmente os frescos, a exemplo dos frutos do mar que são preferencialmente consumidos crus. O processamento de plasma a frio é inovador para várias aplicações e em alimentos e vem se destacando na descontaminação microbiana, inativação de enzimas e modificação funcional (SRUTHI, et al., 2021). O plasma a frio está entre os métodos mais promissores de tecnologia não térmica (GOVAERT et al., 2020; KIM et al., 2020; LAROQUE et al., 2022), de pasteurização e esterilização na indústria de alimentos (BOURKE et al., 2018).

Alguns estudos recentes mostram que o plasma a frio tem grande capacidade de reduzir a carga microbiana patogêna de origem alimentar (XU et al., 2017; LIAO et al., 2018; OLATUNDE et al., 2019a), destruir micotoxinas (MISRA et al., 2019; PULIGUNDLA et al., 2020), inativar enzimas (MISRA et al., 2016; KANG et al., 2019), provocar modificações nas

embalagens de alimentos (OH YOON et al., 2016), aumentar a concentração de compostos bioativos (SILVEIRA et al., 2019), tratar pesticidas residuais (SARANGAPANI et al., 2017), além de atividade antioxidante (LI et al., 2019a, 2019b).

Dentre as diversas tecnologias não térmicas, o plasma a frio vem sendo aplicado para descontaminar produtos cárneos evitando mudanças indesejáveis, sendo muito eficaz contra vários micro-organismos que são responsáveis pela formação de biofilmes e esporos bacterianos (MONTIE et al., 2000; DENG et al., 2005; VLEUGELS et al., 2005). O plasma frio é uma tecnologia emergente para o processamento de alimentos em temperaturas moderadas e em curto espaço de tempo. Algumas variáveis do tratamento como tensão, frequência, tempo de tratamento, distância entre eletrodos e composição do gás influenciam na eficiência do plasma na desinfecção microbiana, inativação de enzimas e nos aspectos nutricionais (LAROQUE et al., 2022).

No entanto, o seu uso ainda é limitado pela necessidade de se avaliar a segurança no emprego do processo, bem como da Legislação a ser seguida e as consequências desse tratamento no aspecto sensorial. O tratamento por plasma a frio ainda é um processo desconhecido em relação aos efeitos adversos nos alimentos, como por exemplo a oxidação de lipídios (LAROQUE et al., 2022). Alguns dos principais desafios que limitam sua aplicação industrial incluem as alterações das características nutricionais e sensoriais decorrentes da produção de radicais livres, que podem resultar em auto oxidação (NIVEDITHA et al., 2021). As futuras investigações devem se concentrar em minimizar essas limitações podendo associar combinações de plasma frio com outras técnicas para preservação de alimentos.

Frente ao exposto, esta revisão tem como objetivo denotar o panorama de utilização do plasma frio em diversos tipos de carnes e derivados, demonstrando a sua aplicabilidade, mecanismos de ação e perspectivas futuras para o setor.

2 Tratamentos por plasma a frio: histórico e conceitos

O plasma a frio é um método não convencional que ocupa destaque devido aos benefícios relacionados à temperatura moderada e à eficácia antimicrobiana que possui, sendo estudado pelos pesquisadores como um tratamento para a inativação microbiana (SHARMA et al., 2009; BERMÚDEZ-AGUIRRE et al., 2013; STOICA et al., 2014; BAIER et al., 2015; MOK et al., 2015; SUROWSKY et al., 2015).

Embora seja uma técnica recente utilizada em alimentos, o plasma foi descoberto no século XVIII, sendo identificado primeiramente como uma mistura de íons e elétrons. Apenas em 1923 o termo “plasma” foi definido por um químico americano que descobriu que havia oscilações nos gases ionizados e através disso determinou a densidade e a massa do elétron. Sendo assim, inicialmente foi denominado de “oscilações plasma”, ou seja, essas oscilações são geradas devido a uma carga de distribuição não homogênea e a uma tendência natural desta carga para redistribuição uniforme dentro do plasma (SUROWSKY et al., 2015; MISRA et al., 2015).

O plasma é considerado o quarto estado da matéria, depois dos sólidos, líquidos e gases e geralmente é visualizado como um arco ou descarga de luz fluorescente brilhante. Fisicamente, é uma mistura gasosa parcial ou totalmente ionizada (NIEMIRA, 2012; STOICA et al., 2014). Geralmente, o plasma é gerado passando descarga elétrica em gases inertes em temperatura ambiente sob diferentes condições atmosféricas (que incluem alta e baixa pressão) (COUTINHO et al., 2018). Se o plasma for gerado em condições amenas de temperatura, é denominado de plasma frio, mediante a faixa de temperatura de 30 a 60°C, fato que é favorável para a indústria, uma vez que requer menos energia para a geração desse composto (MISRA et al., 2011; BERMÚDEZ-AGUIRRE et al., 2013).

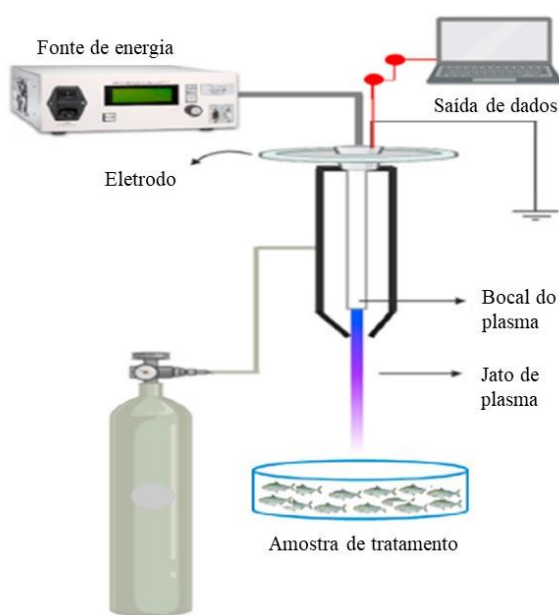
Uma variedade de gases tem sido empregada para gerar plasma, por exemplo hélio, argônio ou combinações com oxigênio, e independentemente dos gases usados, oxigênio e nitrogênio reativo são espécies geradas (KHANI et al., 2017). Os principais gases utilizados em aplicações de alimentos no plasma a frio são argônio (Ar) (EKEZIE et al., 2019b; FENG et al., 2019), hélio (He) (KIM; MIN, 2018; SMET et al., 2019) e ar (DONG; YANG, 2019; ZHUANG et al., 2019). A geração de plasma em pressão atmosférica é a opção preferida da indústria de alimentos (PINA-PEREZ et al., 2020). As vantagens do uso do ar com pressão atmosférica incluem seu baixo custo e facilidade de procedimento operacional, porém o conhecimento da composição do fluxo do gás é fundamental, visto que o gás está sujeito a alterações em sua composição e a formação de espécies reativas (LAROQUE et al., 2022).

O plasma pode ser gerado a partir de jatos de plasma, descargas em barreira dielétrica (DBD) (NIVEDITHA et al., 2021; GONZÁLEZ - GONZÁLEZ et al., 2021), descargas corona, descargas micro-ondas (SUROWSKY et al., 2015; BERMUDEZ-AGUIRRE, 2020; GONZÁLEZ - GONZÁLEZ et al., 2021) e radiofrequência (BERMUDEZ-AGUIRRE, 2020; GONZÁLEZ - GONZÁLEZ et al., 2021). A depender do gás utilizado para a produção de

plasma, podem formar uma mistura de plasma, agentes ativos, como átomos, moléculas, radicais livres, espécies ativas, íons e radiação UV (PANKAJ; KEENER, 2017).

Os jatos de plasma são formados por dois eletrodos, sendo que a distância entre eles geralmente fica na faixa de alguns milímetros e o gás do processo é inflamado em tensões de cerca de 100 V. Este processo é capaz de penetrar em pequenos espaços das amostras devido às suas dimensões serem pequenas, sendo que a energia média dos elétrons é consideravelmente mais elevada do que a dos íons e moléculas de gás (WELTMANN et al., 2008). Há várias configurações em que o plasma é formado por outra fonte, porém a mais comum, é a existência de dois anéis ou eletrodos coaxiais, em que o gás flui entre o par de eletrodos, o eletrodo interno está conectado a uma alta frequência por energia de radiofrequência para a ionização do gás, que sai do bocal do plasma, formando o jato de plasma conforme a Figura 1 (LAROQUE et al., 2022). No entanto, jatos de plasma ainda são mais usuais em escalas menores, como por exemplo, escala laboratorial (LAROQUE et al., 2022).

Figura 1. Configuração do processo por jato de plasma.

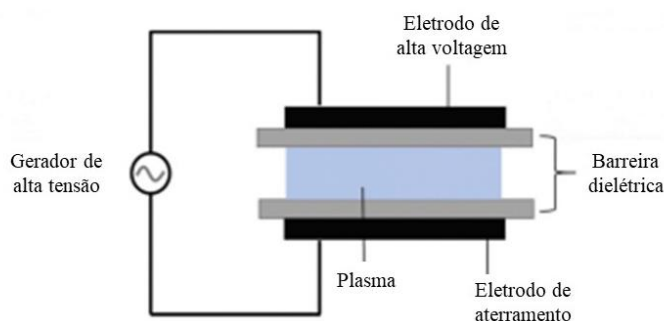


Fonte: Laroque et al. (2022).

Na descarga em barreira dielétrica (DBD) há a separação dos eletrodos através de uma barreira dielétrica que é responsável por gerar o plasma, podendo ser utilizada uma grande variedade de gases de baixo fluxo. Esse tipo de geração pode se apresentar em diferentes configurações, como: planas, co-planas ou descargas de superfícies, sendo que o tipo de descarga pode variar entre duas formas, a uniforme e as descargas através de espaços reduzidos.

Para determinar o tipo de configuração e de descarga é necessário analisar alguns parâmetros a serem utilizados no processo como os gases de arraste e a distância entre os eletrodos. Esse tipo de processo é vantajoso devido à variedade de gases de arraste que podem ser empregados, o baixo fluxo de gás necessário em comparação a outras configurações e a adaptação a diferentes tipos de situações (EHLBECK et al., 2011; MISRA et al., 2015). A Figura 2 ilustra uma representação esquemática de plasma a frio de DBD. Quando uma alta tensão é mantida entre os eletrodos, as descargas ocorrem entre eles. O plasma frio é gerado na lacuna e indicado pelas zonas de cor azul.

Figura 2. Representação esquemática de plasma frio de DBD.

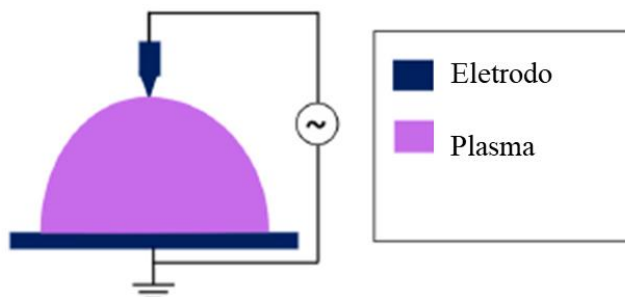


Fonte: Wang et al. (2021).

A descarga corona é identificada como um brilho luminoso localizado nas bordas ou fios finos em um campo elétrico altamente não uniforme (LAROQUE et al., 2022). Consequentemente, o campo elétrico em torno do eletrodo torna-se desigual com a alta voltagem. Neste ponto, gás neutro nas imediações da superfície curva do eletrodo é induzida a ionizar como resultado da concentração do campo elétrico (LAROQUE et al., 2022). O alto campo elétrico próximo ao eletrodo excede a força de ruptura do gás, criando o plasma, conforme a Figura 3. A descarga corona pode ser gerada através de dispositivos simples, com custo baixo, porém apresenta uma limitação a tratamentos não uniformes de pequenas áreas. Esse fenômeno ocorre próxima ao eletrodo, pois nessa região o campo elétrico é amplo e com isso há uma maior produção de elétrons, provocando um aumento na energia de ativação dos átomos ou moléculas dos gases presentes no meio. Essa descarga também pode apresentar diferentes configurações que variam de acordo com o objetivo a ser atingido provocando mudanças na corrente e nas cargas dos eletrodos (RAIZER et al., 1991; PEKÁREK, 2010; CUBAS et al., 2016; SUROWSKY et al., 2015). Visando o aumento da área de aplicação de plasma de descarga corona em alimentos, a configuração de um eletrodo em placa multiponto

tem se destacado comparado à descarga de barreira dielétrica, devido à capacidade de produção mais energética e densa (SCALLY et al., 2021).

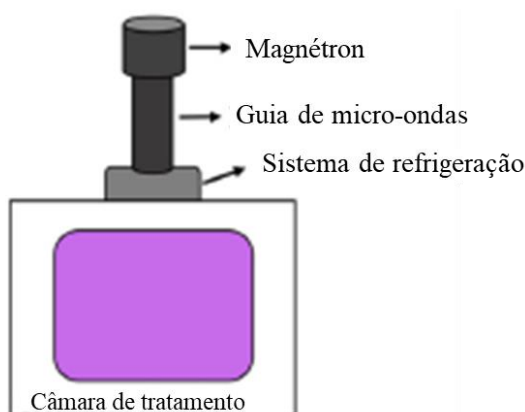
Figura 3. Representação esquemática de plasma frio de descarga corona.



