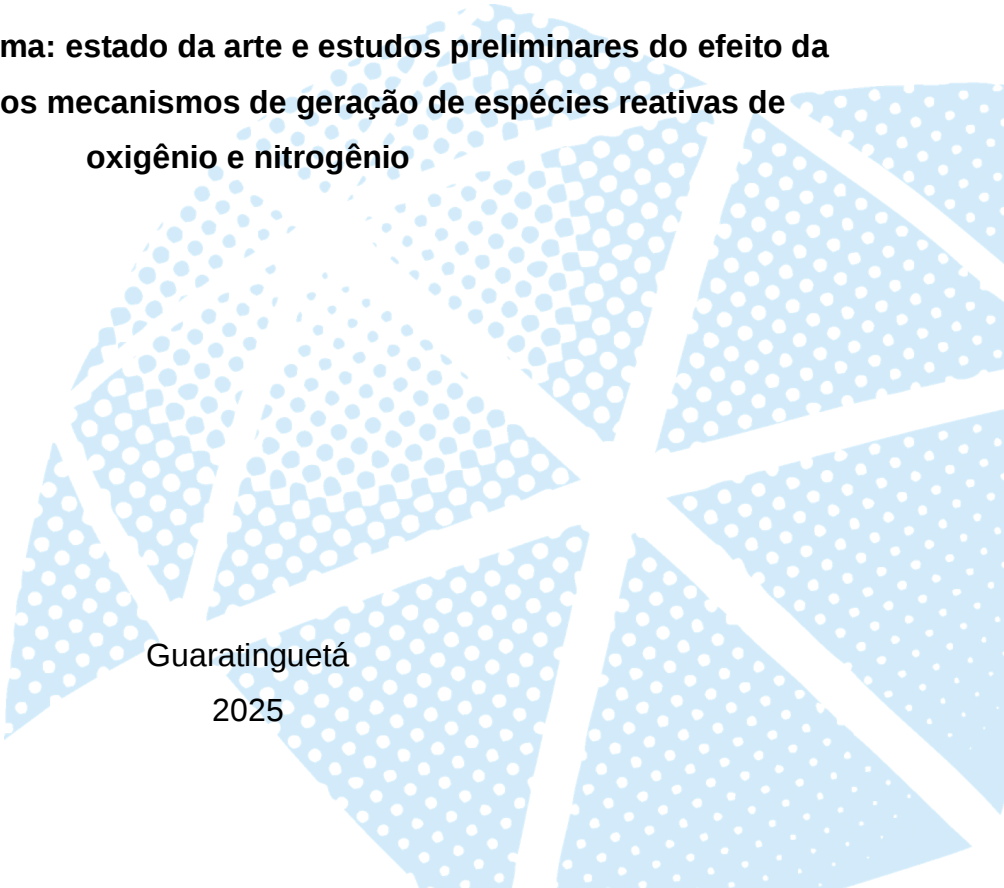


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

Vinícius de Souza Urquia

**Água ativada por plasma: estado da arte e estudos preliminares do efeito da
temperatura sobre os mecanismos de geração de espécies reativas de
oxigênio e nitrogênio**

Guaratinguetá
2025



Vinícius de Souza Urquia

Água ativada por plasma: estado da arte e estudos preliminares do efeito da temperatura sobre os mecanismos de geração de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Faculdade de
Engenharia e Ciências, Guaratinguetá,
para obtenção do título de Bacharel em
Física

Área de Concentração: Física Plasmas

Orientador(a): Prof. Dr. William Chiappim
Junior

Coorientador(a): MsC. Bruno Henrique da
Silva Leal

Guaratinguetá

2025

U79a	Urquia, Vinicius de Souza Água ativada por plasma: estado da arte e estudos preliminares do efeito da temperatura sobre os mecanismos de geração de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio / Vinicius de Souza Urquia - Guaratinguetá, 2025. 98 f : il. Bibliografia: f. 80-96 Trabalho de Graduação em Física (Bacharelado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientador: Prof. Dr. William Chiappim Junior Coorientador: MSc. Bruno Henrique da Silva Leal 1. Plasma de baixa temperatura. 2. Plasma (gases ionizados) 3. Ionização de gases. 4. Descargas elétricas. I. Título. CDU 530.145
------	---

VINÍCIUS DE SOUZA URQUIA

Água ativada por plasma: estado da arte e estudos preliminares do efeito da temperatura sobre os mecanismos de geração de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Campus de Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharel em Física.

Data da defesa: 08 / 08 / 2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ANA CARLA DE PAULA LEITE ALMEIDA
Data: 09/08/2025 07:27:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Ana Carla de Paula Leite Almeida

UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

Documento assinado digitalmente
 FELIPE VICENTE DE PAULA KODAIRA
Data: 11/08/2025 10:42:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Felipe Vicente de Paula Kodaira

UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

Documento assinado digitalmente
 WILLIAM CHIAPPIM JUNIOR
Data: 11/08/2025 10:58:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. William Chiappim Junior

UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais. Vindos de origens humildes, eles estudaram e trabalharam incansavelmente para oferecer aos filhos oportunidades que antes pareciam distantes. Graças ao seu apoio, pude seguir meu sonho de cursar física, algo que sempre desejei profundamente. Em nenhum momento contestaram essa decisão, apenas acreditaram em mim e me apoiaram em cada passo. Sem eles, nada do que conquistei seria possível. Meu pai, com sua honestidade e disciplina, e minha mãe, com sua bondade e resiliência, são pessoas raras nos dias de hoje. São exemplos que levarei comigo por toda a vida e que me mostraram, de forma silenciosa e constante, a mais verdadeira prova de amor incondicional.

Agradeço ao meu orientador, professor William, pela paciência, compreensão e orientação ao longo de toda a graduação. Foi meu professor em diferentes disciplinas, sempre transmitindo conhecimento de forma clara e acessível. Quando percebia algum comportamento estudantil desajustado, me guiava a melhor, com calma e atenção, cumprindo não apenas o papel de professor, mas também o de verdadeiro mentor. Esteve presente durante minha iniciação científica e, sobretudo, me acompanhou de perto em todo o processo do TCC, que passou por diversas dificuldades. Em todos os momentos, manteve-se disponível para ouvir, orientar e apoiar, demonstrando o que há de mais nobre na docência.

Agradeço também aos professores Ronaldo e Roberto, do Departamento de Química, que tornaram possível a realização deste trabalho. Em um momento de dificuldade experimental, procurei-os em busca de orientação, e ambos me acolheram de braços abertos. Conversamos, e juntos encontraram uma forma de contornar os problemas que eu enfrentava, sempre com boa vontade e um sorriso no rosto. Ajudaram sem me conhecer, sem pedir nada em troca, movidos apenas pelo compromisso com o conhecimento e pela generosidade de quem acredita na pesquisa e na colaboração científica.

Agradeço ainda ao professor Júlio, que sempre considerei uma fonte inesgotável de conhecimento. Desde a primeira aula, admirei sua capacidade única de transmitir conteúdos complexos com clareza e entusiasmo. Um professor exemplar, de domínio técnico admirável, cuja dedicação e brilho intelectual foram inspiração constante. Muitas vezes me pego lembrando de suas aulas e pensando em

tudo o que aprendi com ele. Por vezes, me pergunto “o que o professor Júlio faria ou diria nessa situação?”. Ele foi, e continuará sendo, um modelo para mim. Um dia, espero alcançar em minha própria trajetória o mesmo nível de excelência que ele demonstra como docente e como físico.

Ao professor Gustavo, que mesmo tendo pouco tempo na universidade, me ouviu com paciência, me encorajou a persistir e a acreditar em mim mesmo. Sempre disposto ao diálogo, esteve presente nos momentos em que mais precisei, especialmente nas etapas finais do curso. Desejo-lhe sucesso em sua trajetória pessoal e profissional, e que continue sendo a pessoa acolhedora e inspiradora que foi para mim.

Agradeço à minha namorada, Lara, que esteve ao meu lado em todos os momentos difíceis dessa jornada. Agradeço por ter compartilhado comigo as angústias, as incertezas e também as pequenas vitórias, oferecendo sempre apoio, carinho e presença. Sem ela, este caminho teria sido muito mais difícil.

Agradeço também a todas as pessoas que cruzaram meu caminho durante a graduação e que, de diferentes formas, contribuíram para minha formação, seja nos estudos, em momentos de descontração ou em conversas de desabafo. Cada uma delas fez parte dessa caminhada e ajudou a torná-la mais leve e significativa.

Por fim, registro meu agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica, que tornou possível o desenvolvimento da pesquisa realizada durante minha graduação e contribuiu de forma essencial para minha formação acadêmica.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos físicos e químicos da geração de plasma não térmico à pressão atmosférica, com foco na descarga com barreira dielétrica (DBD) e sua aplicação na ativação de água para a produção de água ativada por plasma (PAW). São abordados os principais mecanismos de formação e transporte de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), assim como as propriedades físico-químicas da PAW e suas aplicações em áreas como agricultura, medicina e indústria alimentícia. O estudo discute ainda os diferentes tipos de descargas elétricas, os regimes de operação da DBD, e os fatores que influenciam a composição química da água ativada. Embora o foco principal seja a revisão da literatura científica, o trabalho inclui uma seção de discussão experimental com dados obtidos preliminarmente durante a fase inicial do projeto. Devido à baixa reprodutibilidade e à elevada variabilidade entre as amostras, os resultados experimentais não permitiram conclusões firmes, mas são apresentados como suporte e complemento à discussão teórica, ilustrando alguns dos desafios práticos relacionados à ativação de água por plasma atmosférico.

Palavras-chave: descarga com barreira dielétrica; água ativada por plasma; plasma atmosférico; espécies reativas; revisão bibliográfica.

ABSTRACT

This work presents a bibliographic review on the physical and chemical fundamentals of non-thermal plasma generation at atmospheric pressure, with a particular focus on dielectric barrier discharge (DBD) and its application in water activation for the production of plasma-activated water (PAW). The main mechanisms of formation and transport of reactive oxygen and nitrogen species (RONS) are discussed, along with the physicochemical properties of PAW and its potential applications in fields such as agriculture, medicine, and the food industry. The study also examines different types of electrical discharges, operational regimes of DBD, and the factors that influence the chemical composition of activated water. Although the core of this work is based on a literature review, it includes an experimental discussion section presenting preliminary data collected during the early stages of the project. Due to low reproducibility and high variability among the samples, the experimental results did not allow for conclusive findings, but are presented as support and complement to the theoretical discussion, illustrating some of the practical challenges involved in plasma-based water activation at atmospheric pressure.

Keywords: dielectric barrier discharge; plasma-activated water; atmospheric plasma; reactive species; bibliographic review.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Estados físicos da matéria e a formação do plasma	19
Figura 2 — Variação das temperaturas dos elétrons (T_e) e do gás (T_g) em função da pressão.....	22
Figura 3 — Evolução de uma avalanche em um espaço entre o cátodo e o ânodo..	25
Figura 4 — Dispositivos educacionais baseados em descargas luminosas (glow discharges) desenvolvidos no Princeton Plasma Physics Laboratory.	26
Figura 5 — Descarga em arco entre dois eletrodos	28
Figura 6 — Descarga corona reator com eletrodos pino-malha.....	29
Figura 7 — Configurações geométricas e elétricas de reatores de descarga de barreira dielétrica (DBD)	31
Figura 8 — Fotografia de microdescargas	32
Figura 9 — Transição do regime de microdescargas em uma descarga de barreira dielétrica (DBD)	34
Figura 10 — Regimes de operação do plasma DBD.....	35
Figura 11 — Transição do regime filamentar para o regime difuso em descarga de barreira dielétrica (DBD).....	36
Figura 12 — Esquemas para tratamento de líquidos com base em DBD	37
Figura 13 — Número de publicações anuais relacionadas a água ou líquidos ativados a plasma.	40
Figura 14 — Mecanismos de transporte de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS) geradas na fase gasosa para uma solução.	45
Figura 15 — Ilustração geral da aplicação da PAW na medicina com plasma, agricultura inteligente e processamento de alimentos.....	52
Figura 16 — Mecanismo de ação antimicrobiana da PAW por meio de RONS e estresse oxidativo celular.	54
Figura 17 — Ação da PAW na germinação de sementes: ROS como sinalizadores e RNS como nutrientes.	58
Figura 18 — Aplicações da PAW nos setores alimentício e agrícola	63
Figura 19 — Representação esquemática do reator de descarga com barreira dielétrica (DBD)	67
Figura 20 — Variação do pH da água deionizada com o tempo de ativação por plasma a $\sim 25^\circ\text{C}$	69

Figura 21 — Concentração de espécies reativas em função do tempo de ativação da água a ~25 °C.....	70
Figura 22 — pH antes e depois da ativação para diferentes conjuntos de amostras de água ativada a plasma durante 15 minutos (água a ~50 °C).....	72
Figura 23 — Concentração de espécies reativas para diferentes conjuntos de amostras de água ativada a plasma durante 15 minutos (água a ~50 °C)	73
Figura 24 — Concentração de HNO ₂ para diferentes conjuntos de amostras de água ativada a plasma durante 15 minutos (água a ~50 °C).....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições físicas fundamentais para a existência do plasma.	23
Tabela 2 — Valores típicos de uma Descarga de Barreira dielétrica	37
Tabela 3 — Visão geral das interações plasma-líquido (espécies primárias e secundárias) durante a produção de PAW, ao utilizar ar atmosférico (nitrogênio e oxigênio) e água como moléculas originais.....	45
Tabela 4 — Configurações experimentais utilizadas nas ativações da água deionizada a 50 °C	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ag	Prata
Ag ⁺	Íon prata
Al ₃ O ₃	Alumina
ALD	Deposição por camada atômica
APGD	Descarga luminosa à pressão atmosférica
APTD	Descarga de Townsend à pressão atmosférica
Ar	Argônio
CVD	Deposição por vapor químico
CO ₂	Dióxido de carbono
DBD	Descarga com barreira dielétrica
DI	Deionizada
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
HNO ₂	Ácido nitroso
HNO ₃	Ácido nítrico
ETL	Plasma em equilíbrio termodinâmico local
MTT	Ensaio colorimétrico de viabilidade celular baseado na redução do sal de tetrazólio MTT (3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazólio)
N	Nitrogênio
N ₂	Nitrogênio molecular
NO	Monóxido de nitrogênio
NO ₂ ⁻	Nitrito
NO ₃ ⁻	Nitrato
NTP	Plasma não térmico
O	Oxigênio
O ₂	Oxigênio molecular
O ₃	Ozônio

$O_2^{\cdot-}$	Superóxido
$\cdot OH$	Radical hidroxila
$ONOO^-$	Peroxinitrito
$ONOOH$	Ácido peroxinitroso
ORP	Potencial de oxirredução
PAW	Água ativada por plasma
PAW-ALD	Deposição por camada atômica utilizando água ativada por plasma
PFAS	Substâncias perfluoroalquiladas e polifluoroalquiladas
PFFA	Plasma frio à pressão atmosférica
pH	Potencial de hidrogênio
PAL	Líquidos ativados por plasma (Plasma Activated Liquids)
RNS	Espécies reativas de nitrogênio
RONs	Espécies reativas de oxigênio e nitrogênio
ROS	Espécies reativas de oxigênio
TDS	Total de partículas dissolvidas
UV	Radiação ultravioleta
VIS	Radiação visível
VOC	Composto orgânico volátil

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ânodo
C	Cátodo
d	Distância entre eletrodos
E	Campo elétrico
e	Carga elementar
K_B	Constante de Boltzmann
L	Característica dimensional do plasma
n_e	Densidade numérica de elétrons
N_D	Número de partículas dentro da esfera de Debye
T_0	Temperatura de partículas neutras
T_e	Temperatura dos elétrons
V_d	Velocidade de deriva dos elétrons
λ_D	Comprimento de Debye
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo
ω_t	Produto da frequência de plasma pelo tempo médio entre colisões

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 INTRODUÇÃO AO PLASMA.....	19
2.1.1 Classificações do plasma	21
2.1.2 Condições para a formação de plasma	22
2.2 DESCARGAS ELÉTRICAS EM GASES	24
2.2.1 Descarga luminescente	26
2.2.2 Descarga em arco	27
2.2.3 Descarga do tipo corona	28
2.3 DESCARGA COM BARREIRA DIELÉTRICA (DBD).....	29
2.3.1 Formação do plasma na DBD	30
2.3.2 Papel da barreira dielétrica e sua importância:	31
2.3.3 Regime filamentar e difuso na DBD	33
2.3.4 O uso da DBD na ativação de água	36
2.4 LÍQUIDOS ATIVADOS A PLASMA	38
2.4.1 Água ativada a plasma.....	43
2.5 GERAÇÃO DE RONS DURANTE O PROCESSO DE ATIVAÇÃO.....	44
2.6 GERAÇÃO DE RONS DE VIDA LONGA	46
2.6.1 Formação de nitrito e nitrato.....	46
2.6.2 Formação de peróxido de hidrogênio	47
2.6.3 Formação de ozônio.....	49
2.7 PROPRIEDADES FÍSICAS DA PAW	49
2.8 APLICAÇÕES DA ÁGUA ATIVADA POR PLASMA.....	51
2.8.1 Ação antimicrobiana e mecanismos de inativação	52
2.8.1.1 Citotoxicidade em células eucarióticas.....	56
2.8.2 Aplicações da PAW na agricultura	57
2.8.3 Aplicações médicas da PAW.....	60
2.8.4 Aplicações na indústria alimentícia.....	61
2.8.5 Aplicações em nanotecnologia.....	64
2.9 OUTRAS APLICAÇÕES.....	65

3 DISCUSSÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS	66
3.1 APARATO EXPERIMENTAL.....	66
3.2 EFEITO DO TEMPO DE ATIVAÇÃO NA ÁGUA A TEMPERATURA AMBIENTE	68
3.2.1 Variação do pH com o tempo de ativação	68
3.2.2 Formação de espécies reativas com o tempo de ativação.....	69
3.3 EFEITO DA TEMPERATURA ELEVADA E OUTROS PARÂMETROS	70
3.3.1 Variação do pH a 50°C.....	71
3.3.2 Formação de espécies reativas a 50°C.....	72
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESAFIOS DE REPRODUTIBILIDADE.....	76
REFERÊNCIAS	80
APÊNDICE A – TABELAS MENCIONADAS NA SEÇÃO DE DISCUSSÃO EXPERIMENTAL.....	97

1 INTRODUÇÃO

A física de plasmas constitui uma das áreas mais promissoras da ciência contemporânea, com potencial de impacto em múltiplos setores da sociedade. Definido como um gás parcialmente ou totalmente ionizado, composto por elétrons, íons, espécies neutras e fótons, que coexistem e interagem de maneira coletiva. Essa composição confere ao plasma propriedades singulares, como elevada condutividade elétrica e capacidade de desencadear reações químicas altamente energéticas, que sustentam sua relevância científica e tecnológica.

Ao longo do século XX, os estudos em física de plasmas avançaram em duas grandes frentes: uma centrada nos plasmas térmicos de alta temperatura, com aplicações que incluem, mas não se limitam à fusão nuclear controlada, síntese de materiais, tratamento de resíduos, corte e soldagem industriais; e outra focada nos plasmas frios ou não térmicos, que podem ser gerados à pressão atmosférica e operam em temperaturas próximas às ambientes. Enquanto a primeira vertente é impulsionada por desafios energéticos e industriais em escalas elevadas, a segunda tem se consolidado como alternativa tecnológica de grande versatilidade nas ciências biomédicas, ambiental e agrícola.

Entre os diversos tipos de plasma, o plasma frio à pressão atmosférica (PFPA) tem se destacado por sua capacidade de operar em temperaturas próximas à ambiente, evitando danos térmicos a materiais sensíveis, tecidos biológicos e soluções aquosas. Essa característica torna o PFPA particularmente atraente para processos em que o contato direto com superfícies ou líquidos é indispensável. Nas últimas duas décadas, o interesse científico pelo PFPA cresceu exponencialmente, acompanhado por um aumento significativo no número de publicações sobre o tema.

Uma aplicação emergente e de grande relevância é a ativação de líquidos por plasma, com destaque para a chamada água ativada por plasma (Plasma-Activated Water – PAW). A PAW é caracterizada pela incorporação de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (Reactive Oxygen and Nitrogen Species – RONS), tais como peróxido de hidrogênio (H_2O_2), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), ozônio (O_3), radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) e ácido nítrico (HNO_3). A presença e a interação dessas espécies reativas, juntamente com alterações no pH e no potencial redox da solução, são

responsáveis pelas propriedades antimicrobianas, bioestimulantes e oxidativas observadas na PAW, resultando em um meio multifuncional de interesse crescente em diversos campos de aplicação.

Na agricultura, a PAW vem sendo estudada como agente promotor da germinação de sementes, auxiliando inclusive na quebra de dormência, além de favorecer o crescimento inicial das plantas e contribuir para o controle de patógenos. Esses efeitos podem reduzir a dependência de fertilizantes químicos e favorecer práticas mais sustentáveis. Na área biomédica, suas propriedades antimicrobianas têm sido investigadas em processos de cicatrização, esterilização de materiais e também em estudos experimentais voltados ao tratamento de câncer. Já na indústria de alimentos, a PAW surge como uma alternativa inovadora para a descontaminação de frutas, vegetais e superfícies de processamento, oferecendo maior segurança sem comprometer características sensoriais.

Do ponto de vista técnico, a geração de PAW pode ser realizada por diferentes tipos de descarga elétrica, mas a descarga com barreira dielétrica (Dielectric Barrier Discharge – DBD) se consolidou como uma das técnicas mais utilizadas. A DBD permite a formação de plasma frio em condições atmosféricas, apresentando relativa simplicidade experimental e boa reprodutibilidade. Além disso, a configuração dos eletrodos e a escolha dos parâmetros de operação oferecem flexibilidade para controlar a intensidade da descarga, a densidade de espécies geradas e a interação do plasma com o meio líquido.

Apesar desses avanços, a compreensão e aplicação da PAW ainda enfrentam desafios significativos. Entre eles destacam-se a necessidade de esclarecer os mecanismos de formação e transporte das espécies reativas entre as fases gasosa, líquida e a interface plasma-líquido, o desenvolvimento de métodos analíticos capazes de identificar espécies de vida curta e longa, e a elaboração de modelos que descrevam com maior precisão as reações químicas envolvidas. Além disso, a curta vida útil da PAW impõe limitações práticas ao seu armazenamento e uso. Além disso, fatores operacionais como composição inicial da água, geometria do reator e condições ambientais introduzem grande variabilidade nos resultados. Entre esses fatores, a influência da temperatura merece destaque, já que, embora reconhecida como importante, ainda é pouco estudada.

A temperatura exerce múltiplos papéis no processo de ativação: influencia a solubilização de gases como oxigênio e nitrogênio, afeta a taxa de evaporação da água, altera a cinética de reações químicas em solução e pode modificar a estabilidade da própria descarga elétrica. Estudos indicam que temperaturas elevadas tendem a alterar o balanço entre espécies oxidantes e redutoras, afetando especialmente a produção de H_2O_2 e nitrato. No entanto, a literatura ainda carece de consenso quanto a esses efeitos, e os resultados preliminares obtidos neste trabalho evidenciam contradições em relação a parte das tendências descritas por outros autores. Essa lacuna científica reforça a importância de trabalhos dedicados a investigar a relação entre temperatura e geração de espécies reativas em PAW.

É nesse contexto que se insere o presente trabalho. Seu objetivo principal é realizar uma revisão bibliográfica aprofundada sobre os fundamentos físicos e químicos da geração de plasma não térmico por DBD e suas aplicações na ativação de água. São discutidos os mecanismos de formação e transporte de RONS, os fatores que influenciam sua geração, bem como as propriedades e aplicações da PAW em diferentes contextos.

Além da revisão, o trabalho inclui uma seção experimental de caráter preliminar, conduzida como parte inicial do projeto de pesquisa. Nessa etapa, investigou-se a influência da temperatura na geração de espécies reativas, por meio da análise de parâmetros como pH, perda de massa da amostra e concentrações de NO_2^- , NO_3^- , O_3 e H_2O_2 . Apesar da alta variabilidade entre amostras submetidas a condições semelhantes, que limita a obtenção de conclusões quantitativas robustas, os experimentos fornecem tendências relevantes. Essas tendências são discutidas à luz da literatura científica atual, permitindo relacionar observações experimentais com hipóteses já propostas por outros autores.

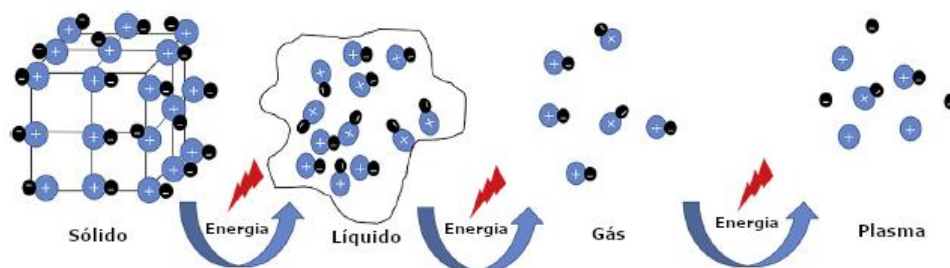
Com isso, espera-se avançar na compreensão dos mecanismos que regem a geração de espécies reativas na PAW e fornecer subsídios para o desenvolvimento futuro de aplicações mais seguras, eficazes e reproduzíveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO AO PLASMA

Apesar de ser frequentemente descrito como o quarto estado da matéria, o plasma é, na verdade, um gás parcialmente ou totalmente ionizado com comportamento próprio, que não se encaixa completamente na classificação tradicional dos estados sólido, líquido ou gasoso (Veja Figura 1). Sua distinção reside na sua natureza ionizada, onde uma parcela significativa de seus átomos ou moléculas perdeu ou ganhou elétrons, resultando na formação de íons e elétrons livres. Essa ionização confere ao plasma propriedades únicas, especialmente sua alta condutividade elétrica e forte interação com campos eletromagnéticos. A transição da matéria para a fase plasmática ocorre tipicamente sob condições de alta energia, como temperaturas elevadas, onde a energia cinética das partículas é suficiente para superar as forças de ligação atômicas e moleculares, liberando elétrons e criando um ambiente de partículas carregadas (BITTENCOURT, 1986; FRIDMAN, 2012).

Figura 1 — Estados físicos da matéria e a formação do plasma



Fonte: Adaptado de Liao *et al*, 2017.

O termo plasma foi cunhado em 1928 por Irving Langmuir, um físico e químico americano, que observou a semelhança entre o comportamento do gás ionizado e o plasma sanguíneo, devido à sua natureza multicomponente e fortemente interativa (FRIDMAN, 2012; TONKS; LANGMUIR, 1929). Desde então, o estudo do plasma tem se expandido, revelando sua presença abundante no universo e seu potencial em diversas aplicações tecnológicas.

A característica mais distintiva do plasma é a presença de cargas elétricas livres, elétrons e íons que o tornam um excelente condutor elétrico, por vezes superando a condutividade de metais como ouro e cobre. Essa condutividade não apenas permite que o plasma interaja fortemente com campos eletromagnéticos, mas

também o torna internamente interativo, com as partículas carregadas influenciando o movimento umas das outras (FRIDMAN, 2012; GOLDSTON; RUTHERFORD, 1995).

Embora composto por partículas carregadas, o plasma é considerado macroscopicamente neutro. Isso significa que a densidade de elétrons é equilibrada pela densidade de íons positivos, resultando em uma carga líquida total próxima de zero. Essa quase-neutralidade é uma condição fundamental para que um gás ionizado seja classificado como plasma, garantindo que suas propriedades elétricas e seu comportamento sejam significativamente influenciados pela presença dessas partículas carregadas (CHEN, 1984; FRIDMAN, 2012).

Outro conceito importante é a bainha de plasma (*plasma sheath*), uma região de transição que se forma entre o plasma e suas fronteiras, que podem ser superfícies sólidas (como as paredes de um recipiente ou sondas), interfaces com líquidos ou até mesmo limites gasosos gases, dependendo das condições do sistema. As propriedades dessa zona diferem significativamente das do restante do plasma, uma vez que as partículas carregadas presentes na bainha atuam como uma espécie de tela elétrica, protegendo o plasma das influências externas da fronteira (FRIDMAN, 2012; K -U RIEMANN, 1991; LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005).