Fonte: Laroque et al. (2022).

As descargas por micro-ondas são geradas por um magnétron, ondas eletromagnéticas normalmente em 2,45GHz e guiadas para a câmara (por uma guia de ondas, onde atingem os elétrons do gás) de processo através de um cabo coaxial. Além disso, as micro-ondas são absorvidas pelos elétrons que compõem o gás de arraste ocasionando as reações de ionização (UHM et al., 2006; SUROWSKY et al., 2015) e liberando energia como fótons de luz UV e visível (MOHAMED et al., 2018). O campo elétrico de micro-ondas acelera os elétrons de moléculas de gás e forma o plasma a frio, sem eletrodos. Esse sistema pode produzir plasma em baixa pressão atmosférica (EKEZIE et al., 2017a). Descarga por micro-ondas são boas para esterilização de superfícies ou descontaminação (LAROQUE et al., 2022), porém o custo operacional é elevado e os cuidados necessários para seu funcionamento a torna um processo pouco utilizado no campo industrial (BERMUDEZ-AGUIRRE, 2020; EKEZIE et al., 2017b).

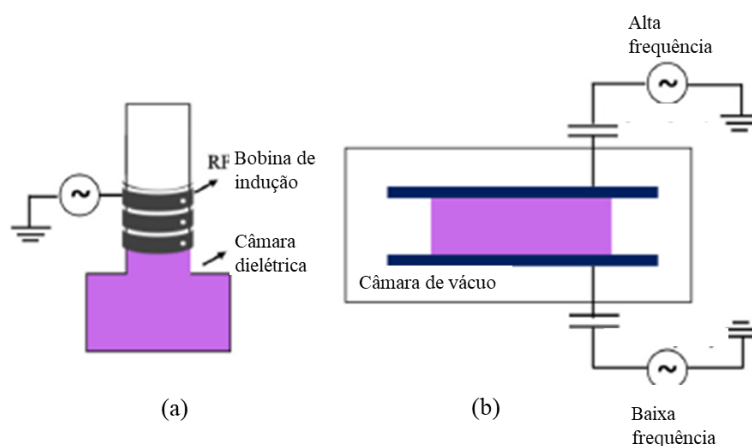
Figura 4. Representação esquemática de plasma frio de descarga por micro-ondas.



Fonte: Laroque et al. (2022).

Por fim, a radiofrequência que possui três tipos principais de plasma, o plasma acoplado indutivamente, plasmas capacitivamente acoplados que são os mais comuns para aplicações industriais (BERMUDEZ-AGUIRRE, 2020) e onda de helicon. Os plasmas capacitivamente acoplados possuem dois eletrodos paralelos separados por uma coluna oca, imersos em uma câmara de vácuo (CHABERT; BRAITHWAITE, 2011) onde a radiofrequência é gerada quando uma tensão alternada é aplicada entre os eletrodos (EKEZIE et al., 2017a). O plasma acoplado indutivamente costuma usar duas fontes de alimentação de radiofrequência: a primeira aciona uma bobina, geralmente externa para o plasma, e separado dele por uma janela dielétrica; a segunda fonte de alimentação é usada para polarizar o suporte de substrato e controlar o íon de energia (CHABERT; BRAITHWAITE, 2011).

Figura 5. Representação esquemática de plasma a frio por radiofrequência, (a) plasmas capacitivamente acoplados e (b) plasma acoplado indutivamente.



Fonte: Laroque et al. (2022).

As propriedades do plasma são relacionadas às ordens de magnitude das espécies carregadas e reativas em tamanho, escala de tempo, temperatura e densidade (BRUGGEMAN et al., 2017). Alguns parâmetros afetam a eficácia do processo por plasma frio sendo eles: o gás de arraste usado, o tipo de excitação e a velocidade de fluxo do gás de arraste. Sendo assim, há a necessidade de conhecer a fundo os parâmetros de processo ao analisar o tipo de método a ser aplicado (STOICA et al., 2014; SUROWSKY et al., 2015). A composição do gás define as espécies reativas formadas pela ionização, influenciando a eficiência do plasma e sua ação (LAROQUE et al., 2022).

O plasma frio atmosférico produz uma mistura de várias substâncias reativas neutras, partículas energéticas, fótons ultravioletas e fortes campos elétricos transitórios, que podem

atuar simultânea e sinergicamente na superfície dos alimentos (BAUER et al. 2017). Os tempos de tratamento com plasma a frio curtos e os efeitos térmicos reduzidos durante sua aplicação motivou pesquisadores a estudá-los para processamento de alimentos (DENES et al., 2000; PANKAJ et al., 2014; NIEMIRA, 2012). Esta tecnologia, usa moléculas e espécies gasosas reativas para inativar micro-organismos contaminantes presentes nos alimentos ou até mesmo nas embalagens de armazenamento (MANDAL et al., 2018).

O plasma pode ser utilizado tanto para alimentos líquidos como sólidos, uma vez que o mecanismo de ação se inicia com a criação de um plasma primário, incluindo elétrons e íons em volume de produção, seguido pela formação de íons ou radicais quimicamente ativos. Elétrons, íons e radicais livres bem como radiação eletromagnética no espectro UV/VIS são então posteriormente transferidos à superfície da interface do plasma onde iniciarão processos fundamentais como um processo de transformação, deposição, recombinação, não excitação e emissão secundária de sólidos (SCHRAM, 2002).

No processo de transformação ocorre uma perda de massa devido à volatilização de alguns compostos, fazendo com que o plasma possa ser utilizado como descontaminante (WILLIAMS, 1997; NAGATSU et al., 2005; BERMÚDEZ-AGUIRRE, 2013; STOICA et al., 2014; MOK et al., 2015; SUROWSKY et al., 2015; OH et al., 2016). Ademais, esta técnica gera efeitos sobre a inativação microbiana devido ao possível aquecimento (temperaturas moderadas usadas no processo), além do fato de ter partículas carregadas, campos elétricos, fótons UV e algumas espécies reativas tais como oxigênio atômico, moléculas de oxigênio metaestáveis, ozônio e radicais hidroxil, que são comumente encontrados em descarga de gás. O tratamento por plasma tem sido efetivo para inativar ampla faixa de micro-organismos incluindo esporos e vírus, sendo aplicado nos mais variados tipos de alimentos, desde os produtos cárneos, até frutas, pimentas, nozes, etc. (SHAKILA BANU et al., 2012; KIM et al., 2014; MISRA et al., 2014, 2014b).

Novas tecnologias estão sempre em evidência, como mostra um estudo recente de González - González et al. (2021), que foi o primeiro com o efeito antimicrobiano de uma descarga direta piezoelétrica (PDD) gerada por plasma a frio. O PDD, consiste em um transformador de energia, onde o gerador transforma energia elétrica de baixa tensão em oscilações mecânicas para produzir plasma de alta tensão. Essas descargas elétricas ionizam o ar e transformam o quarto estado da matéria, o plasma. Essa tecnologia é condensada, não onera

o processo e estudos recentes mostram a sua vantagem no efeito antimicrobiano em diferentes superfícies (GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2021; TIMMERMAN et al., 2021).

Devido a flexibilidade para a formação do eletrodo e o tipo de material dielétrico usado (MISRA et al., 2019b), a produção de plasma com DBD está crescendo devido ao custo de produção ser baixo em escala industrial (LAROQUE et al., 2022). Dentre essas modalidades de plasma, através do levantamento bibliográfico pode-se perceber que a DBD é a mais estudada e usada em produtos cárneos.

3 Aplicação do plasma a frio em carnes e produtos cárneos

Muitos fatores podem afetar a qualidade das carnes e seus derivados, sejam físicos, químicos e microbiológicos (GÖK et al., 2019). Por isso a utilização de métodos tradicionais, principalmente os térmicos, como esterilização (PEREIRA; VICENTE, 2010), secagem e pasteurização, durante as últimas décadas foram as principais técnicas de conservação dos alimentos (PANKAJ, 2015). Na área de pescado, os métodos de preservação mais utilizados dependem da cadeia a frio, com o uso de baixas temperaturas, incluindo resfriamento (0 - 4°C), super resfriamento (-1 a -3° C) e congelamento (-18, -20°C) (LUAN et al., 2018). As carnes possuem limitações devido as suas características, por exemplo, peixes se deterioram rapidamente por causa do número elevado de nutrientes e de atividade de água (LI et al., 2012). Embora os métodos tradicionais que necessitam de temperaturas, baixas ou altas, sejam eficazes para aumentar a vida útil dos produtos cárneos, alteração na textura, aroma e cor são consequências desses tratamentos. Portanto tecnologias de processamento não térmico, como o plasma a frio, são alternativas para suprimir essas limitações dos produtos cárneos (OLATUNDE; BENJAKUL, 2018b).

As carnes in natura exigem técnicas que não as transformem em produtos cozidos antes do preparo na casa do consumidor. Por isso, as tecnologias não térmicas podem ser uma alternativa eficiente sem a utilização da temperatura. O plasma a frio, por ser uma tecnologia não térmica, possui vantagens significativas quando comparado aos métodos convencionais que geralmente dependem de recursos térmicos para o processamento (SRUTHI et al., 2021). O plasma frio é uma técnica que tem muito potencial na indústria de alimentos, especialmente na desinfecção de produtos frescos destinados para consumo cru (NIVEDITHA et al., 2021).

Esta tecnologia tem sido aplicada em diferentes espécies animais para a produção de alimentos com grande potencial para inativar micro-organismos patogênicos, em diversos tipos

de carne, como: porco (KIM et al., 2013), frango (LEE et al., 2016; MOUTIQ et al., 2019), presunto (LEE et al., 2011; YADAV et al., 2019), carne seca (KIM et al., 2014; GÖK et al., 2019) e bacon (KIM et al., 2011). Em alguns estudos, foi demonstrado que o plasma atmosférico a frio também aumentou a vida útil de pescados, como filés de peixe seco (PARK; HA, 2015), peixe cavala (ALBERTOS et al., 2017), peixe robalo marinho (OLATUNDE et al., 2019a, 2019d) e camarões (SHIEKH; BENJAKUL, 2020).

A Tabela 1 aponta alguns dados científicos relacionados às técnicas de plasma a frio e seu desempenho na redução microbiana em produtos cárneos.

Tabela 1. Aplicação de plasma frio em produtos cárneos e redução máxima de micro-organismos alvo obtido.

Fonte de Plasma	Gás de arraste	Produto	Micro-organismo	Redução Máxima	Referência
Jato de plasma por descarga corona	Ar	Carne de porco congelada e descongelada	<i>Escherichia coli</i> O157:H7; <i>Listeria monocytogenes</i>	<i>E. coli</i> _1.5 log, <i>Listeria</i> _1.0 log (em 120 s)	Choi et al. (2016)
Pressão atmosférica (DBD)	Ar	Peito e coxa de frango	<i>Salmonella enterica</i> ; <i>Campylobacter jejuni</i>	<i>S. enterica</i> _2.5 log, <i>C. jejuni</i> _2.4 log (em 3 min)	Dirks et al. (2012)
Plasma de micro-ondas	Ar	Carne Suína	Bactérias aeróbias totais	2 log (em 2 – 2,5 min)	Frohling et al. (2012)
Descarga de barreira dielétrica	Mistura de N ₂ e O ₂	Carne Bovina	<i>Listeria monocytogenes</i> ; <i>Escherichia coli</i> O157:H7; <i>Salmonella typhimurium</i>	<i>Listeria</i> _1.9 log, <i>E. coli</i> _2.5 log, <i>Salmonella</i> _2.5 log (em 10 min)	Jayasena et al. (2015)
Descarga de barreira dielétrica (DBD)	Ar	Peito de Frango cozido	<i>Staphylococcus aureus</i> resistentes à metilicina (MRSA);	MRSA _2,09 ± 0,17 log, MSSA _2,29 ± 0,04 log	Wang et al. (2021)

			<i>Staphylococcus aureus</i> sensíveis a meticilina (MSSA)	(em 20 min)	
Jato de plasma Ácido láctico ativado por plasma	Ar	Coxas de frango fresco	<i>Pseudomonas</i> ; <i>Escherichia coli</i>	1,25 log, na contagem total (em 10 min)	Qian et al. (2021)
Descarga direta piezoelétrica (PDD)	Ar	Frango pronto para o consumo	<i>Salmonella</i> ; <i>Escherichia coli</i> O157:H7	<i>Salmonella</i> _1,8 log, <i>E. coli</i> _1,4 log (em 5 min)	González- González et al. (2021)
Plasma à pressão atmosférica	O ₂	Pastirma	<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538; <i>Listeria monocytogenes</i> ATCC 51774	<i>S. aureus</i> _ 0,85 log, <i>L. monocytogenes</i> _ 0,83 log (em 5 min)	Gök et al. (2019)
Descarga de barreira dielétrica (DBD)	Ar	Presunto	<i>Listeria innocua</i>	1,43 UFC/cm ² (em 3 min)	Yadav et al. (2019)
Descarga de barreira dielétrica (DBD)	Ar	Peito de Frango in natura	<i>Mesófilos</i> , <i>Psicrotróficos</i> , <i>Enterobacteriaceae</i>	1,90 ; 1,60 ; 1,70 log UFC/g, respectivamente (em 5 min)	Moutiq et al. (2020)
Descarga de barreira dielétrica (DBD)	Ar	Peito de Frango	<i>L. monocytogenes</i> (KCTC 3569) <i>E. coli</i> O157: H7(KCCM 40406)	2,14 ; 2,73; 2,71 log UFC/g, respectivamente (em 10 min)	Lee et al. (2016)

S.
Typhimurium(K
CTC, 1925)

Fonte: a autora.