É importante destacar que o plasma é o estado mais abundante da matéria visível no universo, estimado em mais de 99% de sua composição. Fenômenos naturais como a coroa solar, o vento solar, as nebulosas e a ionosfera terrestre são exemplos de plasmas. Na Terra, o relâmpago é a manifestação mais conhecida de plasma natural (CHEN, 1984; FRIDMAN, 2012).

Além de sua vasta ocorrência natural, o plasma pode ser gerado e controlado em laboratório e na indústria, o que abre caminho para inúmeras aplicações tecnológicas. Desde a fusão termonuclear controlada, que busca replicar os processos energéticos das estrelas, até tecnologias presentes em nosso cotidiano, como eletrônicos, *lasers*, lâmpadas fluorescentes e televisores de plasma, a aplicação do plasma é vasta e crescente. Grande parte do *hardware* de computadores e telefones celulares, por exemplo, é fabricada utilizando tecnologias baseadas em plasma (DEEPAK, 2024; FRIDMAN, 2012; LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005)

As aplicações do plasma em química e disciplinas correlatas são particularmente notáveis devido a três características principais: (1) a capacidade de atingir temperaturas e densidades de energia significativamente maiores do que as

tecnologias químicas convencionais; (2) a produção de altas concentrações de espécies energéticas e quimicamente ativas, como elétrons, íons, átomos, radicais, estados excitados e fótons de diferentes comprimentos de onda; e (3) a possibilidade de operar em condições de não-equilíbrio termodinâmico, o que permite manter altas concentrações de espécies quimicamente ativas enquanto a temperatura do gás permanece próxima à temperatura ambiente. Essas características possibilitam a intensificação de processos químicos tradicionais, o aumento da eficiência e a estimulação de reações que seriam inviáveis por métodos convencionais (BOGAERTS et al., 2020; FRIDMAN, 2012).

2.1.1 Classificações do plasma

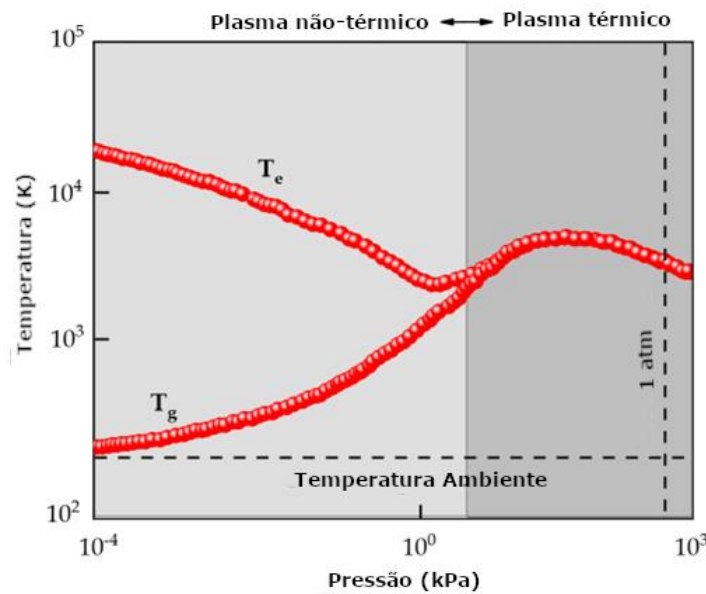
Os plasmas podem ser classificados de diversas maneiras, sendo as mais comuns baseadas em seu grau de ionização e em seu estado de equilíbrio termodinâmico. O grau de ionização refere-se à proporção de partículas carregadas em relação às partículas neutras presentes no plasma (CHEN, 1984; KOGA-ITO et al., 2022)

Quando o grau de ionização é baixo, ou seja, a maioria das partículas ainda é neutra, o plasma é denominado plasma fracamente ionizado ou parcialmente ionizado. Essa é uma condição comum em muitas aplicações de química de plasma, onde o grau de ionização pode variar de 10^{-7} a 10^{-4} , ou seja, apenas de uma em dez milhões até uma em dez mil partículas está ionizada. Em contraste, quando o grau de ionização se aproxima de um indicando que quase todas as partículas estão ionizadas, o plasma é chamado de plasma completamente ionizado. Plasmas completamente ionizados são típicos de sistemas de fusão termonuclear, como tokamaks e *stellarators* (reatores usados em pesquisas de fusão nuclear), e são frequentemente referidos como plasmas quentes (BITTENCOURT, 1986; FRIDMAN, 2012).

Outra classificação fundamental distingue os plasmas com base em seu equilíbrio termodinâmico (Veja figura 2 abaixo). Em um plasma térmico, ou plasma em equilíbrio termodinâmico local (ETL), as temperaturas de todas as espécies presentes (elétrons, íons e partículas neutras) são aproximadamente iguais. Nesses plasmas, os processos de ionização e as reações químicas são predominantemente determinados pela temperatura. Exemplos naturais incluem o plasma solar e, em

aplicações artificiais, as descargas em arco obtidas em pressão atmosférica, que são caracterizadas por alta condutividade e elevadas temperaturas do gás (BOGAERTS et al., 2020; CHEN, 1984; FRIDMAN, 2012; KOGA-ITO et al., 2022; LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005; TENDERO et al., 2006).

Figura 2 — Variação das temperaturas dos elétrons (T_e) e do gás (T_g) em função da pressão



Fonte: Adaptado de Chiappim et al, 2022.

Legenda: Distinguindo plasmas térmicos e não-térmicos

Por outro lado, um plasma não-térmico opera longe do equilíbrio termodinâmico. Nesses plasmas, a temperatura dos elétrons é significativamente maior do que a temperatura dos íons e das partículas neutras ($T_e \gg T_0$). Essa diferença de temperatura permite que os processos de ionização e as reações químicas sejam diretamente influenciados pela temperatura eletrônica, tornando-os menos sensíveis à temperatura global do gás. Plasmas não-térmicos são geralmente gerados sob condições de baixa pressão, baixos níveis de potência ou em sistemas de descarga pulsada. A aurora boreal é um exemplo natural de plasma não-térmico. Embora menos potentes que os plasmas térmicos, os plasmas não-térmicos são frequentemente mais seletivos em suas aplicações (KOGA-ITO et al., 2022).

2.1.2 Condições para a formação de plasma

Para que um gás ionizado seja rigorosamente classificado como plasma, ele deve satisfazer condições que garantam seu comportamento coletivo, no qual o movimento das partículas carregadas não pode mais ser descrito de forma independente, mas sim como resultado da ação conjunta dos campos elétricos e magnéticos gerados pelo próprio conjunto de partículas. É esse caráter coletivo que dá origem às propriedades típicas do plasma, como a blindagem eletrostática e as oscilações coletivas de carga (Veja tabela 1).

Tabela 1 – Condições físicas fundamentais para a existência do plasma.

Significado Físico	Representação Matemática
As dimensões espaciais características do plasma (L) deve ser muito maior do que o Comprimento de <i>Debye</i> (λ_D)	$L \gg \lambda_D$
O número de partículas dentro da esfera de <i>Debye</i> (N_D) deve ser muito grande, de modo a garantir o comportamento coletivo presente no plasma.	$N_D \gg 1$
O tempo médio entre colisões e o tempo característico de oscilação dos elétrons do plasma, quando o gás se comporta como um fluido, deve ser muito curto.	$\omega_\tau \gg 1$

Fonte: Koga-ito *et al.*, 2022

Entre os critérios fundamentais destaca-se o comprimento de *Debye* (λ_D), que define a distância dentro da qual o campo elétrico de uma partícula carregada é efetivamente blindado pela redistribuição de outras partículas de carga oposta no plasma. Em outras palavras, a influência eletrostática de uma carga é perceptível apenas até λ_D , além desse limite, tal influência torna-se desprezível devido à ação conjunta das partículas do sistema (CHEN, 1984; ESZTERMANN; LÖWEN, 2004; KOGA-ITO *et al.*, 2022). A expressão matemática para o Comprimento de *Debye* é dada por:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}} \quad (1)$$

Onde:

ϵ_0 é a permissividade do vácuo;

K_B é a constante de Boltzmann;

T_e é a temperatura dos elétrons;

n_e é a densidade numérica dos elétrons;

e é a carga elementar.

Compreendidos os critérios que definem o comportamento coletivo de um plasma, torna-se relevante investigar os mecanismos físicos que possibilitam sua geração.

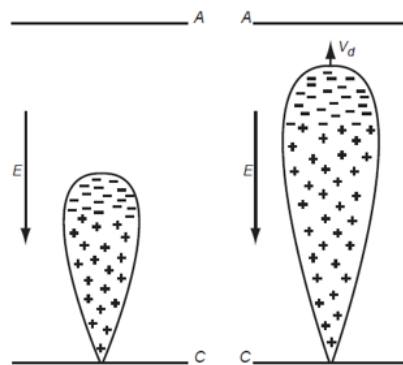
2.2 DESCARGAS ELÉTRICAS EM GASES

O termo descarga elétrica é referente a passagem de corrente elétrica através de um meio a princípio não condutor (KOGA-ITO et al., 2022). Ao expandir a ideia de descarga elétrica ao meio gasoso, a mesma pode ser entendida como um fluxo de corrente elétrica que se propaga através de um gás ionizado, e a qualquer processo de ionização do gás através do campo elétrico aplicado.

Considerando dois eletrodos metálicos (ânodo e cátodo) separados por um espaço preenchido com gás. Devido a radiação ultravioleta, raios cósmicos, e à radiação proveniente do interior da terra, há sempre uma pequena quantidade de partículas carregadas no ar. Por exemplo, existem aproximadamente cerca de 1000 íons positivos e negativos por centímetro cúbico na atmosfera. No entanto, até um determinado valor crítico do campo elétrico aplicado, o ar atmosférico ainda se comporta como um bom isolante elétrico, apesar da presença dessas partículas no meio. Isso ocorre porque as partículas carregadas presentes no gás, mesmo quando aceleradas pelo campo elétrico aplicado, não adquirem energia suficiente para ionizar os átomos em eventuais colisões. Como resultado, a taxa de ionização permanece inferior à taxa de produção e recombinação das partículas carregadas, estabelecendo um equilíbrio dinâmico que impede a formação e sustentação de uma descarga elétrica. Entretanto, ultrapassando ligeiramente esse limite, os elétrons livres

presentes no gás ganham energia suficiente para ionizar átomos e moléculas no processo colisional. As colisões originam novos elétrons e íons, que são novamente acelerados pelo campo entre os eletrodos, resultando em novas colisões e novas excitações. Esse ciclo é repetido sequencialmente resultando em um efeito cascata de multiplicação de cargas que é chamado de avalanche de elétrons (representado na figura 3), responsável pelo surgimento de descargas elétricas auto-sustentáveis no meio gasoso. Neste momento, que ocorre numa fração de segundo, o meio inicialmente isolante sofre uma transição abrupta para um estado condutor, possibilitando a formação de descargas elétricas observáveis. Esse fenômeno é denominado ruptura dielétrica do gás. É importante ressaltar que a pressão altera o mecanismo de geração de ruptura elétrica (B.H. CRICHTON, 1996; BOGAERTS et al., 2002; FRIDMAN, 2012; XIAO, 2016; RAIZER, 1991).

Figura 3 — Evolução de uma avalanche em um espaço entre o cátodo e o ânodo.



Fonte: Fridman, 2012.

Legenda: A = ânodo, C = cátodo, E = campo elétrico, V_d = velocidade de deriva dos elétrons

Por outro lado, nem todas as descargas elétricas apresentam esse caráter autossustentável. Existem situações em que a condução elétrica no gás depende da presença contínua de um agente ionizante externo ou de um mecanismo específico de emissão de partículas carregadas (como elétrons ou íons). Nessas condições, as descargas elétricas são classificadas como não-autossustentáveis, uma vez que cessam assim que a fonte ionizante é removida (BECKER, 2005; LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005; RAIZER, 1991).

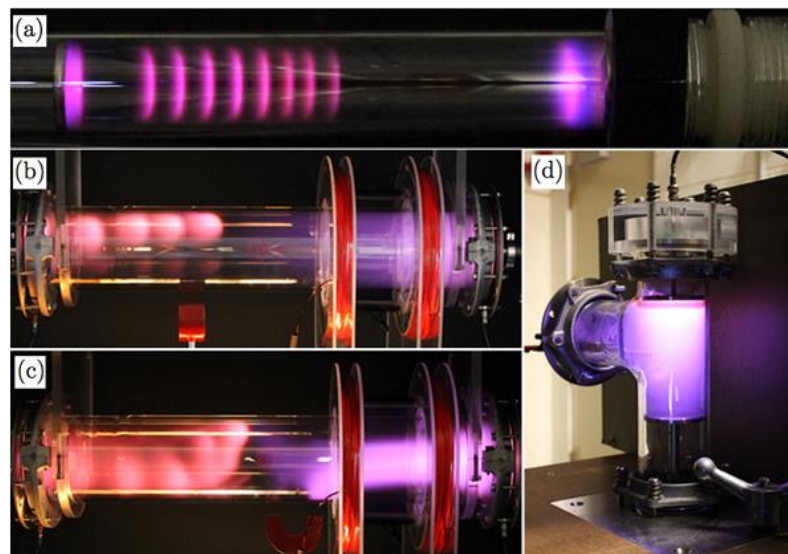
As descargas elétricas resultantes da ruptura dielétrica podem se manifestar de diferentes formas, dependendo das condições do meio e da intensidade da corrente elétrica. Enquanto algumas descargas, como a descarga em arco,

ocorrem sob correntes elevadas e resultam em um plasma de alta temperatura e brilho intenso, outras se estabelecem em regimes mais controlados. A descarga luminescente (ou descarga *glow*), por exemplo, se caracteriza pela emissão uniforme de luz e ocorre em baixa corrente. Além disso, em situações em que o campo elétrico é altamente não uniforme, como em eletrodos do tipo agulha, a ionização do gás pode ocorrer apenas em regiões localizadas, sem que haja uma ruptura dielétrica completa do meio. Esse fenômeno dá origem à descarga corona (FRIDMAN, 2012; RAIZER, 1991).

2.2.1 Descarga luminescente

Quando a pressão do gás é baixa e a potência elétrica limitada devido à alta impedância no circuito, o aumento da tensão aplicada até um certo limiar provoca um súbito crescimento na corrente. Nesse instante, um brilho característico surge, ocupando a maior parte do espaço entre os eletrodos, originando a chamada descarga luminescente (*glow discharge*), como representado na Figura 4. Esse tipo de descarga é uma das mais relevantes em regime de baixa pressão, amplamente utilizada em aplicações como deposição de filmes finos, sputtering e em lâmpadas fluorescentes (BOGAERTS, 1999; CHAPMAN; VOSSEN, 1981; FRIDMAN, 2012; XIAO, 2016).

Figura 4 — Dispositivos educacionais baseados em descargas luminosas (glow discharges) desenvolvidos no Princeton Plasma Physics Laboratory.



Fonte: Wissel et al, 2012.

2.2.2 Descarga em arco

A descarga em arco ocorre em gases sob pressões relativamente altas, próximas à pressão atmosférica, e se caracteriza pela formação de uma coluna brilhante e altamente condutiva como representado na Figura 5. Esse fenômeno surge após a ruptura dielétrica do gás, quando os elétrons e íons no meio são continuamente acelerados pelo campo elétrico, promovendo sucessivas ionizações e sustentando a descarga. Esse processo resulta em um plasma em equilíbrio termodinâmico, no qual os elétrons e as partículas neutras atingem temperaturas semelhantes, da ordem de 10^4 eV. Além disso, a densidade de ionização nesse regime varia entre 10^{-3} — 10^{-1} , tornando o meio altamente condutor.

A descarga em arco se distingue de outros tipos de descarga por sua intensa emissão luminosa e pela elevada densidade de corrente elétrica transportada pelo plasma. A grande quantidade de energia térmica liberada a temperaturas extremamente altas pode causar a degradação de materiais próximos, devido ao intenso aquecimento do meio. Devido a essas características, a descarga em arco é considerada um dos principais exemplos de plasma térmico (BOULOS; FAUCHAIS; PFENDER, 1994; FRIDMAN, 2012; RAIZER, 1991).

Figura 5 — Descarga em arco entre dois eletrodos



Fonte: Kusano *et al*, 2013.

Legenda: descarga caracterizada por intensa emissão de luz e alta temperatura.

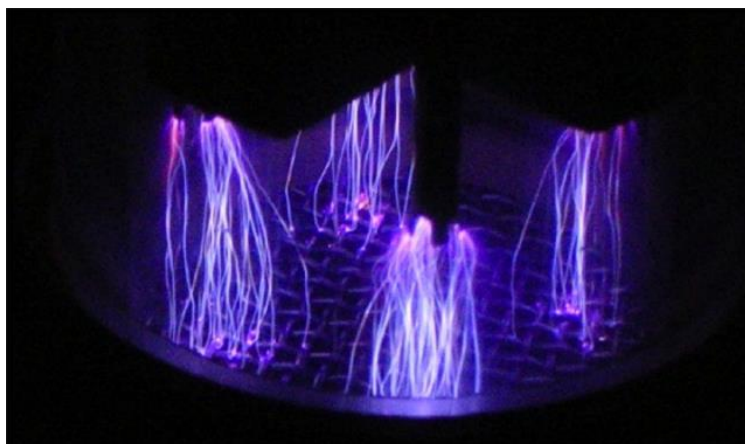
2.2.3 Descarga do tipo corona

A descarga corona é um tipo de descarga não térmica que ocorre em altas pressões, incluindo a pressão atmosférica, e se manifesta em regiões onde o campo elétrico é intenso e não uniforme, mas ainda insuficiente para causar a ruptura completa do meio gasoso entre os eletrodos, como exemplificado na Figura 6.

Esse fenômeno acontece quando o campo elétrico próximo a um ou ambos os eletrodos são significativamente mais fortes do que no restante do gás, o que geralmente ocorre ao redor de pontos afiados, bordas ou fios de pequeno diâmetro submetidos a uma tensão suficientemente alta. Nessas condições, o gás ao redor desses eletrodos pode ser parcialmente ionizado, formando um plasma de baixa potência cuja intensidade é limitada pelo limiar de ruptura dielétrica do meio (GEORGE *et al.*, 2021).

A descarga do tipo corona pode ser considerada um exemplo principal de uma fonte de plasma não térmica a pressão atmosférica (FRIDMAN, 2012).

Figura 6 — Descarga corona reator com eletrodos pino-malha



Fonte: RAMKUMAR, M. C. et al. *Polymer coatings for biocompatibility and reduced nonspecific adsorption*. In: *Functionalized Cardiovascular Stents*. Amsterdam: Elsevier, 2018. p. 166

2.3 DESCARGA COM BARREIRA DIELÉTRICA (DBD)

A descarga com barreira dielétrica é um tipo de descarga elétrica não térmica que ocorre entre eletrodos separados por um material dielétrico, tipicamente em pressão atmosférica (KOGELSCHATZ et al., 1997).

Historicamente, a DBD foi introduzida em 1857 por Werner Von Siemens, que propôs sua utilização para geração de ozônio. Em seu artigo, relata-se que isso seria possível ao submeter oxigênio ou ar atmosférico a uma descarga com barreira dielétrica mantida em um espaço anular entre dois tubos de vidro coaxiais, por meio de um campo elétrico alternado de amplitude suficiente. Essa invenção levou à produção industrial em larga escala de ozônio para o tratamento de água potável por volta de 1900 na Europa, sendo esta sua primeira aplicação registrada (KOGELSCHATZ et al., 1997; SUBEDI; JOSHI; WONG, 2017).

Nos últimos anos, a DBD tem sido amplamente estudada devido ao seu potencial de aplicação em diferentes áreas. Essa versatilidade se deve à sua capacidade de gerar plasma altamente reativo em temperatura próxima à ambiente, com baixo consumo energético, utilizando reatores de construção relativamente simples que podem operar em pressão atmosférica. Entre suas aplicações destacam-se o processamento e tratamento de superfícies, a geração de ozônio, a decomposição de poluentes gasosos como sulfeto de hidrogênio (H_2S) e compostos orgânicos voláteis (VOCs), a utilização em lâmpadas de dióxido de carbono (CO_2) e

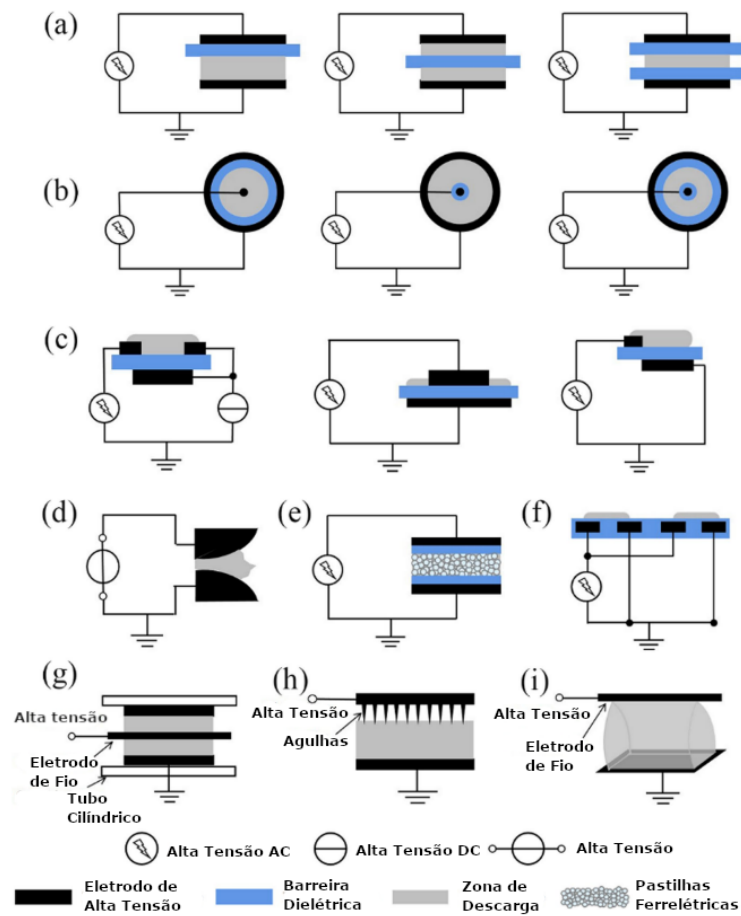
de excímeros, painéis de plasma, tratamento de efluentes, deposição por vapor químico (CVD) e o tratamento de líquidos, entre outras (BRANDENBURG, 2017; FRIDMAN, 2012; KOGELSCHATZ et al., 1997; SUBEDI; JOSHI; WONG, 2017).

2.3.1 Formação do plasma na DBD

A formação do plasma em um reator de descarga com barreira dielétrica segue os mesmos princípios das descargas elétricas em gases: os elétrons livres presentes no meio são acelerados pelo campo elétrico, promovendo ionizações sucessivas até a ruptura do gás de trabalho. A inserção de uma ou mais camadas dielétricas entre os eletrodos modifica esse processo, limitando a corrente e extinguindo rapidamente as microdescargas, o que garante que a descarga se mantenha no regime não térmico. Esse tipo de descarga é também denominado descarga silenciosa, descarga ozonizante, entre outros nomes (FELIX; KLUTE, 2019; MASTANAIAH, 2013).

Os reatores de DBD possuem uma grande flexibilidade com respeito a sua forma geométrica. Podendo funcionar em regime aberto ou fechado utilizando diferentes gases (KOGELSCHATZ et al., 1997). Os eletrodos podem ser dispostos em geometria plana ou cilíndrica, como mostra a figura 7.

Figura 7 — Configurações geométricas e elétricas de reatores de descarga de barreira dielétrica (DBD)



Fonte: Adaptado de He *et al*, 2023.

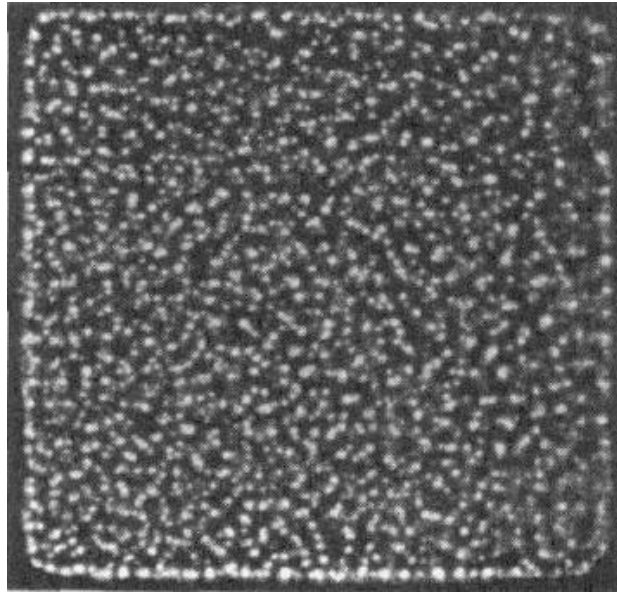
Legenda: (a) Reator DBD planar, (b) Reator DBD cilíndrico, (c) Reator de descarga de superficial, (d) Reator de descarga por arco deslizante, (e) Reator de leito fixo com pastilhas ferrelétricas, (f) Reator de descarga coplanar, (g) Reator com configuração fio-cilindro, (h) Reator com configuração agulha-placa, (i) Reator com configuração fio-placa.

2.3.2 Papel da barreira dielétrica e sua importância:

Devido à diferença de potencial aplicada entre os eletrodos, cargas elétricas tendem a se acumular na superfície do dielétrico. A ruptura dielétrica do ar tem início à medida que essas cargas se distribuem em pontos específicos da superfície, levando à formação de microdescargas – canais finos e condutivos de plasma, com diâmetro da ordem de 10^{-4}m e duração de alguns nanossegundos (Ver figura 8) (KOGELSCHATZ *et al.*, 1997). Como a tensão aplicada é elevada, esses microfilamentos de plasma surgem aleatoriamente em diferentes regiões da superfície do dielétrico, distribuindo a descarga de forma quase uniforme ao longo de todo o

volume entre os eletrodos. Esse comportamento contrasta com a descarga em arco, na qual a energia se concentra em um volume extremamente restrito, resultando em temperaturas elevadas que podem causar danos térmicos ao reator e comprometer sua integridade estrutural (DOS SANTOS et al., 2007; KOSTOV et al., 2010; NERETTI et al., 2017).

Figura 8 — Fotografia de microdescargas



Fonte: Kogelschatz, 2003.

Legenda: microdescargas em um gap de ar de 1 mm, fotografada através de um eletrodo transparente.

O campo produzido entre os eletrodos leva a polarização das cargas superficiais do material dielétrico, que, por sua vez induzem um campo elétrico próprio oposto, reduzindo assim, o campo total, e extinguindo a descarga. Esse mecanismo impede que a DBD opere em corrente contínua. A descarga pode ser iniciada por uma fonte de alta tensão senoidal ou pulsada, que permite que todo esse processo se repita a cada meio ciclo do pulso de tensão aplicada entre os eletrodos, gerando de forma macroscópica, na superfície do material isolante, o plasma DBD (SALGE, 1996; TENDERO et al., 2006) Os materiais mais comumente utilizados para a barreira dielétrica são polímeros, vidros, vidros de sílica, materiais cerâmicos, além de camadas finas de esmalte.

Além disso, o dielétrico restringe o fluxo de corrente no sistema, garantindo que a descarga permaneça em um regime não térmico, prevenindo a formação de descargas corona ou arco, mantendo a temperatura do plasma gerado próximo a temperatura ambiente, o que é essencial para aplicações sensíveis ao calor, como o

tratamento de superfícies e processos biomédicos. No que se refere à ativação de líquidos, mais especificamente, água, estudos recentes demonstram que a DBD gera espécies reativas sem elevar significativamente a temperatura do meio líquido o que, por sua vez, resulta em uma taxa de evaporação bastante reduzida durante o processo. Essa característica é especialmente relevante em aplicações que demandam a preservação do volume e da concentração da solução tratada, e foi também corroborada nos experimentos preliminares realizados neste trabalho, nos quais se observou que, mesmo após períodos de ativação de até 15 minutos, a perda de volume por evaporação permaneceu desprezível. (BOGAERTS et al., 2002; BRANDENBURG, 2017; DOS SANTOS et al., 2007; KOGELSCHATZ, 2003; KOGELSCHATZ et al., 1997).