A tecnologia de plasma a frio permite associação a outras técnicas existentes na área de alimentos, que quando combinadas podem ter resultados significativos. González-González et al. (2021) testaram o efeito antimicrobiano na carne de frango pronta para o consumo, com a descarga direta piezoelétrica de baixa tensão. Os autores testaram tratamentos individuais e combinados com lavagem de nanoemulsão de linalol nas amostras de frango. Somente com o tratamento de plasma a frio, por 5 minutos, houve a redução de *Salmonella* em 1,8 log UFC/g e *Escherichia coli* O157:H7 em 1,4 log UFC/g. Quando combinado com a lavagem de linalol, por 25 minutos após 5 minutos de tratamento com plasma, os resultados foram maiores, 2,76 e 3,24 log UFC/g para *E. coli* e *Salmonella*, respectivamente.

É possível perceber uma grande preocupação por parte dos estudos, quanto a redução da carga microbiana nos produtos cárneos, com o tratamento de plasma a frio. Porém, outros pontos são relevantes e precisam ser investigados, como a oxidação lipídica que pode aumentar com a aplicação do plasma na superfície dos produtos cárneos. Oxigênio reativo e espécies de nitrogênio, gerados por plasma podem colaborar para formação da oxidação lipídica na superfície das carnes, gerando sabor rançoso e odores desagradáveis (GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2021).

No estudo de González-González et al. (2021) os autores não perceberam diferenças significativas na oxidação lipídica na carne de frango pronta para o consumo, após os tratamentos realizados ($P > 0,05$). Apesar de ser um estudo recente citado, com a PDD a maioria dos estudos relacionam o método de geração de plasma por DBD, por ser uma alternativa segura e de baixo custo para a indústria de processamento (LAROQUE et al., 2022). Um estudo de Zang et al. (2019) comparam a diferença na inativação microbiana, por exemplo, entre os métodos de geração de plasma. Zang et al. (2019) testaram a inibição de inoculados *Psychrobacter glacincola* 38-1, *Brochothrix thermosphacta* 38-2, e *Pseudomonas fragi* 38-8 em bolinhos comerciais de peixe, com o ar atmosférico e pelos métodos DBD (12,8 kV e 300 segundos) e JP (20,0 kV e 30 segundos). *P. glacincola* 38-1 foi a mais sensível ao tratamento plasma, e a inibição foi maior para DBD quando comparado a JP. Uma redução de 6,87, 4,81 e 3,32 log UFC/mL foi observada para as amostras de 38-1, 38-2 e 38-8, respectivamente.

A influência na escolha do gás de trabalho no método, também é relevante como apresentado nos estudos da Tabela 1, onde a maioria usou o ar atmosférico justificando seu uso ao fato de não onerar o processo financeiramente. Em descarga de barreira dielétrica, o uso de ar atmosférico no lugar de gases nobres (por exemplo, argônio ou hélio) diminui o custo da operação do plasma a frio promovendo sua aplicação em grande escala (FEIZOLLAHI, et al., 2020). Nessa tentativa de associação de variáveis que possam aumentar as vantagens do uso do plasma a frio, água ativada por plasma (PAW) foi a proposta de estudo de Wang et al. (2021). Neste estudo os autores cortaram o peito de frango de maneira que pesassem aproximadamente $5,0g \pm 0,4g$, em seguida, foram esterilizados a $121^{\circ}C$ por 15 minutos em uma autoclave programada. Pós esterilização, já com os cubos de peito de frango cozidos, foram inoculados com os micro-organismos citados abaixo e imersos numa solução de PAW em diferentes tempos, afim de explorar o efeito do PAW com o tempo. Os autores usaram PAW para inativar micro-organismos resistentes à meticilina como *Staphylococcus aureus* (MRSA) e *S. aureus* sensíveis à meticilina (MSSA) em peito de frango cozido, e conseguiram reduções na carga microbiana significativas, conforme mostrado na Tabela 1. Os autores ainda avaliaram outro atributo importante das carnes que é a cor e os mesmos concluíram que a água ativada por plasma em carne de frango cozida, não mudou a cor da superfície.

Seguindo essa mesma linha de estudo, Qian et al. (2021) estudaram a aplicação de ácido láctico ativado por plasma (PALA), como uma nova alternativa para reduzir a carga microbiana em coxas de frango cru. Além de constata a redução microbiana de *Pseudomonas* e *Escherichia coli* nas amostras, os autores avaliaram atributos de qualidade como: cor de superfície (parâmetros L, a e b), pH, oxidação de lipídeo e odor. Nenhuma mudança significativa nos valores L* e b* foi encontrada em coxas de frango tratadas com PALA, por outro lado, o teor de nitrito residual aumentou (atribuído à ação de bactérias redutoras de nitrato, que o reduziram para nitrito) enquanto os valores de a *, pH e o malonaldeído (que se refere a peroxidação lipídica) diminuíram. O menor valor de pH e maior teor de nitrito das amostras obtidos após o tratamento PALA, ficaram na faixa de segurança sendo aceitáveis. Com a diminuição significativa de malonaldeído, vale ressaltar que o tratamento PALA reduziu o fenômeno de oxidação de lipídeos e não levou a mudanças notáveis no odor e no efeito da proteína miofibrilar.

A eficácia do plasma atmosférico a frio foi testada na inativação de dois patógenos bacterianos inoculados em pastirma, carne bovina curada a seco, na pesquisa de Gök et al. (2019). *Staphylococcus aureus* e *Listeria monocytogenes* tiveram reduções de menos de 1 log

UFC/ cm², no entanto foi observada a redução de fungos e leveduras (redução máxima de 1,66 log) também, bem como bactérias aeróbicas mesófilas totais (redução máxima de 1,41 log UFC / cm²). Os autores testaram diferentes concentrações de oxigênio e argônio e quando testaram apenas oxigênio como gás de arraste obtiveram o melhor resultado na redução dos dois patógenos estudados durante 5 minutos de tratamento.

Alguns estudos mostram a redução de patógenos em produtos cárneos através do uso do plasma a frio, como a *Listeria monocytogenes* em presunto (YADAV et al., 2019), na carne de frango (LEE et al., 2016), na carne bovina (GÖK et al., 2019). Porém somente a redução não é suficiente, visto que não é permitido presença de *Listeria monocytogenes* em produtos na alimentação humana. Mais estudos são necessários para investigação da descontaminação total de patógenos por plasma a frio, assim como medidas alternativas que inibam no processo o aumento de oxidação lipídica. No estudo de Yadav et al. (2019) os autores perceberam um aumento significativo de malondialdeído (MDA) equivalente à oxidação lipídica nas amostras de presunto tratadas (1,53 MDA mg/kg de presunto) com plasma comparado as amostras que não receberam tratamento (0,92 MDA mg/kg presunto). As amostras de presunto foram submetidas a diferentes temperaturas (4°C e 23°C), que não afetou significativamente o nível de inativação da *L. monocytogenes*.

O fato de os consumidores associarem a cor dos produtos cárneos como indicador de frescor e qualidade da carne (YADAV et al., 2019) justifica, dentre os parâmetros de qualidade, a cor ser o mais analisado entre os pesquisadores, sob os efeitos do tratamento com plasma a frio. Geralmente os estudos trazem referências de determinação instrumental da cor, representada por valores de L* (luminosidade), b* (amarelo-azul) e a* (vermelho-verde) após a exposição das amostras de produtos cárneos ao plasma. No estudo de Yadav et al. (2019) amostras de presunto não sofreram alterações de L* e b*, enquanto uma diminuição de a* foi observada quando comparado as amostras sem tratamento com plasma quando os tempos de exposição aumentaram (5 – 7,5min), porém essa redução de a* não foi associada pelos autores com o tratamento de plasma. No entanto, Jayasena et al. (2015) constaram que os valores baixos de a* medidos para amostras de lombo bovino e porco tratado com plasma DBD podem ser atribuídos à formação de metamioglobina durante o tratamento com plasma. Aumento nos tempos de exposição ao plasma podem acelerar o processo de oxidação devido à formação de radicais e, portanto, aumentar a concentração de metamioglobina, (FRÖHLING et al., 2012), oxidação da hemoglobina, mioglobina e heme-proteínas (ALBERTOS et al., 2017).

Avaliações físicas como teor de umidade e atividade de água (a_w) aparecem nos estudos de produtos cárneos tratados com plasma a frio. Após 3 minutos de tratamento de plasma nas amostras de presunto no estudo de Yadav et al. (2019) uma diminuição significativa no teor de água foi observada (0,642 a 0,316 kg de água/kg de presunto), enquanto que a a_w apresentou uma redução não significativa (0,95 para 0,92). Por outro lado, Gök et al. (2019) determinaram outras propriedades físico-químicas em amostras de carne bovina curada a seco (pastirma), tratadas com plasma a frio em diferentes composições de gases e tempos de exposição. Não houve diferença significativa nos valores de pH ($p > 0,05$), mas os autores verificaram que o teor de umidade foi reduzido com o tratamento de plasma a frio, sendo que o teor mais baixo encontrado foi de 44,54%. Na composição de 25% de oxigênio e 75% de argônio durante 5 minutos, houve uma diminuição da a_w no pastirma, inicialmente era 0,77 e após aplicação do plasma 0,71, foi o menor teor encontrado. Essa redução na a_w é benéfica para prevenção de crescimento microbológico.

Além de estudos com produtos cárneos de origem suína, bovina e de aves, a literatura traz recentes estudos do efeito do plasma em pescado e produtos marinhos. A Tabela 2 apresenta alguns dados científicos relacionados às técnicas de plasma a frio em frutos do mar e subprodutos.

Tabela 2. Aplicação de plasma frio em pescado com seus respectivos parâmetros e resultados.

Fonte de Plasma	Gás de arraste	Produto	Parâmetros	Resultados	Referência
IB - DBD	Dióxido de carbono, argônio e oxigênio (60:30:10)	Fatias de robalo asiático	80 kV; 5 min	A vida útil das fatias de robalo foi prolongada para 15 dias após ser embalado com a mistura de gases.	Olatunde et al. (2020c)
DBD	Ar atmosférico	Peixe-espada (<i>Trichiurus lepturus</i>)	50 kV; 30-300s	Um aumento considerado de carbonil na amostra. A textura, a capacidade de retenção da água e as propriedades de cor da proteína muscular melhoraram significativamente nas amostras tratadas.	Koddy et al. (2020)

DBD	Hélio e argônio	Nuggets de peixe inoculados com <i>Listeria innocua</i> e <i>Staphylococcus aureus</i>	Hélio (12 kV), argônio (22 kV); 4,6 e 10 min.	O plasma de argônio (4, 6 e 10 min) teve um efeito inibitório significativo sobre o crescimento de <i>L. innocua</i> . <i>S. aureus</i> diminuiu em 0,19-1,04 ciclos logarítmicos (plasma de argônio) e 0,03 e 0,55 ciclos logarítmicos (plasma de hélio). <i>L. innouca</i> foi consideravelmente mais sensível que <i>S.aureus</i> para plasma de pressão atmosférica .	Hajoseini et al. (2020)
IB-DBD	Argônio / ar (80:20)	Camarão branco do Pacífico - <i>Litopenaeus vannamei</i>	16 kV; 10 min.	Camarão pré-imerso com antioxidante - extrato de folha de <i>Chamuang</i> no nível de 1% antes do plasma gerado usando Argônio / ar (80:20) apresentou vida útil (4 °C) até 15 dias.	Shiekh e Benjakul (2020)
IB-DBD	Argônio e oxigênio (90:10)	Fatias de robalo asiático	16 kV; 5 min	Plasma a frio combinado com quitoooligosacarídeo de lula reduziu significativamente a oxidação lipídica e de proteínas, aumentando a vida útil para 12 dias a 4°C.	Singh e Benjakul (2020)

IB – DBD – Descarga de barreira dielétrica em sacos

A busca por tecnologias e aditivos capazes de garantir a segurança do pescado é significativa, visto que os consumidores têm preferência de consumi-los crus (OLATUNDE et al. 2021). Há vários estudos recentes envolvendo a tecnologia de plasma a frio no pescado, visando estender a vida útil sem ocorrer mudanças significativas nas propriedades sensoriais. Diante dos dados da Tabela 2 foi possível perceber estudos focados na combinação do plasma frio, como técnicas tradicionais com a atmosfera modificada e o uso de antioxidantes, cuja combinação se deve à tentativa de minimizar o impacto do plasma em carnes com alto teor de ácidos graxos poli-insaturados, que são mais susceptíveis à oxidação de lipídios (OLATUNDE et al., 2021) e, em alguns estudos que usaram a técnica de plasma a frio, foram observados um aumento na oxidação lipídica com a técnica (YADAV et al., 2019; CHOI et al., 2020; OLATUNDE et al., 2021a). Por outro lado, os antioxidantes suprimem os radicais livres, ligam o oxigênio e podem proteger os lipídios aumentando sua estabilidade oxidativa, preservando assim a qualidade dos alimentos (SRUTHI et al., 2021).