As características químicas das descargas de plasma não térmico são definidas pelas interações entre elétrons e os diversos componentes do gás de trabalho. Tanto em condições de pressão atmosférica quanto em baixa pressão, as reações químicas são iniciadas principalmente pelas colisões de elétrons com moléculas de oxigênio e nitrogênio. Essas interações resultam na formação de oxigênio atômico, oxigênio em estado metastável e nitrogênio molecular, que podem sofrer novas reações, gerando uma combinação de espécies neutras, iônicas ou excitadas (GAUNT; BEGGS; GEORGHIOU, 2006; KAUSHIK et al., 2018).

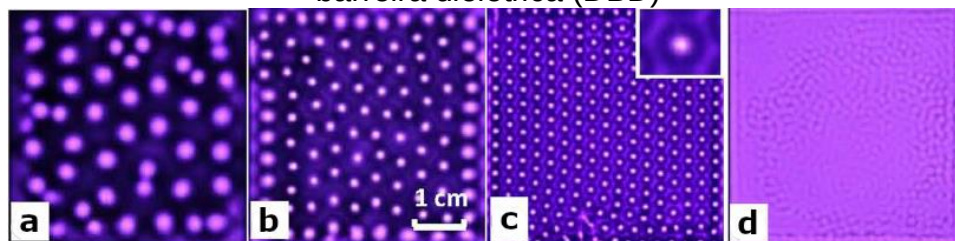
2.3.3 Regime filamentar e difuso na DBD

A DBD pode operar em dois regimes: filamentar ou difuso. O plasma em regime filamentar surge no momento que a tensão de ruptura à pressão atmosférica é alcançada, resultando em um grande número de microdescargas, ou *streamers*, que se distribuem na superfície do dielétrico. O número de microdescargas é proporcional à tensão aplicada ao sistema e caracterizam a descarga DBD como uma descarga autossustentada devido a ocorrência do fenômeno de avalanche de elétrons, que rapidamente torna o plasma autossuficiente para a geração de espécies e portadores de carga (KOGELSCHATZ, 2003; XU, 2001; YUAN et al., 2016).

As microdescargas que caracterizam esse regime são regiões de alta densidade de energia, o que pode levar a um aumento localizado da temperatura do material. No entanto, devido à sua natureza pontual e efêmera, o aumento de temperatura médio no sistema pode ser relativamente baixo (SHAO et al., 2010).

Caso o potencial aplicado continue aumentando mesmo após a ocorrência da ruptura dielétrica no regime filamental, o número de microdescargas tende a se intensificar ainda mais, distribuindo-se por toda a superfície do dielétrico e dando origem a uma descarga mais homogênea, característica do modo difuso. Nesse regime, a descarga ocorre de maneira mais uniforme, cobrindo uma área maior sem a formação de filamentos distintos, distribuindo a energia de forma mais uniforme. A transição entre os regimes pode ser observada na Figura 9, que reúne imagens experimentais obtidas com câmera intensificada, evidenciando a evolução dos padrões de descarga desde o regime filamental aleatório até um regime quase difuso, mais homogêneo, conforme a tensão aplicada aumenta (BOGAERTS et al., 2002; BORCIA; ANDERSON; BROWN, 2004; KOGELSCHATZ, 2003; SHAO et al., 2010; ŠÍRA et al., 2008; WAGNER et al., 2003).

Figura 9 — Transição do regime de microdescargas em uma descarga de barreira dielétrica (DBD)



Fonte: Adaptado de Fan et al, 2017.

A descarga em modo difuso, no entanto, é instável e por isso difícil de ser controlada. Pequenas variações dos parâmetros operacionais são suficientes para que ela retorne ao regime filamental. Devido a essa sensibilidade, o modo difuso requer operacionais muito específicas, determinadas pelo gás de operação, tensão aplicada, e frequência do pulso de tensão, sendo mais facilmente obtida operando em gases como hélio, neônio e nitrogênio, com pressões iguais ou ligeiramente inferiores a atmosférica (BOGAERTS et al., 2002; BORCIA; ANDERSON; BROWN, 2004; KOGELSCHATZ, 2003; SHAO et al., 2010; ŠÍRA et al., 2008; WAGNER et al., 2003).

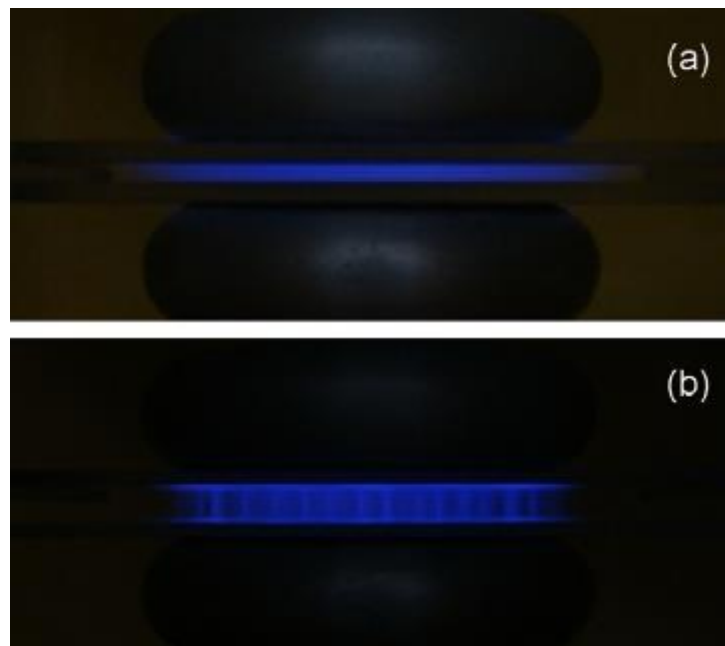
Além disso, o modo difuso pode ser classificado como descarga de *Townsend* a pressão atmosférica (APTD's), ou descarga luminosas a pressão atmosférica (APGD's). As APTD's são processos de ionização em cascata caracterizados por correntes baixas e emissão luminosa fraca, apresentando uma descarga mais uniforme e estável. Já as APGD's apresentam densidades de corrente

maiores e emissão luminosa intensa, podendo exibir estruturas parcialmente filamentosas, embora mais difusas que no regime filamental clássico do DBD (HÖFT et al., 2023).

Na Figura 10 é apresentada a diferença entre os dois regimes de operação do plasma DBD. Na Figura 10a, observa-se um regime difuso, caracterizado por uma distribuição uniforme no espaço entre os eletrodos. Em contrapartida, na Figura 10b, percebe-se a presença de filamentos com elevada densidade de corrente em regiões específicas e mal distribuídas, resultando em uma distribuição energética menos homogênea. Complementarmente, na Figura 11 são apresentadas intensidades de descarga no reator DBD, variando de fraca a forte. Pode-se notar que a descarga fraca se assemelha ao regime filamental com maior concentração de energia e brilho em regiões específicas, enquanto a descarga forte, com distribuição mais uniforme do plasma.

Assim, o regime difuso é considerado mais indicado para aplicações industriais, pois proporciona uma melhor uniformidade na distribuição de energia dentro do reator, fator essencial em aplicações industriais que exigem um tratamento superficial uniforme (GULATI et al., 2012; HÖFT et al., 2023).

Figura 10 — Regimes de operação do plasma DBD



Fonte: Shao *et al*, 2010.

Legenda: (a) o regime difuso; e (b) o regime filamental

Figura 11 — Transição do regime filamentar para o regime difuso em descarga de barreira dielétrica (DBD)



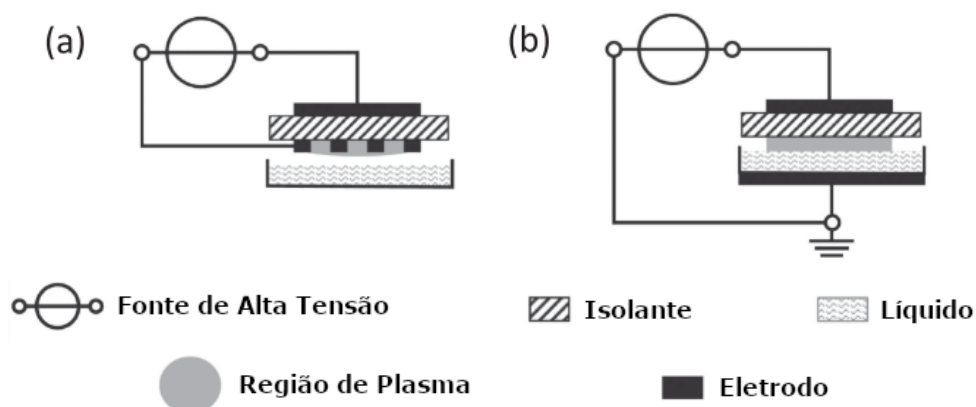
Fonte: Adaptado de ACS Material, acesso em jul. 2025.

2.3.4 O uso da DBD na ativação de água

A DBD é uma das principais fontes de plasma utilizadas na geração de PAW, destacando-se entre os diferentes sistemas de plasma não térmico (NTP) devido sua construção e controle simples (KOOSHKI et al., 2024). Devido sua capacidade de gerar plasma à pressão atmosférica diretamente no ar ambiente, sem a necessidade do fornecimento de algum gás de alimentação, a DBD é escalável para a produção em massa de PAW. Outra vantagem dessa tecnologia é sua flexibilidade estrutural, permitindo a fabricação de fontes de plasma que podem cobrir grandes áreas e serem moldadas conforme a aplicação desejada (KONG et al., 2009; WONG et al., 2023).

No contexto de ativação de líquidos por DBD, a configuração do sistema influencia diretamente o modo como o plasma interage com o meio. Em alguns casos, o próprio líquido pode atuar como um eletrodo ativo, caracterizando o chamado ativação direta. Já na ativação indireta, quando o líquido não atua como eletrodo ativo, o plasma é gerado em uma região separada e as espécies reativas formadas são transportadas até a superfície do líquido pelo fluxo de gás ionizado, composto por íons, elétrons e radicais. Esse mesmo princípio se aplica ao tratamento de superfícies. Na Figura 12 são esquematizados reatores com descarga de barreira dielétrica para o tratamento direto e indireto de água (BRANDENBURG, 2017).

Figura 12 — Esquemas para tratamento de líquidos com base em DBD



Fonte: Adaptado de Bradenburg, 2017.

Legenda: (a) tratamento indireto por meio de descarga de barreira de superfície; (b) tratamento direto, ou seja, o líquido servindo como um dos eletrodos.

Dentro desse cenário, tanto a configuração física quanto as condições operacionais do reator desempenham um papel essencial na formação e concentração das espécies reativas presentes na PAW. Os principais parâmetros de configuração que influenciam significativamente esses processos são: o material do eletrodo, o material do dielétrico, a distância entre os eletrodos (*gap*) e a espessura do dielétrico. Esses parâmetros podem afetar diretamente a concentração de determinadas espécies reativas, a dissipação de calor, a densidade e distribuição de micro descargas, entre outros aspectos. Já os parâmetros operacionais incluem: potência elétrica, duração do tratamento e o tipo de gás circundante, sendo que, no caso da potência elétrica, atores como frequência, tensão aplicada, corrente e ciclo de trabalho são especialmente relevantes (WONG et al., 2023).

Os parâmetros típicos de operação de uma DBD estão presentes na tabela 2.

Tabela 2 — Valores típicos de uma Descarga de Barreira dielétrica

Tensão aplicada	5 — 40kV
Frequência	50Hz — 80kHz
Densidade de elétrons	10^{14}cm^{-3}
Temperatura eletrônica	1 — 10eV
Grau de ionização	10^{-1}
Pressão	1 bar

Fonte: Kogelschatz et al, 1997, e Wagner et al, 2003.

O reator com descarga de barreira dielétrica utilizado na etapa preliminar de coleta de dados deste projeto é de configuração planar e de ativação indireta. Essa configuração apresenta algumas vantagens em comparação a outras disposições geométricas. Estudos indicam que a geometria planar possibilita uma área de descarga maior em relação à configuração coaxial para um mesmo tamanho de eletrodo, favorecendo uma interação mais ampla com o meio circundante (NADHIFA; AFRIANSYAH; BISMO, 2018). Além disso, essa configuração permite a geração de plasma em larga escala à pressão atmosférica, ao mesmo tempo em que facilita o transporte de partículas ativas por meio do fluxo de ar, ampliando sua área de atuação (SUN; LI, 2021).

2.4 LÍQUIDOS ATIVADOS A PLASMA

Os termos ativação de líquido e tratamento de líquidos por plasma são frequentemente utilizados de forma imprecisa. O Tratamento de Líquidos por Plasma refere-se à remoção ou neutralização de impurezas e substâncias indesejadas em volumes pequenos ou grandes de líquidos, utilizando processos promovidos pelo plasma. Já a ativação de líquidos por plasma envolve a exposição de um pequeno volume de líquido a uma fonte de plasma, com o objetivo de modificar suas propriedades físico-químicas através da introdução e aumento da concentração de espécies químicas reativas no meio (MILHAN et al., 2022).

A interação entre plasmas e líquidos, no entanto, não é um conceito recente. Estudos experimentais sobre este tema vêm sendo realizados há mais de um século, explorando as diferentes formas de modificação química induzida pelo plasma. Um exemplo clássico é o estudo eletroquímico de J. Gubkin, no qual uma solução de nitrato de prata foi exposta a uma fonte de plasma com o objetivo de promover a redução dos íons prata (Ag^+) à sua forma metálica (Ag) (GUBKIN, 1887). Além disso, o renomado trabalho de Cavendish, *Experiments on Air*, publicado em 1785, pode ser considerado o primeiro relato envolvendo plasma e líquido. Nesse experimento, a aplicação de uma descarga elétrica no ar resultou na produção de ácido nítrico. No entanto, seu foco principal não era a modificação de matrizes líquidas, mas sim as

transformações ocorridas em um ambiente fechado contendo ar exposto à descarga elétrica (BRUGGEMAN et al., 2016; BRUGGEMAN; LEYS, 2009; CAVENDISH, 1785; SAMUKAWA et al., 2012).

Embora esses fenômenos sejam conhecidos há bastante tempo, os avanços tecnológicos nas últimas décadas permitiram uma exploração mais aprofundada de suas aplicações. Em especial, a ativação de líquidos por plasma frio à pressão atmosférica tem sido amplamente estudada, sobretudo pelos efeitos biológicos resultantes das modificações químicas induzidas no líquido pelas interações na interface plasma-líquido, as quais transformam significativamente a composição dos chamados líquidos ativados por plasma (*Plasma activated liquids - PAL*) (KHLYUSTOVA et al., 2019; LAURITA et al., 2015).

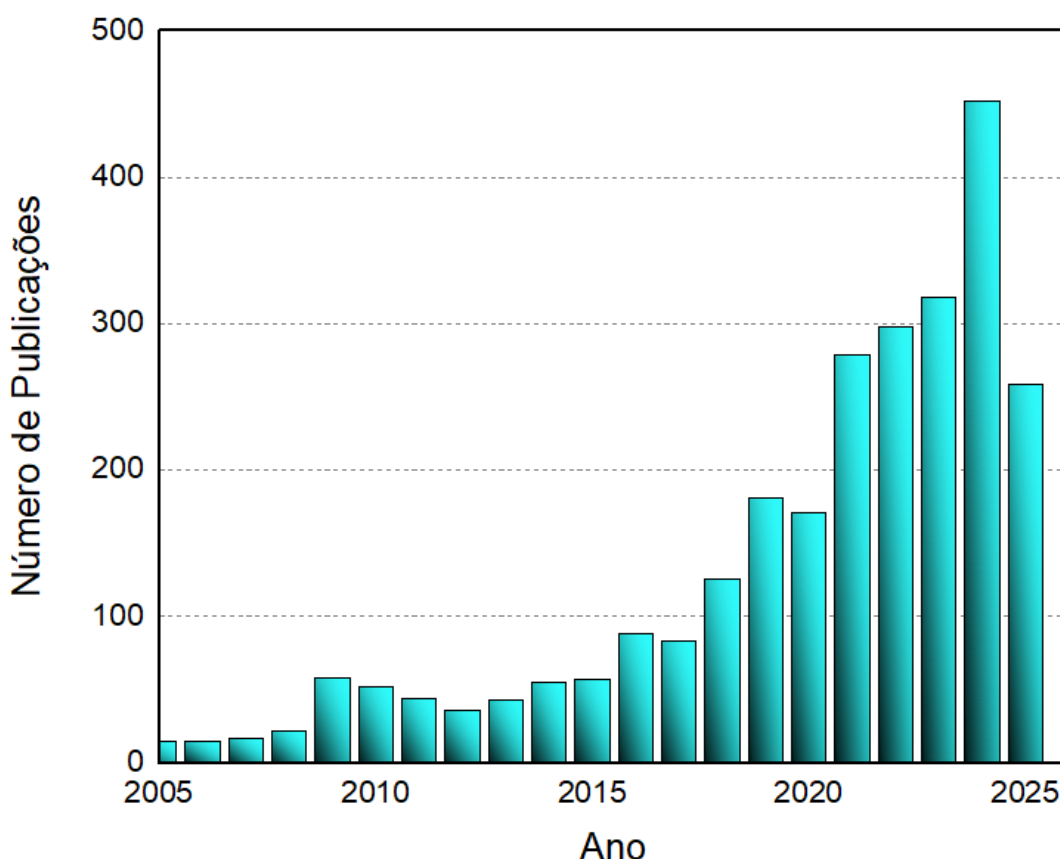
A ativação ocorre quando o líquido é exposto a uma fonte de plasma com parâmetros controlados, tais como tipo e composição do plasma, tensão aplicada, frequência, tempo de exposição, pressão, distância entre os eletrodos, material dos eletrodos, entre outros fatores que impactam diretamente a eficiência da ativação (HADINOTO; NIEMIRA; TRUJILLO, 2023; ZHAO et al., 2020b; ZHOU et al., 2020). Durante esse processo, elétrons, íons, radicais livres e fótons presentes no gás colidem com as moléculas do líquido, desencadeando uma série de reações químicas que levam a formação de várias espécies reativas primárias e secundárias, incluindo as RONS, responsáveis pelas mudanças nas propriedades químicas observadas nos PAL's.

Essas alterações conferem aos líquidos ativados um grande potencial de aplicação em diferentes áreas, como biologia, medicina, odontologia e agricultura. Entre os usos mais promissores, destacam-se a cicatrização de feridas, a esterilização de superfícies, a coagulação sanguínea, o tratamento de canais radiculares, o combate ao câncer, terapias dermatológicas, o estímulo ao crescimento de culturas agrícolas, o processamento de alimentos, a inativação bacteriana, o tratamento de efluentes, a degradação de poluentes orgânicos dissolvidos em água e a síntese e dispersão de nanopartículas (KAUSHIK et al., 2018; LAURITA et al., 2015; MILHAN et al., 2022; SILSBY et al., 2021; ZHOU et al., 2020).

A diversidade dessas aplicações tem impulsionado um crescimento expressivo nas pesquisas sobre líquidos ativados por plasma, evidenciado pelo aumento do número de publicações científicas na área (como ilustrado na Figura 13) (JUDÉE et al., 2018b; KHLYUSTOVA et al., 2019; LU et al., 2017; LUKES; BRISSET;

LOCKE, 2012). O crescente interesse pela pesquisa nesse campo evidencia não apenas o potencial transformador dessa tecnologia, mas também sua capacidade de impactar múltiplos setores da sociedade.

Figura 13 — Número de publicações anuais relacionadas a água ou líquidos ativados a plasma.



Fonte: pesquisa realizada na base de dados Scopus em 5 jul. 2025.

Legenda: palavras-chave: plasma *activated water*, plasma *activated liquid*, plasma *activated media*, plasma *treated water*, e plasma *treated liquids*.

Diante do crescente interesse científico e tecnológico na ativação de líquidos por plasma, é fundamental compreender os motivos que tornam essa abordagem uma alternativa vantajosa em diversas aplicações. Um dos principais benefícios é que, ao contrário da exposição direta ao plasma, o uso de líquidos ativados evita danos a superfícies sensíveis e materiais biológicos, uma vez que elimina a influência direta do campo elétrico, de partículas carregadas e da radiação ultravioleta. Além disso, quando gerada a partir de água pura, essa tecnologia oferece uma solução desinfetante sustentável e econômica, reduzindo a dependência de agentes químicos convencionais, como os compostos à base de cloro, que podem levar à formação de subprodutos carcinogênicos. Essa preocupação é especialmente

relevante na indústria de alimentos, onde há um crescente alerta sobre os riscos associados a desinfetantes químicos tradicionais. Nesse contexto, líquidos ativados a plasma se apresentam como uma alternativa mais segura, ambientalmente amigável e economicamente viável (MA et al., 2015; XU et al., 2016; ZHOU et al., 2020).

Para que os PAL's apresentem suas propriedades desejáveis, é essencial compreender os diferentes métodos pelos quais esses líquidos podem ser gerados. A interação do plasma com a fase líquida ocorre de maneiras distintas, impactando diretamente a concentração e distribuição das espécies reativas e, consequentemente, a eficácia da ativação. Diante disso, três abordagens principais são amplamente estudadas: (a) descarga elétrica multifásica do tipo bolhas ou aerossol, (b) descarga elétrica direta no ambiente líquido, e (c) descargas elétricas geradas acima do líquido (BRUGGEMAN et al., 2016; HADINOTO; NIEMIRA; TRUJILLO, 2023). Cada uma dessas configurações apresenta características específicas que influenciam suas aplicações e eficiência na modificação das propriedades físico-químicas da água (BRUGGEMAN; LEYS, 2009; KHLIUSTOVA et al., 2019; ZHOU et al., 2020).

As descargas elétricas multifásicas são utilizadas para intensificar as reações aquosas entre as espécies reativas do plasma e os líquidos, facilitando a transferência de massa entre as fases gasosa e líquida (AGHDAM, 2020; BRUGGEMAN et al., 2016). Segundo Charchi Aghdam (2020), essas descargas envolvem múltiplas fases, como gás-líquido ou até mesmo dois líquidos. Elas ocorrem principalmente em bolhas, espumas ou durante a ignição de plasmas não térmicos na fase gasosa, quando há mistura com gotículas líquidas (AGHDAM, 2020). Essas configurações promovem uma interação eficiente entre plasma e líquido, favorecendo reações químicas essenciais, como a geração de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (ROS e RNS), fundamentais para aplicações diversas, incluindo remediação ambiental, esterilização e biomedicina (BRUGGEMAN et al., 2016; REZAEI et al., 2019).

Na condição em que o plasma entra em contato direto com o volume do líquido, além do acúmulo de espécies reativas provenientes das interações plasma-ar, ocorre a geração de diversas outras espécies reativas devido à interação direta do plasma com a solução. Nesse caso, a formação de espécies reativas é significativamente intensificada, pois átomos excitados e ionizados reagem tanto com as moléculas do gás ambiente quanto com as moléculas do líquido. No entanto,

descargas de plasma geradas diretamente na água apresentam a limitação de menor eficiência energética em comparação com sistemas de plasma em fase gasosa (KAUSHIK et al., 2018; MA et al., 2015).

Nas configurações em que a descarga elétrica ocorre no gás acima da superfície da água, apenas o efluente gasoso interage com o líquido. Esse método, amplamente aplicado em biomedicina, pode ser realizado por descargas do tipo DBD ou jato de plasma. Nos experimentos preliminares realizados neste trabalho, utilizou-se uma configuração DBD de tratamento indireto, onde plasma não térmico é gerado a alguma distância da superfície da água, sem tocá-la. Somente o efluente gasoso, contendo espécies reativas de curta e longa duração, incluindo RONS, produzidas pela interação plasma-gás, atinge a superfície do líquido, onde essas espécies se dissolvem e se acumulam na solução (KAUSHIK et al., 2018).

Estudos destacam que a geração de espécies reativas no líquido varia consideravelmente entre a configuração em que o plasma entra em contato direto com a solução e aquela em que o efluente gasoso interage indiretamente com a superfície do líquido (BRUGGEMAN et al., 2016; THIRUMDAS et al., 2018; TIAN et al., 2015).

Além do tipo de descarga, outros fatores também desempenham um papel fundamental na ativação dos líquidos. Parâmetros como o volume do líquido, a área de superfície exposta e a temperatura influenciam diretamente a formação e estabilidade das espécies reativas geradas, podendo modificar significativamente a composição química dos líquidos ativados. O controle preciso desses fatores é essencial para otimizar os efeitos desejados da ativação e garantir sua reprodutibilidade em diferentes aplicações (KHLUSTOVA et al., 2019).

Dado que diferentes configurações de descarga possuem impactos distintos na formação de espécies reativas, é importante considerar alternativas eficientes e acessíveis. Entre essas opções, o DBD tem se destacado como uma das configurações mais acessíveis e versáteis, especialmente para aplicações biomédicas e ambientais. Sua construção relativamente simples e a capacidade de operar a pressão atmosférica tornam essa configuração uma alternativa adaptável a diversas necessidades experimentais e industriais. Assim, a combinação entre eficiência, segurança e viabilidade operacional justifica o uso do DBD como um método promissor para a geração de líquidos ativados por plasma, ampliando suas possibilidades de aplicação em setores como medicina, agricultura, meio ambiente e indústria alimentícia (JUDÉE et al., 2018b; ZHAO et al., 2020b; ZHOU et al., 2020).

2.4.1 Água ativada a plasma

A PAW, também conhecida como ácido plasmático, água da morte ou água eletro-spray, é o produto da ativação de líquidos por plasma, sendo a água (seja de torneira, filtrada, mineral, destilada ou deionizada) a matriz de ativação utilizada. Essa ativação confere à água um alto teor de RONS, como H_2O_2 , NO_3^- , NO_2^- , ácido nitroso (HNO_2), ozônio, entre outras (ANDERSON et al., 2016; JULÁK; SCHOLTZ; VAŇKOVÁ, 2018; KAMGANG-YOUBI et al., 2008; THIRUMDAS et al., 2018; VON WOEDTKE et al., 2025).

As RONS conferem às PAW's uma ampla gama de aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento, e possuem cada qual em seu contexto uma função atribuída à sua devida aplicação. O peróxido de hidrogênio é amplamente estudado devido às suas múltiplas funções biológicas e químicas, sendo utilizado em aplicações hospitalares como agente antimicrobiano e na agricultura como indutor de crescimento vegetal e de resistência a estresses ambientais. Os nitratos e nitritos, são primeiramente empregados na área agrícola, visto que apresentam propriedades fertilizantes para o crescimento de plantas. Além de aplicações agrícolas, os nitratos e nitritos em condições ácidas possuem elevada atividade bactericida. Já o ozônio possui propriedades exclusivamente bactericidas (ANDERSON et al., 2016; HOEBEN et al., 2019; JULÁK; SCHOLTZ; VAŇKOVÁ, 2018; KAMGANG-YOUBI et al., 2008; LINDSAY et al., 2015; THIRUMDAS et al., 2018; ZHOU et al., 2020).

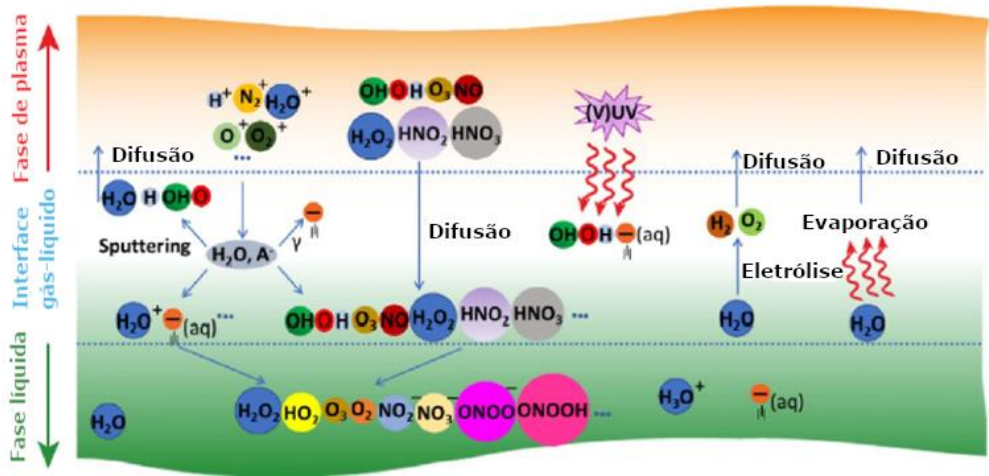
Apesar de suas inúmeras aplicações e da facilidade, rapidez e segurança em sua produção, a PAW ainda apresenta algumas limitações. Entre elas, destaca-se a complexidade do estudo sobre a formação e o transporte de espécies reativas entre diferentes regiões do líquido, devido à variedade de mecanismos de reação envolvidos. Além disso, controlar com precisão a química da PAW continua sendo um desafio, assim como a compreensão detalhada de seu mecanismo de ação em determinadas áreas, uma vez que o tema ainda é recente e pouco explorado. Com o avanço significativo de suas aplicações, torna-se essencial investigar quais RONS são formadas, os processos que levam à sua geração e a quantificação de suas concentrações (AKOLKAR; SANKARAN, 2013; ANDERSON et al., 2016; BRUGGEMAN et al., 2016; THIRUMDAS et al., 2018; ZHOU et al., 2020).