Sistemas de DBD e JP são métodos adequados para o tratamento com plasma na preservação de pescado. Porém, a aplicação do plasma IB-DBD em sacos ou embalagem é mais vantajosa, pois as amostras permanecem dentro da embalagem durante o armazenamento, e por isso a chance de recontaminação pós tratamento é extremamente pequena (OLATUNDE et al., 2020c). Comparando os gases mais utilizados nesses recentes estudos da Tabela 2, frente aos expostos na Tabela 1, é possível perceber que os gases nobres estão mais em evidência do que o uso do ar atmosférico. A geração de plasma usando gases nobres é interessante pois evita a degradação oxidativa dos alimentos pela exposição ao oxigênio. Contudo, isso pode onerar o processo, propiciando o uso do ar atmosférico pois obtém-se consequentemente uma operação mais viável financeiramente (MISRA et al., 2014). No entanto, a utilização de gases nobres em espécies de peixe, como o peixe espada, robalo asiático e o arenque do Atlântico, justifica-se pelo alto teor de ácidos graxos insaturados nestes produtos, o que afeta características químicas e físicas negativamente (LUAN et al., 2018; ALBERTOS et al., 2019; OLATUNDE et al., 2020c).

Entre as propriedades da carne afetadas pelo plasma, a oxidação lipídica é uma limitação para aplicação desta técnica em alimentos ricos em lipídeos, como alguns tipos de pescado. Por isso, estudar diferentes composições de gases de trabalho é uma alternativa para buscar menos efeitos negativos que as espécies reativas produzidas por diferentes gases podem provocar. No estudo de Olatunde et al. (2020) uma combinação de 90% de Ar e 10% de O₂ resultou em aceleração da oxidação lipídica nas fatias de robalo asiático, no sistema IB-DBD por 5 minutos, quando comparado a proporção dióxido de carbono, argônio e oxigênio (60:30:10). Em contrapartida, Singh e Benjakul (2020) também testaram na mesma proporção os gases Ar (90%) e O₂ (10%) em fatias de robalo asiático, associado com antioxidante quitooligossacarídeo de lula, e houve redução significativa de oxidação lipídica e de proteínas em um sistema IB-DBD.

Shiekh e Benjakul (2020) testaram o tratamento de plasma IB-DBD com camarão branco do pacífico em diferentes combinações de gases. A oxidação lipídica foi maior envolvendo mistura dos gases Ar (80%) e O₂ (20%), quando comparada a composição de gases Argônio (80%) e ar (20%). Além da oxidação lipídica ser um parâmetro muito importante a ser analisado em pescado, a redução da carga microbiana se faz necessária. Hajoseini et al. (2020) estudaram os efeitos dos gases para comparar a redução de *Listeria innocua* e *Staphylococcus aureus* em nuggets de peixe o sistema DBD tradicional. O gás argônio teve maior efeito inibitório em comparação ao gás hélio, sendo *Listeria innocua* mais sensível ao tratamento.

Uma resposta positiva do plasma a frio sobre os frutos do mar citados na Tabela 2 foi que em muitos dos estudos conseguiu-se aumentar a vida útil por até 15 dias.

4 Mecanismo de ação e impacto do plasma na superfície de produtos cárneos

Como as carnes são um alimento sólido, há uma menor penetração das espécies de plasma, tornando o processo limitado à superfície (MISRA et al., 2016). Além dessa restrição, alguns fatores afetam a penetração do plasma na matriz dos alimentos, como a geografia, composição, água livre disponível, porosidade, distância entre a fonte de plasma e a superfície e as espécies reativas (MISRA et al., 2016). O plasma a frio tem sido utilizado para tratamento de superfícies de vários produtos cárneos, como frango (KIM et al., 2013); carne bovina (YONG et al., 2017), cordeiro (PATANGE et al., 2017) e produtos de peixe (PARK; HA, 2015). Devido ao fato da penetração do plasma e das espécies reativas ser limitado, os estudos concentraram na descontaminação/inativação somente na superfície das carnes em questão (MANDAL et al., 2018).

O plasma a frio é explorado por sua capacidade de descontaminação microbiana de superfície dos alimentos (ISHIKAWA; HORI, 2014). O plasma pode ser gerado tanto como gás-líquido, provocando a formação de microbolhas no meio em que entra em contato, quanto na fase gasosa, sendo que ao ser gerado nas proximidades de uma superfície líquida pode haver o impacto das propriedades do meio como condutividade, pH e temperatura sobre o plasma. Além disso, vale ressaltar que quando há a interação entre o plasma e as moléculas de água, há reações de dissociação que estão envolvidas com os elétrons, variando de acordo com a quantidade de água e da energia dos elétrons (GAROFULIC et al., 2015).

Os mecanismos de ação para inativação de micro-organismos por meio do plasma são: interação química de espécies reativas ou radicais com membranas celulares, erosão de componentes celulares internos e membranas por radiação UV e destruição das fitas de DNA através da radiação UV (NIVEDITHA et al., 2021). Os mecanismos de descontaminação do plasma a frio são atribuídos principalmente às espécies reativas de oxigênio e espécies reativas de nitrogênio (ROS e RNS) geradas dentro do plasma, como radiação UV, que compelem efeitos oxidantes, íons energéticos e partículas carregadas (HOJNIK et al., 2017; GAVAHIAN et al., 2018; LIAO et al., 2019; AGUIAR et al., 2021) incluindo ozônio, peróxido e vários tipos de óxidos de nitrogênio (N_xO_y) (MOUTIQ et al., 2019). Outras espécies são formadas na

interface plasma-líquido, fazendo dos líquidos uma matriz suscetível para a aplicação de plasma para descontaminação (MOK et al., 2015; SUROWSKY et al., 2015).

Dentre as reações químicas que podem ocorrer destacam-se as reações ácido-base que ocorrem devido a ação de espécies primárias e secundárias produzidas pelo plasma, como ácido nítrico e ácido nitroso, espécies de nitrogênio excitados e seus produtos (BRISSET et al., 1990), além de peróxido de hidrogênio e íons hidrogênio, podendo levar com isso à diminuição do pH (BERMÚDEZ-AGUIRRE et al., 2013; MOK et al., 2015). Ainda nesta categoria, podem ocorrer reações de oxidação causadas por espécies reativas do oxigênio e do nitrogênio que estão relacionadas principalmente à inativação microbiana; reações de redução devido às espécies redutoras (por exemplo, radicais H^+ e OH^-), sendo o pH o fator determinante para que essas reações ocorram, pois, esses radicais se tornam mais ativos em valores de pH superiores a 4,8 (BERMÚDEZ-AGUIRRE et al., 2013). Por fim, reações fotoquímicas que envolvem a radiação ultravioleta podem acontecer, proporcionando a dissociação de peróxido de hidrogênio, levando a formação de radical hidroxila e ozônio, conduzindo a geração de oxigênio atômico (SEINFELD et al., 2012).

Estudos mostram que o uso do plasma gera espécies reativas que variam de acordo com o pH. Liu et al. (2010) conseguiram inativar *S. aureus* a um pH de 4,5 através do mecanismo de degradação de ácidos graxos das membranas dos microrganismos pelo potencial oxidativo dos radicais hidroperóxidos. Han et al. (2016) relacionando o uso das tecnologias de plasma a frio com atmosfera modificada, demonstraram o potencial de espécies reativas à oxigênio e espécies reativas à nitrogênio, durante o processamento de alimentos. Os autores concluíram que as bactérias gram-positivas eram menos susceptíveis ao tratamento de plasma do que as bactérias gram-negativas, sendo que nas reações de ROS ocorre o processo de ruptura do envelope celular e vazamento nas células gram-negativas, enquanto nas células gram-positivas, os componentes intracelulares são danificados, porém não há vazamento celular (HAN et al., 2015; GAVAHIAN et al., 2018; AGUIAR et al., 2021).

Zhang et al. (2019), perceberam que a oxidação por partículas ativas (H_2O_2 e O_3) foi o principal mecanismo de inativação bacteriana exercida pela descarga de barreira dielétrica, enquanto por jato de plasma, houve ação sinérgica através de penetração física e oxidação química, que combinados para levar à morte celular.

4.1 Inativação microbiana em carnes e produtos cárneos

A microbiota de carnes e produtos cárneos é muito variada, sendo composta em sua maioria por bactérias psicrotróficas dos gêneros *Pseudomonas* e *Moraxella*, estando também presentes espécies anaeróbias facultativas como enterobactérias psicrotróficas *Aeromonas sp.*, *Shewanella putrefacins* e micro-organismos gram-positivos como *Lactobacillus sp.* e *Brochorix thermosphaca* (PALUMBO, 1986; SILVA, 1998). Estes micro-organismos são os constituintes da biota deteriorante das carnes durante o período de armazenamento.

As propriedades antimicrobianas e inativação de enzimas por plasma a frio são controladas ou influenciadas por vários fatores, incluindo a voltagem, frequência, tempo de tratamento, distancia da lacuna de eletrodos, composição do gás, tempo pós-tratamento / tempo de exposição e a área de superfície da amostra (OLATUNDE et al., 2019b; 2019d; LAROQUE et al., 2022). As interações provavelmente dependem também, de diferentes fatores como a potência de entrada, fonte de plasma, taxa de fluxo do gás, tempo de processamento e a distância entre a amostra (GUO et al., 2015; MIR et al., 2016). O nível de inativação da enzima depende de diferentes parâmetros, como o tipo de gás, a potência de entrada do gás, grau de exposição ao plasma, estrutura da enzima, estabilidade da enzima (SRUTHI et al., 2021).

Os principais micro-organismos que mais causam doenças e mortes, de acordo com os Centros de Controle e Prevenção de Doenças, são *Listeria monocytogenes*, *Salmonella*, *Clostridium perfringens*, *Campylobacter spp* e *Staphylococcus aureus* e estes micro-organismos isolados foram encontrados em frutos do mar e áreas de processamento de frutos do mar (OLATUNDE et al., 2021). O plasma frio tem sido usado para inativar principalmente micro-organismos patogênicos em diferentes produtos cárneos, por exemplo, em bolas de peixe comerciais (ZHANG et al., 2019). Os micro-organismos patógenos como *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Shigella*, *Listeria monocitogenes* tem capacidade de desencadear infecções humanas agudas (NIVEDITHA et al., 2021). Na indústria de carnes, os patógenos mais preocupantes são *L. monocytogenes*, *E. coli* e *Salmonella spp.* (MISRA; JO, 2017). Em 2018 esses micro-organismos foram listados como *recall* em produtos de carne bovina e suína no site de Centros de Controle e Prevenção de Doenças (CDC, 2019). Por isso se fazem necessários estudos que comprovem a eficácia da tecnologia de plasma frio na eliminação destes patógenos.

Os tratamentos térmicos como esterilização e pasteurização têm sido os mais indicados para a inativação de micro-organismos patogênicos e causadores de alterações em carnes e produtos cárneos cozidos. Na ampliação do sucesso dos tratamentos não térmicos como o

plasma a frio na descontaminação de produtos frescos, pesquisadores têm observado um bom resultado com produtos cárneos. A técnica de plasma a frio vem sendo aplicada para descontaminar produtos cárneos sem ocasionar mudanças indesejáveis, sendo muito eficaz contra uma série de micro-organismos que são responsáveis pela formação de biofilmes e esporos bacterianos (MONTIE et al., 2000; DENG et al., 2005; VLEUGELS et al., 2005). Os biofilmes de *Bacillus subtilis* (gram positivo) e biofilmes de *Pseudomonas aeruginosa* (gram negativo) foram relacionados a sua geometria e a espessura da parede celular bacteriana com a eficácia do plasma frio. Os biofilmes gram positivos possuíam uma parede celular de 55,4 nm e apresentaram uma maior resistência ao plasma, enquanto os biofilmes gram-negativos, possuíam uma parede celular de apenas 2,4 nm e os mesmos foram praticamente destruídos em 10 minutos de tratamento (MAI-PROCHNOW et al., 2016).

Kim et al. (2011) relataram que através do plasma de pressão atmosférica (75, 100 e 125W) foi possível a descontaminação do bacon, aumentando a vida útil do produto. O bacon fatiado foi inoculado com *Listeria monocytogenes* (KCTC 3596), *Escherichia coli* (KCTC 1682) e *Salmonella Typhimurium* (KCTC 1925). As amostras foram tratadas por 60 e 90s e na mistura de gás hélio/oxigênio (10 lpm – litro por minuto e 10 sccm – centímetros cúbicos por minuto, respectivamente) houve redução microbiana de cerca de 2 - 3 Log ciclos. O número de bactérias aeróbias totais mostrou reduções decimais de 1,89 e 4,58 após o tratamento com o plasma com hélio e mistura de hélio / oxigênio, respectivamente. Nenhuma mudança significativa foi observada no bacon após o tratamento de plasma, exceto que o valor L* da superfície do bacon foi aumentada. Uma pequena evaporação na quantidade de umidade da superfície do bacon pode ser uma razão para a diminuição do valor L* após o tratamento com o plasma.

Olatunde et al. (2019b) testaram o sistema DBD, numa mistura de argônio e oxigênio (90:10) a 80 kV para bactérias gram-positivas (*Staphylococcus aureus* DMST 4745 e *Listeria monocytogenes* F2365) e bactérias gram-negativas (*Pseudomonas aeruginosa* PSU.SCB.16 S.11, *Vibro parahaemolyticus* PSU.SCB.16 S.14 e *Escherichia coli* DMST 4212). Ambos os grupos foram inativados pelo tratamento de plasma a frio, porém o estudo mostrou a eficiência da ativação antimicrobiana num tempo maior, de 5 minutos, enquanto que, no tempo de tratamento de 1 minuto e 2,5 minutos, a redução da carga microbiana foi maior nas bactérias gram-negativas do que nas bactérias gram-positivas. Todas as bactérias testadas não foram detectadas após 5 minutos de tratamento com o plasma a frio.

O estudo de Rød et al. (2012) avaliou um produto cárneo fatiado inoculado com *Listeria* que ao receber o tratamento de plasma atingiu uma redução de 0,8 a 1,6 log UFC/ g, independentemente dos tempos de tratamento. Porém, apesar da redução de *Listeria*, em produtos cárneos não há tolerância para este micro-organismo, por tanto, o plasma deveria ser eficaz na eliminação total desse patógeno. Em um estudo recente, o efeito sinérgico do óleo de cravo e atmosfera modificada, foi investigado para desinfecção de *E. coli* e *S. aureus* em carne seca (YOO et al., 2021). Para ambos os patógenos, uma maior redução foi encontrada no tratamento combinado (7,5-log reduções) em vez de tratamentos individuais (reduções de 3,0 log). Olatunde et al. (2020b) estudaram o efeito do plasma a frio (DBD na embalagem, 80 kV por 5 minutos com mistura de argônio, dióxido de carbono e oxigênio 30:60:10) combinado com o extrato da casca de coco etanólico encapsulado e perceberam que o mesmo impediu a proliferação de bactérias e a vida útil do robalo asiático foi estendida para até 18 dias.

O processo também pode ser usado para pescados, pois a necessidade de se processar essa categoria tem sido cada vez mais avaliada, uma vez que constituem importantes fontes de nutrientes para a alimentação humana. Os resultados de Choi et al. (2020) demonstraram que 30 minutos de tratamento de plasma por DBD em peixes de boca negra foram eficazes para reduzir mais de 90% de *S. aureus* e *B. cereus*. Por outro lado, apesar de todas essas vantagens, o pescado é o alimento que apresenta maior probabilidade de sofrer a ação de deteriorantes devido ao seu pH próximo da neutralidade, atividade de água elevada e a disponibilidade de nutrientes (GASPAR, 1997; LEITÃO, 1997). Com isso, o plasma a frio também tem sido aplicado em diversos pescados como camarão e outros derivados. Em um estudo feito por Figueiredo et al. (2017), amostras de camarão *in natura* foram submetidas a plasma frio na intensidade de 15 MHz a 10 minutos e apresentaram melhores resultados quanto às características químicas, pois numa frequência maior, a produção de bases voláteis totais nas amostras foi menor.

4.2 Manutenção de propriedades químicas e físicas das carnes e produtos cárneos

Os efeitos do plasma sobre alguns parâmetros físicos e químicos ainda vêm sendo estudados, especialmente quando se trata da avaliação da textura e cor dos produtos cárneos. Fatores como pH e oxidação lipídica também vem ganhando espaço nas pesquisas. Alguns fatores podem afetar a redução microbiana, oxidação de lipídios e a cor das carnes. No estudo de Albertos et al. (2019) com peixe arenque do Atlântico, observou-se que a voltagem influenciou esses parâmetros, visto que essa espécie de pescado possui em sua composição um

alto teor de ácidos graxos insaturados. A Tabela 3 apresenta alguns dados científicos relacionados às técnicas de plasma a frio e alterações físico-químicas nos produtos cárneos.

Tabela 3. Aplicação de plasma frio e suas alterações físico-químicas em produtos cárneos derivados.

Categoria	Referência	Produto	Cor instrumen tal	pH	Oxidação lipídica	Outras observações
CARNE BOVINA	Jayasena et al. (2015)	Lombo de vaca	b* aumentou após 10 min de DBD; a* diminuiu no tempo 7,5 min	-	Aumentou após 10 min de tratamento .	-
	Wang et al. (2021)	Hambúrgues bovinos	L* diminuiu nas tensões de 60 e 70kV a* diminuiu	-	Aumentou nas tensões 60 e 70Kv principalmente a partir do oitavo dia	-
CARNE SUÍNA	Jayasena et al. (2015)	Traseiro suíno	Com 5 min a* aumentou	-	Aumentou após 10 min de tratamento .	-

AVES	Huang et al. (2019)	Carne de porco	Diminuição de a*	-	DBD de 85kV por 1 min, elevou a oxidação	Carbonil mais elevados (P < 0,05)
	Kim et al. (2011)	Bacon	o valor L* da superfície do bacon diminuiu com maior tempo de exposição e maior potência de entrada	-	Após 7 dias de armazenamento aumentou a oxidação (75W 60 – 90 s)	-
	Qian et al. (2021)	Coxas de frango	Diminuição de a*	Diminuição do pH	Reduziu o fenômeno de oxidação de lipídeos	Maior teor de nitrito nas amostras
PESCADO	Choi et al. (2020)	Tamboril de boca negra	-	-	Aumento da oxidação lipídica	DBD para mais de 20 min, o valor da textura diminuiu significativamente (P < 0,05)

Olatunde et al. (2021a)	Caranguejo nadador azul	-	-	Aumento da oxidação lipídica e de proteínas	Teores de ácidos graxos poli-insaturados diminuiu
Olatunde et al. (2021b)	Robalo asiático	b* aumentou consideravelmente e a* diminuiu durante os dias de armazenamento	Tiveram uma menor taxa de aumento de pH comparado ao controle	Aumento da oxidação lipídica e de proteínas	Conteúdo de trimetilamina e volátil total do conteúdo de base de nitrogênio foi menor
Koddy et al. (2020)	Peixe espada	Aumento de L*	-	-	Aumento do conteúdo carbonil

Fonte: a autora.

Jayasena et al. (2015), verificaram que o processo de plasma, ao ser aplicado em carne de porco e lombo de vaca, ambos frescos, não alterou significativamente a cor, dada pelos parâmetros L * e b *. Além disso, o parâmetro b * de amostras de traseiro suíno tratadas com plasma DBD não foram significativamente alteradas; contudo, o valor b * de amostras de carne bovina expostas a 10 min de tratamento com plasma de DBD foi significativamente superior ao das amostras não tratadas. Em contrapartida, ao utilizar um tempo de exposição maior, foi percebida a presença de uma cor esverdeada nas carnes analisadas. Através do alto valor do parâmetro b * é possível observar que a carne suína obteve uma diferença na sua coloração de superfície, devido à reação da mioglobina com peróxido de hidrogênio, formando compostos que promovem essa alteração de cor (FAUSTMANN et al., 1990; FROHLING et al., 2012). Também, o fato de a carne entrar em contato com o plasma gera a oxidação do composto

responsável pela coloração avermelhada e com isso ocorre a formação de compostos que possuem coloração amarronzada (FROHLING et al., 2012; JAYASENA et al., 2015). Além disso, as amostras de lombo de vacas foram ligeiramente superiores às amostras de traseiro de porco em relação a aumento da oxidação lipídica. Esse aumento pode ser atribuído às variações no teor de gordura e ácido graxo na composição dos dois tipos de carne (JAYASENA et al., 2015).

Huang et al. (2019) relataram que o tratamento com DBD de alta tensão pode causar efeitos adversos na cor da carne com alto teor de oxigênio, o que causou uma diminuição no valor a^* , ou seja, redução da vermelhidão da carne de porco. No entanto, no estudo de Wang et al. (2021), com água ativada por plasma não houve diferenças significativas ($P > 0,05$) em L^* , a^* e b^* para a superfície do peito de frango sob várias condições de tratamento. Já no estudo de Qian et al. (2021), as coxas de frango tratadas com ácido láctico ativado por plasma, tiveram o teor de nitrito residual aumentado e não houve mudança significativa nos valores de L^* e b^* também, enquanto que o valor de a^* e pH, diminuíram. Contudo, nem todos os estudos demonstraram os mesmos resultados apresentados anteriormente. Ulbin-figlewicz et al. (2013), ao tratarem amostras de carne suína com plasma a frio utilizando gás hélio e nitrogênio, relataram que não houve descoloração das carnes frescas.

Estudos na literatura mostram como atributo de qualidade a necessidade de avaliar textura nos produtos cárneos tratados com plasma a frio. Kim et al. (2011) tiveram resultados que indicam que a textura das carnes bovina e suína estudadas, não foi afetada ($p > 0,05$) pelo tratamento de plasma DBD, porém quando o tempo de tratamento foi aumentado, os valores de dureza, mastigação e mastigabilidade flutuaram significativamente. Em contrapartida, o perfil de textura do músculo, do peixe espada apresentou uma propriedade melhor de textura nas amostras tratadas com plasma em comparação às amostras de controle. As amostras tratadas tiveram a maior dureza (5,25N) após 3 minutos de tratamento em comparação com a amostra de controle que tinha uma dureza de 1,18N (KODDY et al., 2020). No entanto, algumas pesquisas relacionam que quanto maior o tempo de tratamento, os parâmetros físico-químicos podem ser alterados de forma significativa. Quando tratadas por mais de 20 minutos de DBD, amostras de peixe de boca negra (*Lophiomus setigerus*) tiveram o valor da textura diminuído significativamente (CHOI et al., 2020).

O plasma pode promover a formação de radicais livres, influenciando diretamente os ácidos graxos insaturados e induzindo a oxidação lipídica e produção de subprodutos oriundos dessa reação (JAYASENA et al., 2015; KIM et al., 2013; LIU et al., 2008; MONTIE et al.,

2000). Estudos mostram que essas reações podem ser intensificadas dependendo do tipo de gás de arraste ou características da amostra tratada com plasma, como por exemplo, teor de gordura e composição de ácidos graxos (RØD et al., 2012). Kim et al. (2011), ao tratarem bacon com plasma a frio, reportaram que houve um aumento da oxidação ao comparar com a amostra controle, após 7 dias de armazenamento. Choi et al. (2020), perceberam que a oxidação lipídica aumentou, no tratamento de plasma a frio (1–30 min) na superfície do pescado tamboril de boca negra.

Olatunde et al. (2021a) estudaram plasma a frio de alta tensão, em uma mistura de gases de oxigênio e argônio (10:90), em diferentes tempos de tratamento (de 0, 5, 10 e 15 minutos). A qualidade microbiana, química e vida útil do caranguejo nadador azul foram analisadas com tratamento de plasma a frio de alta pressão na embalagem. Nos tempos de 10 e 15 minutos não foram detectadas bactérias, porém a oxidação de lipídeos e proteínas aumentou à medida que o tratamento em maiores tempos foi aplicado. Os autores relacionaram o aumento da oxidação lipídica nas amostras as atividades de enzimas lipolíticas, produzidas por bactérias associadas à liberação de ácidos graxos livres, que são susceptíveis a oxidação (LAM et al., 2001). Apesar disso, não houve impacto na cor e no pH na carne do caranguejo nadador azul. Por fim, o tratamento de plasma a frio de alta tensão no tempo de 10 minutos mostrou ser aplicável para prologar a vida útil da carne de caranguejo por 12 dias à 4°C. Outra observação neste mesmo estudo foi um aumento no conteúdo de carbonil total, passando de 1,18 para 2,43 μ mol de carbonil / g de proteína ($p < 0,05$). Carbonil é produto resultante do processo de oxidação de proteína, juntamente com a oxidação de resíduos de aminoácidos e a repartição do peptídeo (ESTÉVEZ, 2011). O aumento do teor de carbonil aumentou nas amostras à medida que o tempo de tratamento aumentava, confirmando a oxidação de proteínas desencadeada pelo tratamento com plasma a frio em alta tensão (80 kV), podendo relacionar as espécies reativas que são geradas pelo tratamento de plasma (OLATUNDE et al., 2021a).

Outro estudo de Olatunde et al. (2021b) também verificou o aumento no teor total de carbonil, no tratamento DBD de plasma a frio de alta tensão no isolado de proteína miofibrilar do robalo asiático. Assim como o estudo de Koddy et al. (2020), apresentado na Tabela 2, houve um aumento significativo no teor de carbonil, a amostra de controle do peixe espada continha cerca de 0,23 nmol de carbonil/mg de proteína, quando realizado o tratamento com plasma a frio por 180s, foi aumentada para 0,9 nmol de carbonil / mg proteína ($p < 0,05$). Nesse mesmo estudo de Koddy et al. (2020) uma diminuição significativa na atividade enzimática foi observada com o aumento do tempo de tratamento, onde o menor valor da atividade enzimática

de 0,035 unidades / mg foi registrado após 240 segundos de tratamento. Os resultados mostraram que a inativação do extrato bruto de protease por plasma a frio foi afetada pelo tempo de exposição. A diminuição da atividade enzimática é causada provavelmente pela desnaturação devido às altas temperaturas. A temperatura da atividade proteolítica varia entre 25 – 75°C, enquanto a atividade ótima ocorre entre 40 – 50°C (GÓMEZ-GUILLÉN et al., 2002). Os autores consideraram que a temperatura e o pH podem ser implementados para desativar a protease, limitando o amolecimento e melhorando a qualidade final do produto (KODDY et al., 2020). Resultado de acordo com o estudo de Nyaiasaba et al. (2019) que avaliaram o efeito do plasma a frio no concentrado protéico do manto de lula (*Argentinus illex*) em diferentes tempos de exposição (15, 60, 120, 180, 240 e 300 s) a 60 Kv, indicando que a atividade da protease diminuiu com o aumento do tempo de tratamento. A maior redução ($p < 0,05$) da atividade da protease (64%) foi observada após 240s de tratamento com plasma a frio.