2.5 GERAÇÃO DE RONS DURANTE O PROCESSO DE ATIVAÇÃO

O estudo da interação entre plasmas e líquidos e, em particular, da transferência de reatividade da fase gasosa para a fase líquida, tem sido destacada como de extrema importância para a compreensão dos efeitos biológicos apresentados por PAL's, em especial, pela água ativada à plasma, sendo esta o objeto de estudo deste trabalho. É essencial entender que dentre os constituintes do plasma, como elétrons, íons, espécies metastáveis, radiação ultravioleta (UV) e visível (VIS), além de campo eletromagnético, as RONS presentes no meio gasoso são creditadas como as principais responsáveis pela atividade biológica observada na PAW (MILHAN et al., 2022; ZHOU et al., 2020).

Durante o processo de ativação da água, o transporte das espécies reativas presentes no plasma para o líquido envolve três processos físicos principais: o transporte de espécies reativas na fase gasosa, os processos físicos e químicos na interface gás-líquido, e a solubilização das espécies reativas resultantes no meio líquido. A transferência de reatividade do plasma para o líquido ocorre principalmente na interface gás-líquido, onde atuam diversos processos físicos e químicos, como colisões de partículas gasosas, transferência de massa, *sputtering* e fotólise induzida por fótons UV. Esses mecanismos promovem a formação e solubilização de uma ampla variedade de espécies reativas no meio líquido. A Figura 14, apresentada a seguir, representa os principais processos físicos e químicos envolvidos na interação entre as fases gasosa e líquida, com destaque para a difusão, evaporação, eletrólise e outras vias de transporte. As reações químicas desse processo são extremamente complexas. Lietz e Kushner simularam 1680 reações da fase gasosa e 448 reações de fase líquida e um total de 79 espécies gasosas e 83 espécies aquosas na interação plasma-líquido (LIETZ; KUSHNER, 2016; WENDE et al, 2018; ZHAO et al., 2020b; ZHOU et al., 2020).

Figura 14 — Mecanismos de transporte de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS) geradas na fase gasosa para uma solução.



Fonte: Adaptado de Zhou et al, 2020.

Essas espécies reativas podem ser classificadas quanto à sua formação (espécies originais, primárias e secundárias) e quanto a seu tempo de vida (espécies de vida curta e de vida longa). As espécies originais, são aquelas que estão contidas originalmente no gás utilizado para produção do plasma. Já as espécies primárias, imersas no plasma, são originadas das espécies originais, e as espécies secundárias, são formadas em meio líquido quando as espécies reativas primárias geradas reagem com as moléculas de água e entre si, através da interação do meio gasoso com o líquido (WONG et al., 2023).

A utilização do ar atmosférico — composto principalmente por nitrogênio molecular (N_2) e oxigênio molecular (O_2) — como gás de trabalho para a geração do plasma, e água como meio líquido precursor para a geração da PAW, resultarão na produção de diversas espécies reativas primárias, incluindo o $\bullet OH$, oxigênio atômico (O), nitrogênio atômico (N), e ânion superóxido ($O_2^{\bullet -}$). Essas espécies contribuem, posteriormente, para a formação de compostos secundários, como o peroxinitrito ($ONOO^-$) e o óxido nítrico (NO), além de NO_3^- , NO_2^- e H_2O_2 , conforme apresentado na Tabela 3 (ZHOU et al., 2020).

Tabela 3 — Visão geral das interações plasma-líquido (espécies primárias e secundárias) durante a produção de PAW, ao utilizar ar atmosférico (nitrogênio e oxigênio) e água como moléculas originais.

Espécies originais	Espécies primárias	Espécies secundárias
--------------------	--------------------	----------------------

H_2O , O_2 , N_2	$\bullet\text{OH}$, H , O , N , NO e íons	H_2O_2 , NO_x , O_3 , HNO_2 , HNO_3 , ONOOH e íons
--	--	---

Fonte: Adaptado de Zhou *et al.*, 2020.

Legenda: H = hidrogênio atômico; HNO_2 = ácido nitroso;

As espécies de vida curta, como OH , NO e ONOO^- , são aquelas que possuem tempo de vida da ordem de alguns nanossegundos a vários segundos e reagem rapidamente para criar espécies mais estáveis, enquanto as espécies de vida longa, como H_2O_2 , O_3 , NO_2^- e NO_3^- possuem tempo de vida da ordem de minutos a dias (WONG *et al.*, 2023).

Verlackt *et al.* (2018) demonstraram que espécies de vida curta não penetram além da interface plasma-líquido, ao contrário das espécies de vida longa, que são previstas estarem imersas no líquido durante o tratamento a plasma. Ou seja, quando o PFPA é aplicado de forma indireta na ativação de líquidos ou água, como neste trabalho, a maioria das RONS encontradas na fase líquida são de longa duração, sendo geradas a partir da fase gasosa do plasma e da interação na interface gás-líquido (MILHAN *et al.*, 2022; VERLACKT; BOGAERTS; VAN BOXEM, 2018).

2.6 GERAÇÃO DE RONS DE VIDA LONGA

Nesta seção, com base na descrição apresentada por Milhan *et al.* (2022), são apresentados os principais mecanismos responsáveis pela formação de RONS na PAW devido à interação entre o plasma e a fase líquida. Dentre essas espécies, destacam-se o H_2O_2 , NO_2^- , NO_3^- e O_3 , cujos processos de geração são descritos a seguir.

2.6.1 Formação de nitrito e nitrato

Os íons NO_2^- e NO_3^- são gerados como subprodutos da conversão de espécies reativas contendo nitrogênio (NO_x), formadas nas diferentes regiões da interação plasma-líquido. Essas espécies apresentam elevada capacidade antimicrobiana em meio ácido, sendo particularmente eficazes contra bactérias

No plasma gasoso, a produção de NO ocorre por meio das reações (2) a (4):



Dentro da fase plasmática, as espécies NO_x passam por processos de dissociação e recombinação, descritos nas equações (5) a (8):



Na interface plasma-líquido, ocorre a conversão das espécies NO_x em íons nitrito e nitrato, conforme representado nas equações (9) à (12):



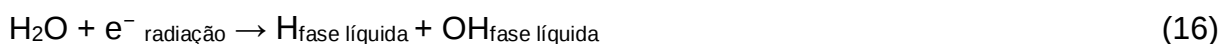
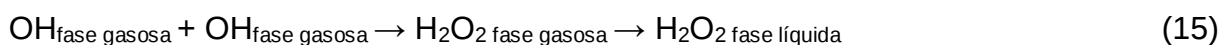
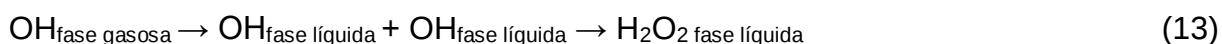
Em particular, observa-se que nas equações (9) e (10) há a liberação de íons H^{+} no meio aquoso, o que contribui para a redução do pH da PAW. Esse processo resulta no aumento da concentração de NO_2^{-} e NO_3^{-} , acompanhado de uma acidificação progressiva da solução, que se intensifica com a elevação da tensão de descarga e com o tempo de exposição da água ao plasma.

É importante ressaltar que, diferentemente de outros métodos de ativação de líquidos por plasma, a DBD aplicada em pressão atmosférica não gera quantidades detectáveis de HNO_2 na PAW.

2.6.2 Formação de peróxido de hidrogênio

O H_2O_2 desempenha um papel fundamental nos processos redox celulares e apresenta aplicações biomédicas diversas, incluindo inibição microbiana, cicatrização de feridas e potencial uso no tratamento de câncer.

A formação de H_2O_2 na PAW pode ser descrita pelas reações (13) a (16), que representam a recombinação de radicais hidroxila dissolvidos na solução e a dissociação de moléculas de água por colisão com elétrons.



A dissociação de moléculas de água por elétrons, mostrada nas reações (17) e (18), também leva à formação de radicais hidroxila.



De maneira complementar, a ionização do oxigênio molecular e sua interação com a água contribuem para a geração de OH, conforme descrito nas reações (19) e (20).



A fotólise induzida por radiação UV, outro processo relevante para a produção de OH, está associada às reações (21) e (22).



Finalmente, os radicais hidroxila gerados por esses processos reagem subsequentemente para formar H_2O_2 na solução, conforme mostrado na reação (23).



2.6.3 Formação de ozônio

O O_3 é uma das espécies oxidantes mais potentes, possuindo elevado potencial redox e destacando-se pela sua eficácia bactericida superior à do H_2O_2 e do NO_2^- .

Na interação plasma-líquido, o O_3 pode ser transportado da fase gasosa para a água ou ser gerado diretamente na fase líquida, especialmente quando o plasma é aplicado em bolhas de O_2 . A reação principal responsável pela formação do ozônio é descrita abaixo:



2.7 PROPRIEDADES FÍSICAS DA PAW

As espécies presentes em todo processo de ativação da água são importantes, pois a química do plasma em conjunto com a PAW se faz responsável por alterações físicas significativas, como variações do potencial de hidrogênio (pH), no potencial de oxirredução (*Oxidation-reduction Potential* - ORP), na condutividade, no total de partículas dissolvidas (*Total Dissolved Solids* - TDS), e influencia diretamente até mesmo na funcionalidade atribuída à PAW (ANDERSON et al., 2016; BRADU et al., 2020; KAMGANG-YOUBI et al., 2008; PLASMA-LIQUID INTERACTIONS, 2012; THIRUMDAS et al., 2018).

Dentre essas alterações, a variação do pH tem um papel fundamental, uma vez que a ação microbicida da PAW pode estar diretamente relacionada tanto à presença das principais espécies reativas quanto a acidificação resultante do seu processo de ativação (KHLYUSTOVA et al., 2019). Para compreender melhor essas interações, a medição do pH é essencial, pois permite caracterizar as condições reativas na fase líquida e determinar a concentração de íons hidrogênio na solução. Essa acidificação ocorre porque diversas RONS formadas na interação plasma-líquido possuem caráter ácido e liberam íons H^+ na água. Entre elas, destacam-se os íons NO_2^- e NO_3^- , cuja presença no meio, bem como a conversão de NO_2^- em NO_3^- , contribui significativamente para a diminuição do pH (ZHAO et al., 2020b).

Além do mecanismo envolvendo a liberação direta de íons H^+ por RONS ácidas, também se considera que reações químicas entre moléculas estáveis, como óxido nitroso, ozônio, dióxido de carbono e vestígios de ácidos nítrico e/ou ácido peroxinitroso, presentes na interface plasma-líquido, também podem contribuir para a acidificação, além de gerar espécies secundárias como peróxido de hidrogênio e peroxinitrito (OEHMIGEN et al., 2010).

A redução do pH é um dos principais efeitos observados na ativação da água por plasma, sendo considerada um fator crucial nas vias bioquímicas associadas às PAW's. De modo geral, quanto maior o tempo de tratamento, menor o pH da solução. No entanto, essa redução não ocorre indefinidamente: A partir de determinado ponto, o pH tende a se estabilizar, de modo que extensões adicionais no tempo de ativação não promovem reduções adicionais significativas. Esse ponto de saturação, entretanto, pode variar de acordo com os parâmetros experimentais do sistema, como a configuração do reator, o gás de alimentação e a potência aplicada (LU et al., 2017; WONG et al., 2023).

Essa dinâmica pode ser influenciada por diversos fatores, como o tipo de plasma utilizado, método de geração, o gás de alimentação e as condições operacionais, incluindo a polaridade da tensão aplicada, como observado por Lukes, Locke e Brisset (2012), onde constata-se que descargas negativas promovem uma acidificação mais intensa do que as positivas, devido a maior produção de íons reativos (BRUGGEMAN; LEYS, 2009; LU et al., 2017; LUKES; BRISSET; LOCKE, 2012; TACHIBANA; NAKAMURA, 2019; TAKAMATSU et al., 2012). Além disso, a estabilidade das espécies reativas também está intimamente ligada ao valor de pH: em condições próximas à neutralidade, compostos como H_2O_2 , NO_2^- , NO_3^- e $ONOO^-$ tendem a permanecer estáveis ao longo do tempo. Por outro lado, em ambientes altamente ácidos ($pH < 3,5$), essas espécies tornam-se instáveis e reagem entre si, resultando em flutuações em suas concentrações. Apesar de seu caráter ácido, a PAW é considerada segura para uso tópico, apresentando baixa toxicidade e ausência de efeitos corrosivos, o que a torna adequada inclusive para aplicações em tecidos vivos e animais (WONG et al., 2023).

Além de alterações no pH, a exposição da água ao plasma também modifica sua condutividade elétrica, se tornando um parâmetro importante à medida em que carrega informações tanto sobre a natureza quanto sobre as concentrações de íons presentes nos PAL's (WONG et al., 2023).

Nesse sentido, é importante destacar que o pH e a condutividade elétrica estão diretamente relacionados à medida em que uma diminuição eventual do pH tende a promover um aumento da condutividade elétrica da solução, e vice versa, o que pode ser explicado pela maior mobilidade dos íons H^+ em comparação com os íons OH^- (LUKES; BRISSET; LOCKE, 2012). Brisset *et al* (2011) relataram uma associação entre a formação de íons NO_3^- e NO_2^- , diminuição do pH e consequentemente aumento na condutividade da PAW. Adicionalmente, a potência de descarga aplicada durante a ativação a plasma demonstrou influenciar esses dois parâmetros simultaneamente (BRISSET *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2020b).