Zouelm et al. (2019) avaliaram o efeito do plasma a frio por jato de plasma (Ar, 220 V, 282 W, 50 Hz e 1,9 A) em amostras de camarão branco do Pacífico (*Litopenaeus vannamei*) frescos, a diferentes tempos de tratamento 45, 90 e 150s. Os autores demonstraram que a exposição ao plasma diminuiu efetivamente a atividade da enzima polifenol oxidase (PPO), e prolongando a exposição ao plasma por 150s resultou em 50% de redução na atividade enzimática.

Um estudo recente de Pérez-Andrés et al. (2020), sobre os efeitos do plasma a frio em filetes de cavala comercial, mostrou que não houve resultados significativos na oxidação lipídica, bem como não apresentou alterações na composição de ácidos graxos. Neste estudo, as amostras foram seladas com uma proporção (90:10) argônio e oxigênio, respectivamente.

Wang et al. (2021) realizaram um estudo com hambúrgueres bovinos tratados com plasma a frio de DBD, para observar durante o armazenamento mudanças na cor, mioglobina e oxidação lipídica. O tratamento com DBD resultou na redução da vermelhidão da carne (a^*) e o acúmulo de metamioglobina, esses resultados indicam que a alta voltagem no tratamento de plasma a frio com DBD, pode exercer efeitos adversos na vermelhidão da carne crua. Além disso, o tratamento causou uma diminuição da atividade redutora de metamioglobina e um aumento da oxidação lipídica nos hambúrgueres ao longo do armazenamento. Os autores perceberam também que quanto maior as tensões (60 kV e 70 kV) no tratamento, mais significativas eram as mudanças da atividade redutora de metamioglobina e oxidação lipídica, comparado com controle, os valores de L^* dos hambúrgueres tratados com 60 e 70 kV

diminuíram significativamente ($p < 0,05$), enquanto aquelas amostras de 50 kV não foram diferentes ($p > 0,05$) no dia 0.

Mais estudos são necessários para aprimorar a eficácia de inativação microbiana e minimizar os efeitos adversos nas propriedades físico-químicas e sensoriais de matrizes alimentares, especialmente para aqueles com alto teor de lipídios (LAROQUE et al., 2022). Uma medida alternativa que vem sendo estudada é a combinação de plasma a frio com elementos antioxidantes em atmosfera modificada, justamente para alimentos com alto teor de lipídeos, como os frutos do mar. Gao et al. (2021) estudaram os efeitos de alguns antioxidantes em hambúrgueres de peito de frango embalados em atmosfera modificada direcionada ($65\% \text{O}_2 + 30\% \text{CO}_2 + 5\% \text{N}_2$) com plasma a frio de DBD (70 kV a 3 minutos) à temperatura ambiente de 22 ± 1 . Dos antioxidantes naturais analisados, como carnosina, alecrim, casca de pinheiro e romã à 1% na massa dos hambúrgueres e com hidroxitolueno butilado sintético (BHT) à 0,02%, nenhum antioxidante testado afetou o pH da amostra. Os autores concluíram que esses extratos naturais das plantas podem melhorar a estabilidade da oxidação lipídica em carnes processadas com plasma a frio. O tratamento de DBD resultou em aumentos da oxidação lipídica na carne de frango moída independentemente do antioxidante. A maioria dos antioxidantes testados neste estudo não foram eficazes contra a oxidação lipídica induzida por DBD ou gerada durante o processo. Apenas casca de pinheiro e extrato de BHT podem retardar a oxidação lipídica resultante da geração de plasma em embalagens de hambúrgueres de frango (GAO et al., 2021).

Em uma revisão recente dos efeitos do plasma frio na oxidação de lipídios em carnes e produtos cárneos, foi relatado que o peito de frango era mais estável ao óxido derivado do plasma do que as carnes vermelhas (GAVAHIAN et al., 2018). Essas diferenças podem ser atribuídas ao baixo teor de gordura do peito de frango que é considerado uma carne magra em comparação com carne vermelha (porco ou bovino) (MOUTIQ et al., 2019).

Outro parâmetro de grande relevância é o pH dos produtos cárneos e como este é afetado pelo processo de plasma, uma vez que está relacionado à capacidade tecnológica de processar a matéria prima e obter outros produtos a partir dela (MONIN, 1998). O pH de lombos suínos frescos foi analisado por Fröhling et al. (2012) que relataram em seus estudos que houve uma mudança significativa nesse parâmetro quando a amostra foi submetida ao tratamento com plasma. No entanto, essa mudança não é considerada significativa ao analisar as alterações que poderiam influenciar na qualidade da carne. Essa diminuição deve-se ao acúmulo de moléculas acidogênicas na superfície da carne (FROHLING et al., 2012; KIM et al., 2013) que podem ser minimizadas pela introdução de um gás nobre ao processo.

Alguns estudos mostram o efeito do pH com o tempo de armazenamento após o tratamento com o plasma a frio. Em amostras de frango armazenadas a 4°C durante 9 dias não houve diferença significativa no pH nas amostras tratadas comparadas ao controle. Porém a partir 12° dia, o pH da amostra de controle aumentou, o que foi significativo podendo relacionar ao aumento da população microbiológica (MOUTIQ et al., 2019). Em alguns estudos que utilizaram a tecnologia de plasma a frio em produtos cárneos, especificamente pescado, como Tamboril de boca negra, Caranguejo azul, Robalo asiático, o pH das amostras de carne não foi afetado de forma relevante (CHOI et al., 2020; OLATUNDE et al., 2021a; OLATUNDE et al., 2020c).

Na pesquisa de Koddy et al. (2020) foram investigados os impactos do plasma a frio nas propriedades da proteína muscular e no desempenho de enzima bruta extraída de peixe espada (*Trichiurus Lepturus*), e concluíram que a implementação do plasma a 50kV foi capaz de inibir a atividade do extrato bruto de protease ao menor valor de 0,035 unidades/mg de proteína após 4 minutos. Os índices de oxidação de proteínas (carbonilas e sulfidrilas) variam significativamente quando a enzima protease bruta foi exposta a espécies ativas de plasma. Ao analisar os efeitos do plasma a frio de DBD, em filetes de cavala, pôde-se confirmar que a microscopia de varredura eletrônica poderia efetivamente atrasar a degradação das proteínas miofibrilares e aumentar a estabilidade das estruturas teciduais (CHEN et al., 2018).

4.3 Preservação das características sensoriais das carnes e produtos cárneos

O plasma a frio, por ser um processo de caráter não térmico, tem propiciado a minimização das alterações em carnes e derivados tratados, em contrapartida aos métodos térmicos, como mudanças na cor, odor, sabores indesejáveis e perdas de compostos de alto valor nutricional.

Os estudos relacionados às modificações sensoriais provocadas pelo uso do plasma a frio começaram a ganhar destaque a partir de 2012, com resultados que revelam o impacto que esta técnica pode ter sobre queijos e carnes suínas, demonstrando que há leves perdas em relação à cor, odor, textura, enquanto a aparência, sabor, aroma e aceitabilidade foram marcadamente reduzidos (LEE et al., 2012; KIM et al., 2013). No entanto, é necessário avaliar mais a fundo os impactos causados nos parâmetros gustativos e olfativos de alimentos tratados por plasma a frio, além do impacto na determinação da qualidade sob os componentes como vitaminas, poli fenóis, nutrientes e constituintes alergênicos.

Em se tratando de análise sensorial, a aceitação do mercado/consumidor de alimentos processados por plasma a frio é essencial, visto que se utiliza de uma tecnologia emergente em que o poder de decisão de compra do consumidor não pode ser afetado negativamente. Contudo, isso demonstra que o processamento de alimentos por plasma a frio ainda é recente e futuras pesquisas são necessárias antes de tal processo ser aplicado em escala industrial, considerando que os resultados apresentados até o momento se mostram promissores e apontam muitas vantagens da utilização desse método (MOK et al., 2015; SUROWSKY et al., 2015). Nenhum dos tratamentos de plasma afetou a aparência, cor, sabor e aceitabilidade geral das amostras de carne de porco e de boi ($P > 0,05$) conforme trabalho de Jaysena et al. (2015). Porém, a pontuação sensorial para sabor foi significativamente menor quando as amostras da carne suína foram tratadas por 5 e 10 min, enquanto que para lombo de boi foi afetada negativamente apenas pelo tratamento de 10 minutos ($P < 0,05$).

No estudo de Qian et al. (2021), com ácido láctico ativado por plasma (PALA) usado em coxas de frango cruas, o tratamento reduziu o fenômeno de oxidação de lipídios e não obteve mudanças notáveis no odor e proteína. O experimento com nariz eletrônico testado pelos autores, sugeriram que o PALA poderia melhorar o efeito negativo sobre odores.

Choi et al. (2020) avaliaram a qualidade sensorial do peixe de boca negra tratado com plasma DBD, onde critérios como cor, sabor, textura e aceitabilidade geral foram testados por 20 painelistas usando a escala hedônica. Não houve diferenças significativas desses parâmetros nas superfícies dos filés de peixe de boca negra seca irradiados de 1–30 min de plasma. Resultados de acordo com Chen et al. (2018) com estudo de peixes cavalas *chub* (*Scomber japonicus*), um sistema de plasma a frio de DBD (60 kV e 1 min), mostraram que os atributos sensoriais foram semelhantes às amostras de controle. Sugerido pelos autores, o plasma a frio é uma alternativa promissora também na tecnologia de conservação de pescado.

Considerações finais

A tecnologia não térmica por plasma frio é uma abordagem relativamente recente na área de alimentos. Com base nos estudos apresentados, foi possível perceber que o plasma a frio é uma tecnologia promissora para ação antimicrobiana, visto que a redução de micro-organismos estudados foi notória. Compreender o mecanismo de ação é fundamental para a otimização da tecnologia para aplicações específicas na indústria de processamento de alimentos, como os produtos cárneos, tornando o processo favorável ao uso na indústria. O

método mais aplicado de plasma é a barreira de descarga dielétrica, por ser uma alternativa segura e de baixo custo para a indústria de processamento. A carne de frango e os peixes vem se destacando como os produtos mais pesquisados nessa categoria. A maioria dos estudos demonstrou o sucesso da aplicação de plasma frio para descontaminação de carne e produtos à base de carne, tornando o processo benéfico. Com um menor tempo de tratamento, as alterações físico-químicas das carnes são insignificantes, sendo positivo comparado aos métodos tradicionais de conservação. Com desenvolvimentos contínuos da ciência em relação as tecnologias de plasma, o processamento de plasma a frio tem grande potencial para substituir as tecnologias de descontaminação convencional na indústria de carne no futuro próximo.

Referências

1. AGUIAR, M. M., et al. High hydrostatic pressure, pulsed electric fields and cold plasma in the food production chain: Principles and industrial applicability. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 2, 2021.
2. ALBERTOS, I., et al. Effects of dielectric barrier discharge (DBD) generated plasma on microbial reduction and quality parameters of fresh mackerel (*Scomber scombrus*) fillets. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 44, 117 - 122, 2017.
3. ALBERTOS, I., et al. Shelf-life extension of herring (*Clupea harengus*) using in-package atmospheric plasma technology. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.53, p.85 – 91, 2019.
4. BAIER, M., et al. Inactivation of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* O104:H4 using cold atmospheric pressure plasma. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 120, n. 3, p. 275 – 279, 2015.
5. BARBOSA-CANOVAS, G. V., et al. Advanced retorting, microwave assisted thermal sterilization (MATS), and pressure assisted thermal sterilization (PATs) to process meat products. **Meat Science**, v. 98, p. 420 - 434, 2014.
6. BAUER, A., et al. The effects of atmospheric pressure cold plasma treatment on microbiological, physical-chemical and sensory characteristics of vacuum packaged beef loin. **Meat Science**, v. 128, p. 77 – 87, 2017.
7. BEHSNILIAN, D., et al. Process-induced undesirable 608 compounds: Chances of non-thermal approaches. **Meat Science**, v. 98, p.392 - 403, 2014.
8. BERMÚDEZ-AGUIRRE, et al. 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.
9. BERMUDEZ-AGUIRRE, D. Advances in Cold Plasma Applications for Food Safety and Preservation. **Elsevier**, 2020.
10. BOURKE, P., et al. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production. **Trends Biotechnology**. V. 36, p. 615 – 626, 2018.

11. BRUGGEMAN, P.J., IZA, F., BRANDENBURG, R. Foundations of atmospheric pressure non-equilibrium plasmas. **Plasma Sources Science Technology**, v. 26, 2017.
12. CDC, Centers for Disease Control and Prevention, 2019. <https://www.cdc.gov/foodsafety/outbreaks/index.html>.
13. CHABERT, P., BRAITHWAITE, N. **Physics of Radio-Frequency Plasmas**. Cambridge University Press, New York, 2011.
14. CHEN, J., et al. 2018. Effect of cold plasma on maintaining the quality of chub mackerel (*Scomber japonicus*): biochemical and sensory attributes. **Journal Science Food Agriculture**, v. 99 (1), p. 39–46, 2018.
15. CHOI, S.; PULIGUNDLA, P.; MOK, C. Microbial decontamination of dried Alaska pollock shreds using corona discharge plasma jet: Effects on physicochemical and sensory characteristics. **Journal of Food Science**, v. 81, 2016.
16. CHOI, M. S., et al. Impact of non-thermal dielectric barrier discharge plasma on *Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus* and quality of dried blackmouth angler (*Lophiomus setigerus*). **Journal of Food Engineering**, v. 278, p.1 – 9, 2020.
17. COUTINHO, N.M., et al. Cold plasma processing of milk and dairy products. **Trends Food Science Technology**, v. 74, p.56 – 68, 2018.
18. CUBAS, A. L. V., et al. Biodiesel production using fatty acids from food industry waster using corona discharge plasma technology. **Waste Management**, v. 47, p. 149 – 154, 2016.
19. DENG, X.T., et al. Effects of microbial loading and sporulation temperature on atmospheric plasma inactivation of *Bacillus subtilis* spores. *Appl. Phys. Lett*, 2005, vol. 87.
20. DIRKS, B. P. et al. Treatment of raw poultry with nonthermal dielectric barrier discharge plasma to reduce *campylobacter jejuni* and *Salmonella enterica*. **Journal of Food Protection**, v.75, p. 22–28, 2012.
21. DONG, X.Y., YANG, Y.L. A novel approach to enhance blueberry quality during storage using cold plasma at atmospheric air pressure. **Food Bioprocess Technology**, v. 12, p. 1409 – 1421, 2019.
22. EHLBECK, J., et al. Low temperature atmospheric pressure plasma sources for microbial decontamination. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 44, n. 1, 2011.
23. EKEZIE, F.G.C., SUN, D.W., CHENG, J.H. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: current applications and future trends. **Trends Food Science Technology**, v. 69, p. 46 – 58, 2017a.
24. EKEZIE, F.G.C. et al. Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: a review of recent developments. **Trends Food Science Technology**, v.67, p.58 – 69, 2017b.
25. EKEZIE, F.G.C., et al. Altering the IgE binding capacity of king prawn (*Litopenaeus Vannamei*) tropomyosin through conformational changes induced by cold argon-plasma jet. *Food Chem.* 300, 2019b.
26. ESTÉVEZ, M. Protein carbonyls in meat systems: A review. **Meat Science**, v. 89, p. 259 – 279, 2011.
27. FARBER, R. Biofilm grown on wood waste pretreated with cold low-pressure nitrogen plasma: Utilization for toluene remediation. **International Bio deterioration & Biodegradation**, v.139, p. 62 – 69, 2019.
28. FAUSTMANN, C., CASSENS, R.G. The biochemical basis for discoloration in fresh meat: a review. **Journal Muscle Foods**, v.1, p. 217 – 243, 1990.
29. FEIZOLLAHI, E.; MISRA, N.; ROOPESH, M. Factors influencing the antimicrobial efficacy of dielectric barrier discharge (DBD) atmospheric cold plasma (ACP) in food processing applications. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, p. 1 – 24, 2020.
30. FENG, X. Argon plasma effects on maize: pesticide degradation and quality changes. **Journal Science Food Agriculture**, v. 99, p. 5491 – 5498, 2019.

31. FROHLING, A., et al. Indirect plasma treatment of fresh pork: decontamination efficiency and effects on quality attributes. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 16, p. 381 – 390, 2012.
32. FROHLING, A. et al. Indirect plasma treatment of fresh pork: Decontamination efficiency and effects on quality attributes. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.16, p.381–390, 2012.
33. GALANAKIS, C. M. Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications. **Trends in Food Science & Technology**, v. 26, n. 2, p. 68 – 87, 2012.
34. GAROFULIC, I. E., et al. The effect of gas phase plasma treatment on the anthocyanin and phenolic acid content of sour cherry Marasca (*Prunus cerasus* var. Marasca) juice. **LWT – Food Science and Technology**, v. 62, n. 1, p. 894 – 906, 2015.
35. GASPAR, J., et al. Aspectos Sanitários do pescado de origem de água doce e marinha, comercializado na feira de Gentilândia, Fortaleza, Ceará. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, São Paulo. v.11, p.20-287,1997.
36. GÖK, V., et al. The effects of atmospheric cold plasma on inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* and some quality characteristics of pastırma—A dry-cured beef product. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 56, 2019.
37. GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, C.R., et al. The effect of cold atmospheric plasma and linalool nanoemulsions against *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* on ready-to-eat chicken meat. **LWT - Food Science and Technology**, v. 149, 2021.
38. GOVAERT, M., et al. Inactivation of *L. Monocytogenes* and *S. typhimurium* biofilms by means of an air-based cold atmospheric plasma (CAP) system. **Foods**, v. 9, p.157, 2020.
39. GAVAHIAN, M., et al. A critical analysis of the cold plasma induced lipid oxidation in foods. **Trends Food Science. Technology**, v.77, p. 32 – 41, 2018.
40. HAJHOSEINI, A.; SHARIFAN, A.; YOUSEFI, H. Effects of atmospheric cold plasma on microbial growth of *Listeria innocua* and *Staphylococcus aureus* in ready-to-eat fish products. **Iranian Journal of Fisheries Sciences**, v. 19, p. 262 – 271, 2020.
41. HAN, L., et al. Mechanisms of Inactivation by High-Voltage Atmospheric Cold Plasma Differ for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. **Applied and Environmental Microbiology**, 82(2), p. 450 - 458, 2015.
42. HAN, L., et al. Controlling microbial safety challenges of meat using high voltage atmospheric cold plasma. **Frontiers in Microbiology**, v.7, p. 977 – 988, 2016.
43. Han, L. et al. Mechanisms of inactivation by high-voltage atmospheric cold plasma differ for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 82, p. 450 – 458, 2016b.
44. HOJNIK, N., et al. Mycotoxin Decontamination of Food: Cold Atmospheric Pressure Plasma versus “Classic” Decontamination. **Toxins**, v.9, p. 151, 2017.
45. HUANG, H. W., et al. Current status and future trends of high-pressure processing in food industry. **Food Control**, v. 72, p. 1 – 8, 2017.
46. HUANG, Y., et al. An investigation of inactivation mechanisms of *Bacillus amyloliquefaciens* spores in non-thermal plasma of ambient air. **Journal Science Food Agriculture**, v. 99, p. 368 – 378, 2019.
47. ISHIKAWA, K.; HORI, M. Diagnostics of plasma-biological surface interactions in low pressure and atmospheric pressure plasmas. **International Journal of Modern Physics: Conference Series**. World Scientific, 2014.
48. JAYASENA, D.D., et al. Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin: effects on pathogens inactivation and meat quality attributes. **Food Microbiology**, v. 46, p. 51 – 57, 2015.

49. JAYASENA, D.D.; JO, C. Potential application of essential oils as natural antioxidants in meat and meat products: a review. **Food Rev. Int.** 30, p. 71 – 79, 2014.
50. KANG, J.H.; ROH, S.H.; MIN, S.C. Inactivation of potato polyphenol oxidase using microwave cold plasma treatment. *J. Food Sci.* 84, p. 1122 – 1128, 2019.
51. KAUSHIK, N.K., et al. Effect of jet plasma on T98G human brain cancer cells. **Current Applied Physics** v.13, p.176 – 180, 2013.
52. KHANI, M. R.; SHOKRI, B.; KHAJEH, K. Studying the performance of dielectric barrier discharge and gliding arc plasma reactors in tomato peroxidase inactivation. **Journal of Food Engineering**, v. 197, p.107 – 112, 2017.
53. KIM, B.; YUN, H.; JUNG, Y.; JUNG, H.; CHOE, W.; JO, C. Effect of atmospheric pressure plasma on inactivation of pathogens inoculated onto bacon using two different gas compositions. **Food Microbiology**, v. 28, n. 1, p. 9 – 13, 2011.
54. KIM, H. J. et al. Effects of dielectric barrier discharge plasma on pathogen inactivation and the physicochemical and sensory characteristics of pork loin. **Current Applied Physics**, v. 13, n. 7, p. 1420 – 1425, 2013a.
55. KIM, J. E., et al. Microbial decontamination of red pepper powder by cold plasma. **Food Microbiology**, v. 38, p. 128 – 136, 2014.
56. KIM, J.H., MIN, S.C. Moisture vaporization-combined helium dielectric barrier discharge-cold plasma treatment for microbial decontamination of onion flakes. **Food Control**, v. 84, p. 321 – 329, 2018.
57. KIM, C., et al. Effect of relative humidity on the inactivation of foodborne pathogens by corona discharge plasma jet (CDPJ). **LWT** v.127, 109379, 2020.
58. KOGELSCHATZ, U. **Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications**. Plasma Chemistry and Plasma Processing, v. 23 (1), p. 1 – 46, 2002.
59. KODDY, J. K., et al. Understanding the role of atmospheric cold plasma (ACP) in maintaining the quality of hairtail (*Trichiurus lepturus*). **Food Chemistry**, 128418, 2020.
60. LAROQUE, D. A., et al., Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application, **Journal of Food Engineering**, v.312, 110748, 2022.
61. LEE, H.J., et al. Inactivation of *Listeria monocytogenes* on agar and processed meat surfaces by atmospheric pressure plasma jets. **Food Microbiology**. v. 28, p.1468 – 1471, 2011.
62. LEE, H.J., et al. Evaluation of a dielectric barrier discharge plasma system for inactivating pathogens on cheese slices. **Journal of Animal Science Technology**. v.54, p.191–198, 2012.
63. LEE, K. H., et al. Evaluation of cold plasma treatments for improved microbial and physicochemical qualities of brown rice. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologies**, v.73, p. 442 – 447, 2016.
64. LEITÃO, M. F., et al. Alterações químicas e microbiológicas em pacu (*Piaractus mesopotamicus*) armazenado sob refrigeração a 5°C. **Food Science and Technology Campinas**, 1997. v. 17, p. 160-166, 1997.
65. LI, T., et al. Shelf-life extension of crucian carp (*Carassius auratus*) using natural preservatives during chilled storage. **Food Chemistry**, v.135, p.140 – 145, 2012.
66. LI, X.; FARID, M. A review on recent development in nonconventional food sterilization technologies. **Journal of Food Engineering**, v. 182, p. 33 – 45, 2016.
67. LI, M., et al. Physiological and metabolomic analysis of cold plasma treated fresh-cut strawberries. **J. Agric. Food Chem.** v.67, p.4043 – 4053, 2019a.
68. LI, X., et al. Cold plasma treatment induces phenolic accumulation and enhances antioxidant activity in fresh cut pitaya (*Hylocereus undatus*) fruit. **LWT** v.115, 108447, 2019b.
69. LIAO, X., et al. Application of a Dielectric Barrier Discharge Atmospheric Cold Plasma (Dbd-Acp) for *Eshcherichia Coli* Inactivation in Apple Juice. **Food Science**, v. 83(2), p. 801 - 408, 2018.

70. LIU, H., Chen, J., et al. Long-distance oxygen plasma sterilization: effects and mechanisms. **Applied Surface Science**, v. 254 (6), p. 1815 – 1821, 2008.
71. Luan, L., et al. A study of fractal dimension as a quality indicator of hairtail (*Trichiurus haumela*) samples during frozen storage. **Scientific Reports**, v. 8(1), 2018.
72. MAI-PROCHNOW, A., et al. Gram positive and Gram-negative bacteria differ in their sensitivity to cold plasma. **Scientific Reports**, v. 6, 2016.
73. MANDAL, R., SINGH, A., SINGH, A.P., Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. **Trends in Food Science & Technology**, v. 80, p. 93 – 103, 2018.
74. MISRA, N. N., et al. Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens. **Food Engineering Reviews**, v. 3, n. 3 – 4, p. 159 – 170, 2011.
75. MISRA, N. N., et al. In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of strawberries. **Journal of Food Engineering**, v. 125, p. 131 – 138, 2014.
76. MISRA, N. N., et al. In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of cherry tomatoes. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 118, 2014b.
77. MISRA, N. N., et al. Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of wheat flour. **Food Hydrocolloids**, v. 44, p. 115 – 121, 2015.
78. MISRA, N. N., et al. Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. **Trends in Food Science and Technology**, v.55, p. 39 - 47, 2016.
79. MISRA, N.N.; JO, C., Applications of Cold Plasma Technology for Microbiological Safety in Meat Industry, **Trends in Food Science & Technology**, 2017.
80. MISRA, N. N., et al. 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 (1), p. 106 - 120, 2019.
81. MISRA, N.N., et al. In-package cold plasma technologies. *J. Food Eng.* 244, p. 21 – 31, 2019b.
82. MOK, C., et al. Afterglow corona discharge air plasma (ACDAP) for inactivation of common food-borne pathogens. **Food Research International**, v. 69, p. 418 – 423, 2015.
83. MONIN, G. Recent methods for predicting quality of whole meat. **Meat Science**, v. 49, S231–S243, 1998.
84. MONTIE, T.C., et al. An overview of research using the one atmospheric uniform glow discharge plasma (OAUGDP) for sterilization of surfaces and materials. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 28, p. 41 – 50, 2000.
85. MOUTIQ, R., In-package decontamination of chicken breast using cold plasma technology: Microbial, quality and storage studies. **Meat Science**, 107942, 2019.
86. MOUTIQ, R., et al. In-package decontamination of chicken breast using cold plasma technology: microbial, quality and storage studies. **Meat Science**, v.159, 107942, 2020.
87. MUKHOPADHYAY, S.; RAMASWAMY, R. Application of emerging technologies to control Salmonella in foods: A review. **Food Research International**, v. 45, n. 2, p. 666 – 677, 2012.
88. NAGATSU, M., et al. Effects of oxygen radicals in low-pressure surface-wave plasma on sterilization. **Application Physical Letters**, v. 86, n. 21, 2005.
89. NIEMIRA B. A. Cold Plasma Decontamination of Foods. **Annual Review of Food Science and Technology**, v.3, p.125 – 142, 2012.
90. NIVEDITHA, R. et al. Application of cold plasma and ozone technology for decontamination of *Escherichia coli* in foods- a review, **Food Control**, v. 130, 2021.
91. OH, Y. A., et al. 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.
92. OLATUNDE, O. O.; BENJAKUL, S. Natural preservatives for extending the shelf-life of seafood: A revisit. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v.17, p.1595–1612, 2018a.

93. OLATUNDE, O. O.; BENJAKUL, S. Nonthermal processes for shelf-life extension of seafoods: A revisit. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v.17, p.892–904, 2018b.
94. OLATUNDE, O. O.; BENJAKUL, S. Antioxidants from crustaceans: A panacea for lipid oxidation in marine-based foods. **Food Reviews International**, p.1–31, 2020.
95. OLATUNDE, O. O.; BENJAKUL, S.; VONGKAMJAN, K. Combined effects of high voltage cold atmospheric plasma and antioxidants on the qualities and shelf-life of Asian sea bass slices. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.54, p.113–122, 2019a.
96. OLATUNDE, O. O.; BENJAKUL, S.; VONGKAMJAN, K. Dielectric barrier discharge cold atmospheric plasma: Bacterial inactivation mechanism. **Journal of Food Safety**, v.39, Article e12705, 2019b.
97. OLATUNDE, O. O.; BENJAKUL, S.; VONGKAMJAN, K. Dielectric barrier discharge high voltage cold atmospheric plasma: An innovative nonthermal technology for extending the shelf-life of Asian sea bass slices. **Journal of Food Science**, v.84, p.1871–1880, 2019c.
98. OLATUNDE, O. O.; BENJAKUL, S.; VONGKAMJAN, K. High voltage cold atmospheric plasma: Antibacterial properties and its effect on quality of Asian sea bass slices. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.52, p.305–312, 2019d.
99. OLATUNDE, O. O.; BENJAKUL, S.; VONGKAMJAN, K. Cold plasma combined with liposomal ethanolic coconut husk extract: A potential hurdle technology for shelf-life extension of Asian sea bass slices packaged under modified atmosphere. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.65, 102448, 2020a.
100. OLATUNDE, O. O.; BENJAKUL, S.; VONGKAMJAN, K. Microbial diversity, shelf-life and sensory properties of Asian sea bass slices with combined treatment of liposomal encapsulated ethanolic coconut husk extract and high voltage cold plasma. **LWT**, v.134, 110232, 2020b.
101. OLATUNDE, O. O.; BENJAKUL, S.; VONGKAMJAN, K. Shelf-life of refrigerated Asian sea bass slices treated with cold plasma as affected by gas composition in packaging. **International Journal of Food Microbiology**, v.324, 108612, 2020c.
102. OLATUNDE, O. O.; BENJAKUL, S.; YESILSU, A. F. Antimicrobial compounds from crustaceans and their applications for extending shelf-life of marine-based foods. **Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v.20, p.629–646, 2020d.
103. OLATUNDE, O. O., et al. Effect of high voltage cold plasma on oxidation, physiochemical, and gelling properties of myofibrillar protein isolate from Asian sea bass (*Lates calcarifer*). **Foods**, v.10, 326, 2021.
104. OLATUNDE, O. O.; SHIEKH, K. A.; BENJAKUL, S. Pros and cons of cold plasma technology as an alternative non-thermal processing technology in seafood industry. **Trends in Food Science & Technology**, v. 111, p. 617 – 627, 2121a.
105. OLATUNDE, O. O., et al. Effect of high voltage cold plasma on oxidation, physiochemical, and gelling properties of myofibrillar protein isolate from Asian sea bass (*Lates calcarifer*). **Foods**, v.10, 326, 2021b.
106. PALUMBO, S. A. Is refrigeration enough to restrain food borne pathogens? **Journal of Food Protection**. v. 49, p. 1003 – 9, 1986.
107. PANKAJ, S. K., et al. Applications of cold plasma technology in food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, v. 35, p. 5 – 17, 2014.
108. PANKAJ, S. Thermal processing of food. In R. V. Ravishankar (Ed.), **Advances in food biotechnology**. p. 681– 692, 2015.
109. PANKAJ, S. K.; KEENER, K. M. Cold plasma: Background, applications and current trends. **Current Opinion in Food Science**, v.16, p. 49–52, 2017.
110. PANKAJ, S. K.; WAN, Z.; KEENER, K. M. Effects of cold plasma on food quality: A review. **Foods**, v. 7, p. 4, 2018.

111. PARK, S. Y.; HA, S. D. Application of cold oxygen plasma for the reduction of *Cladosporium cladosporioides* and *Penicillium citrinum* on the surface of dried filefish (*Stephanolepis cirrhifer*) fillets. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 50(4), p. 966 - 973, 2015.
112. PATANGE, A., et al. Efficacy of cold plasma functionalized water for improving microbiological safety of fresh produce and wash water recycling. **Food Microbiology**, v. 84, 103226, 2019.
113. PEKÁREK, S. DC corona discharge ozone production enhanced by magnetic field. **European Physical Journal**, v. 56, n. 1, p. 91 – 98, 2010.
114. PEREIRA, R. N.; VICENTE, A. A. Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing. **Food Research International**, v. 43, p. 1936 – 1943, 2010.
115. PÉREZ-ANDRÉSA, J. M., et al. Effects of cold atmospheric plasma on mackerel lipid and protein oxidation during storage. **Food Science and Technology**, v.118, 2020.
116. PINA-PEREZ, M.C., et al. Low-energy short-term cold atmospheric plasma: controlling the inactivation efficacy of bacterial spores in powders. **Food Research International**, v.130, 108921, 2020.
117. PULIGUNDLA, P.; LEE, T.; MOK, C. Effect of corona discharge plasma jet treatment on the degradation of aflatoxin B1 on glass slides and in spiked food commodities. **LWT**, v. 124, 108333, 2020.
118. QIAN, J., et al. Evaluation of meat-quality and myofibrillar protein of chicken drumsticks treated with plasma-activated lactic acid as a novel sanitizer. **Food Science and Technology**, v. 138, 2021.
119. RAIZER, Y. P.; ALLEN, J. E. Gas discharge physics, Springer, Berlin, vol. 1, 1991.
120. RAMOS, A. M., et al. Aplicação de campos elétricos pulsados de alta intensidade na conservação de alimentos. **Revista Ceres**, v. 53, n. 308, p. 425 – 438, 2006.
121. RØD, S.K., et al. Cold atmospheric pressure plasma treatment of ready-to-eat meat: inactivation of *Listeria innocua* and changes in product quality. **Food Microbiology**, v. 30, p. 233 – 238, 2012.
122. SCALLY, L., et al. Diagnostics of a large volume pin-to-plate atmospheric plasma source for the study of plasma species interactions with cancer cell cultures. **Plasma Processing**, p. 1 – 12, 2021.
123. SARANGAPANI, C. et al. Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 44, p. 235 - 241, 2017.
124. SCHRAM, D. C. Plasma processing and chemistry. **Pure Application Chemical**, v. 74, n. 3, p. 369 – 380, 2002.
125. SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1232 p., 2012.
126. SEN, Y., ONAL-ULUSOY, B., MUTLU, M. Detoxification of hazelnuts by different cold plasmas and gamma irradiation treatments. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 54, p. 252 – 259, 2019.
127. SHAKILA BANU, M., et al. Cold plasma as a novel food processing technology. **International Journal of Emerging trends in Engineering and Development**, v. 4, n. 2, p. 803 – 818, 2012.
128. SHARMA, A., et al. Differential gene expression in *Escherichia coli* following exposure to nonthermal atmospheric pressure plasma. **Journal of Applied Microbiology**, v. 107, n. 5, p. 1440 – 1449, 2009.
129. SHIEKH, K. A.; BENJAKUL, S. Effect of high voltage cold atmospheric plasma processing on the quality and shelf-life of Pacific white shrimp treated with *Chamuang* leaf extract. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 64, 102435, 2020.

130. SINGH, A.; BENJAKUL, S. The combined effect of squid pen Chito oligosaccharides and high voltage cold atmospheric plasma on the shelf-life extension of Asian sea bass slices stored at 4°C. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 102339, 2020.
131. SILVA, J.A. Microrganismos patogênicos em carne de frango. **Revista Higiene Alimentar**, v. 58, p. 1- 4, 1998.
132. SILVEIRA, M.R. Guava-flavored whey beverage processed by cold plasma technology: bioactive compounds, fatty acid profile and volatile compounds. **Food Chemistry**, v. 279, p.120 – 127, 2019.
133. SMET, C. Combined effect of cold atmospheric plasma, intrinsic and extrinsic factors on the microbial behavior in/on (food) model systems during storage. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 53, p. 3 – 17, 2019.
134. SONG, H.P., et al. Evaluation of atmospheric pressure plasma to improve the safety of sliced cheese and ham inoculated by 3-strain cocktail *Listeria monocytogenes*. **Food Microbiology**, v. 26, p. 432 – 436, 2009.
135. STOFFELS, E., et al. A plasma needle generates nitric oxide. **Plasma Sources Science and Technologies**, v. 15, n. 3, p. 501, 2006.
136. STOICA, M., et al. Atmospheric cold plasma as new strategy for foods processing – an overview. **Innovative Romanian Food Biotechnology**, v. 15, p. 1 – 8, 2014.
137. SUROWSKY, B., et al. Interactions of nonthermal atmospheric pressure plasma with solid and liquid food systems: a review. **Food Engineering Reviews**, v. 7, n. 2, p. 82 – 108, 2015.
138. TIMMERMAN, E., et al. Piezoelectric-driven plasma pen with multiple nozzles used as a medical device: Risk estimation and antimicrobial efficacy. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 54 (2), 2021.
139. TROY, D. J., et al. Sustainable and consumer-friendly emerging technologies for application within the meat industry: An overview. **Meat Science**, v. 120, p. 2 – 9, 2016.
140. UHM, H. S., et al. A microwave plasma torch and its applications. **Plasma Sources Science and Technologies**, v. 15, n. 2, p. 26 – 34, 2006.
141. ULBIN-FIGLEWICZ, N., et al. Effect of low-pressure cold plasma on surface microflora of meat and quality attributes. **Food Science and Technology**, v. 52, p. 1228 – 1232, 2013.
142. VLEUGELS, M., et al. Atmospheric plasma inactivation of biofilm-forming bacteria for food safety control. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 33 (2), p. 824 – 828, 2005.
143. WAN, J., et al. Advances in innovative processing technologies for microbial inactivation on enhancement of food safety – pulsed electric field and low-temperature plasma. **Trends in Food Science & Technology**, v. 20, p. 414 – 424, 2009.
144. WANG, J., et al. Application of plasma-activated water (PAW) for mitigating methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) on cooked chicken surface. **Food Science and Technology**, v. 137, 2021.
145. WELTMANN, K. D., et al. Antimicrobial treatment of heat sensitive products by miniaturized atmospheric pressure plasma jets (APPJs). *Journal of Physical Application Physics*, v. 41, n. 19, 2008.
146. WILLIAMS, P. F. Plasma processing of semiconductors. **Kluwer Academic Publishers**, Dordrecht, v. 336, 1997.
147. YADAV, B., et al. Cold plasma treatment of ready-to-eat ham: Influence of process conditions and storage on inactivation of *Listeria innocua*. **Food Research International**, v. 123, 2019.
148. YONG, H. I., et al. Flexible thin-layer plasma inactivation of bacteria and mold survival in beef jerky packaging and its effects on the meat's physicochemical properties. **Meat Science**, v. 123, p. 151 – 156, 2017.
149. YOO, J. H., et al. Synergistic bactericidal effect of clove oil and encapsulated atmospheric pressure plasma against *Escherichia coli* O157:H7 and *Staphylococcus aureus* and its mechanism of action. **Food Microbiology**, v. 93, 2021.

150. XU, L., et al. Microbial Inactivation and Quality Changes in Orange Juice Treated by High Voltage Atmospheric Cold Plasma. **Food Bioprocess Technology**, v. 10 (10), p. 1778 - 1791, 2017.
151. ZHANG, Y., et al. Bactericidal effect of cold plasma on microbiota of commercial fish balls. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 52, p. 394 – 405, 2019.
152. ZHUANG, H., et al. In-package air cold plasma treatment of chicken breast meat: treatment time effect. **Journal Food Quality**, p. 1 – 7, 2019.
153. ZHU, Z., et al. Recent insights for the green recovery of inulin from plant food materials using non-conventional extraction technologies: A review. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 33, p. 1 – 9, 2016.