Assim como o pH e a condutividade, outro parâmetro fundamental para avaliar o comportamento da PAW é o ORP, que determina a capacidade da solução de oxidar ou reduzir substâncias, estando diretamente relacionado à concentração e força dos agentes oxidantes (WONG *et al.*, 2023). Além de estar positivamente correlacionado com a capacidade de inativação, atribui-se ao ORP a capacidade de fornecer uma avaliação rápida do potencial de desinfecção dos líquidos. Ele tem sido proposto como um monitor em tempo real do potencial antimicrobiano de uma solução: quanto maior o valor do ORP, maior a capacidade de oxidação de uma solução de retirar os elétrons da membrana celular das bactérias (MA *et al.*, 2015; MCPHERSON, 1993). Vale ressaltar que os modos de geração da PAW, isto é, diferentes reatores e configurações utilizadas para o processo de ativação, também afetam o ORP. Além disso o valor do ORP de PAL's aumenta com o tempo de tratamento com plasma, indicando que quanto maior o tempo de ativação, maior número de espécies reativas de oxigênio geradas na solução e maior o potencial antimicrobiano, até que um ponto de saturação seja alcançado (TIAN *et al.*, 2015; XU *et al.*, 2016).

2.8 APLICAÇÕES DA ÁGUA ATIVADA POR PLASMA

A PAW, gerada através de descargas elétricas como a DBD, tem ganhado destaque como uma solução promissora devido às suas propriedades únicas, impulsionadas pela presença de RONS. A Figura 15 apresenta uma visão geral dessas aplicações, destacando sua utilização na medicina com plasma, na agricultura e no processamento de alimentos. Recentemente, a aplicação da PAW tem sido amplamente pesquisada como uma fonte de solução antimicrobiana ou desinfetante, substituindo métodos tradicionais que podem envolver químicos (ZHAO *et al.*, 2020b).

As aplicações abrangem diversas áreas, com destaque para suas propriedades antibactericidas, seu uso na agricultura, seu potencial na área médica, e, mais recentemente, em nanotecnologia, sistemas avançados de resfriamento e tratamento ambiental de contaminantes (CHAVES et al., 2023; LOW; HUNG; TAN, 2023; TOPOLOVEC et al., 2024).

Figura 15 — Ilustração geral da aplicação da PAW na medicina com plasma, agricultura inteligente e processamento de alimentos.



Fonte: Adaptado de Zhou et al, 2020.

2.8.1 Ação antimicrobiana e mecanismos de inativação

A água ativada por plasma tem se destacado por sua reconhecida ação antimicrobiana, resultado de uma combinação complexa de efeitos físico-químicos provocados pelas espécies reativas formadas durante sua geração. Os principais agentes envolvidos nesse processo são as espécies reativas de oxigênio, como H_2O_2 , $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{O}_2^-$ e O_3 , além das espécies reativas de nitrogênio, NO , NO_2^- , NO_3^- e ONOO^- . Esses compostos atuam em sinergia com outros fatores importantes, como a acidificação da água (redução do pH) e o aumento do ORP, contribuindo para um ambiente hostil à sobrevivência microbiana, especialmente porque a maioria dos microrganismos não possui mecanismos eficazes para ajustar seu pH interno,

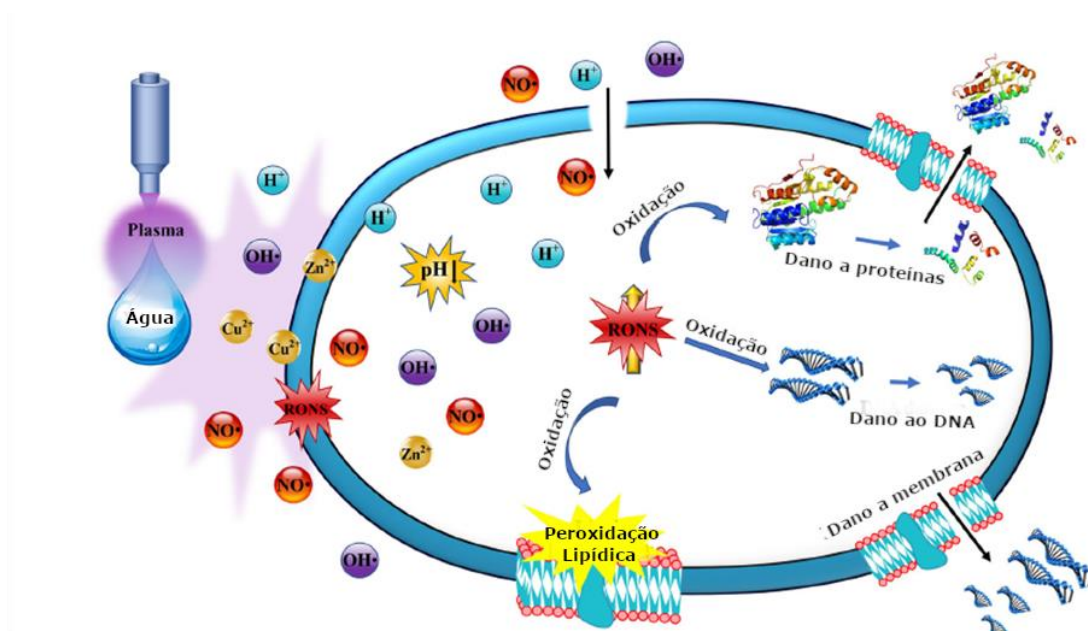
tornando-se altamente vulneráveis às variações do pH ambiental (LUKES et al., 2014; THIRUMDAS et al., 2018; WESTHOFF, 1998; ZHANG et al., 2016).

A inativação microbiana promovida pela PAW se dá, majoritariamente, por mecanismos oxidativos que afetam a integridade da célula bacteriana em diferentes níveis. A membrana celular, composta por lipídios, fosfolipídios e proteínas, é o principal alvo dos efeitos deletérios da PAW, cuja interação com as espécies reativas promove a peroxidação lipídica e a formação de poros transitórios na membrana, facilitando a entrada de RONS no meio intracelular. Uma vez dentro da célula, as RONS induzem um estresse oxidativo intenso, capaz de danificar enzimas, proteínas estruturais e, especialmente, o material genético. A oxidação do DNA, associada ao comprometimento de organelas e enzimas essenciais, afeta diretamente funções vitais da célula, levando a disfunções metabólicas irreversíveis e, por fim, à morte celular (MA et al., 2013; ZHANG et al., 2016).

É importante destacar que a eficácia antimicrobiana da PAW não é atribuída exclusivamente à ação das RONS ou à acidificação do meio, mas sim à combinação sinérgica desses dois fatores, cuja interação intensifica o estresse celular e amplia os danos estruturais e metabólicos (HADINOTO; NIEMIRA; TRUJILLO, 2023; SAMPAIO et al., 2022). Além disso, a acidificação intracelular, induzida pelo acúmulo de espécies ácidas como HNO_3 e HNO_2 , afeta a homeostase do pH, o que agrava ainda mais os efeitos tóxicos das espécies reativas. (GAN et al., 2022; GUO et al., 2022; LIU et al., 2021, 2021; MA et al., 2013; WESTHOFF, 1998; ZHANG et al., 2016).

Os mecanismos celulares de ação estão representados na Figura 16, que destaca os principais danos promovidos pelas RONS à membrana, proteínas e material genético bacteriano.

Figura 16 — Mecanismo de ação antimicrobiana da PAW por meio de RONS e estresse oxidativo celular.



Fonte: Adaptado de Xiang *et al*, 2022.

Outros mecanismos secundários também contribuem para a atividade antimicrobiana, como a exposição a radiação ultravioleta, choques acústicos e campos elétricos gerados durante a descarga, especialmente quando o plasma entra em contato direto com a superfície do líquido (LI *et al.*, 2008; LUKES; BRISSET; LOCKE, 2012; WILLIAM C FRAZIER; DENNIS C WESTHOFF, 1998). A complexidade da química envolvida aumenta ainda mais quando o plasma é gerado diretamente na água, favorecendo reações entre espécies gasosas e líquidas e modificando os caminhos de inativação (DOLEZALOVA; LUKES, 2015; LI *et al.*, 2008; THIRUMDAS *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2016).

A eficácia da PAW também está fortemente condicionada às características dos microrganismos-alvo. Estudos indicam que bactérias Gram-negativas, caracterizadas por uma parede celular mais fina e a presença de membrana externa, são mais vulneráveis à inativação pela PAW do que as bactérias Gram-positivas, que possuem uma parede celular espessa composta majoritariamente por peptidoglicano. Essa diferença de suscetibilidade está diretamente relacionada às distintas estruturas das paredes celulares desses grupos bacterianos. Bactérias Gram-positivas apresentam uma parede celular mais espessa (20–80 nm) e densa, o que confere maior proteção frente aos agentes oxidativos, ao passo que as Gram-negativas, com

parede mais fina (menos de 10 nm), oferecem menor barreira à penetração dos RONS (WANG; SALVI, 2021; WONG et al., 2023; ZHAO et al., 2020a). Além da composição da parede celular, a forma morfológica dos microrganismos também influencia sua susceptibilidade à PAW, uma vez que o formato pode alterar a distribuição de cargas na superfície e a exposição ao ataque oxidativo (ŠIMONČICOVÁ et al., 2019). Ainda, o modo de organização celular influencia significativamente os resultados: biofilmes bacterianos tendem a ser mais resistentes que células planctônicas, devido à presença de matriz extracelular protetora que dificulta a penetração de agentes reativos (SMET et al., 2019; WONG et al., 2023).

Fatores operacionais também desempenham papel essencial na determinação da atividade antimicrobiana da PAW. Entre eles, destacam-se o tipo de plasma utilizado, o tempo de ativação, o tipo e vazão do gás, a temperatura do líquido durante a ativação, e as condições de armazenamento da água após sua exposição ao plasma (HERIANTO et al., 2021; XIANG et al., 2022; ZHAO et al., 2020a). Por exemplo, a literatura aponta que temperaturas superiores a 25 °C durante a ativação da água tendem a reduzir a formação de espécies reativas, o que se deve principalmente à evaporação da água e a alterações em propriedades físico-químicas do meio, como densidade, tensão superficial, intensidade da descarga do plasma e taxas de reação envolvidas na geração de RONS (PANG et al., 2022). Além disso, Dolezalova & Lukes (2015) relataram que a presença de umidade ou o contato direto com líquidos pode alterar de forma significativa os produtos das reações químicas e os mecanismos de inativação microbiana na PAW. No entanto, resultados experimentais preliminares obtidos neste trabalho indicam uma tendência oposta, sugerindo que o aumento da temperatura da água pode, na verdade, favorecer a produção de espécies reativas. Essa divergência pode estar relacionada às diferenças nos parâmetros operacionais dos reatores, nas geometrias utilizadas ou nos gases de trabalho empregados, o que reforça a complexidade e a sensibilidade do processo de ativação. Vale destacar que estudos mais antigos, como o de Kogelschatz (2000), já sugeriam que a umidade no meio da descarga pode intensificar a atividade do plasma, o que potencializaria a geração de espécies reativas e, conseqüentemente, a eficácia da ativação (DOLEZALOVA; LUKES, 2015; KOGELSCHATZ, 2000).

Assim como a temperatura no momento da ativação influencia diretamente a composição química da PAW, as condições em que ela é armazenada após o tratamento também são determinantes para sua estabilidade e funcionalidade. A

estocagem em baixas temperaturas, especialmente em -80°C ou -150°C , demonstrou preservar as espécies reativas por longos períodos, mantendo a eficácia antimicrobiana da PAW por até 18 meses (HADINOTO; NIEMIRA; TRUJILLO, 2023; MILHAN et al., 2022; TSOUKOU, 2021).

Além das condições físico-químicas, a eficácia da PAW depende da carga microbiana inicial. Estudos mostram que maiores concentrações de bactérias exigem maiores doses ou tempos de exposição para alcançar taxas semelhantes de inativação (Bai et al., 2020). Também foi relatado que espécies como $\bullet\text{O}_2^-$ e $\bullet\text{OH}$ atuam de maneira complementar: enquanto a primeira desempenha papel chave no processo de oxidação, a segunda é responsável por romper ligações peptídicas e cadeias de aminoácidos, acentuando o dano estrutural. Em conjunto, esses fatores mostram que a ação antimicrobiana da PAW é multifacetada e envolve a atuação sinérgica de componentes químicos, estruturais e operacionais.

2.8.1.1 Citotoxicidade em células eucarióticas

Após discutir os efeitos antimicrobianos da PAW em microrganismos procarióticos, é igualmente importante considerar seus possíveis impactos sobre células eucarióticas, especialmente em contextos biomédicos. A avaliação da citotoxicidade da PAW é uma etapa essencial para garantir sua aplicação segura em diferentes áreas, como medicina, odontologia e agricultura. Para isso, diversos estudos têm utilizado modelos *in vitro* com células de mamíferos, buscando compreender os efeitos biológicos da exposição à PAW, considerando sua composição química e a presença de espécies reativas.

O ensaio MTT (brometo de 3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazólio) é um dos métodos mais utilizados para mensurar a viabilidade celular nesses testes, por avaliar a atividade metabólica de células vivas. Sampaio *et al.* (2022) utilizaram esse ensaio para analisar a toxicidade de diferentes PAL's produzidos a partir de água destilada, deionizada, filtrada, de torneira e solução salina, ativadas com plasma de arco deslizante. Os resultados mostraram baixa toxicidade celular em todas as amostras testadas, mesmo com a presença de espécies reativas como H_2O_2 e HNO_2 (SAMPAIO et al., 2022)

De forma semelhante, Boehm *et al.* (2016) analisaram a citotoxicidade de soluções tratadas com plasma DBD em células de mamíferos. O estudo identificou

uma correlação linear entre a concentração de H_2O_2 e os efeitos citotóxicos observados. Além disso, os autores ressaltaram que o meio extracelular exerce influência significativa sobre a toxicidade, já que substâncias presentes nesses meios podem atenuar os efeitos das espécies reativas (BOEHM et al., 2016).

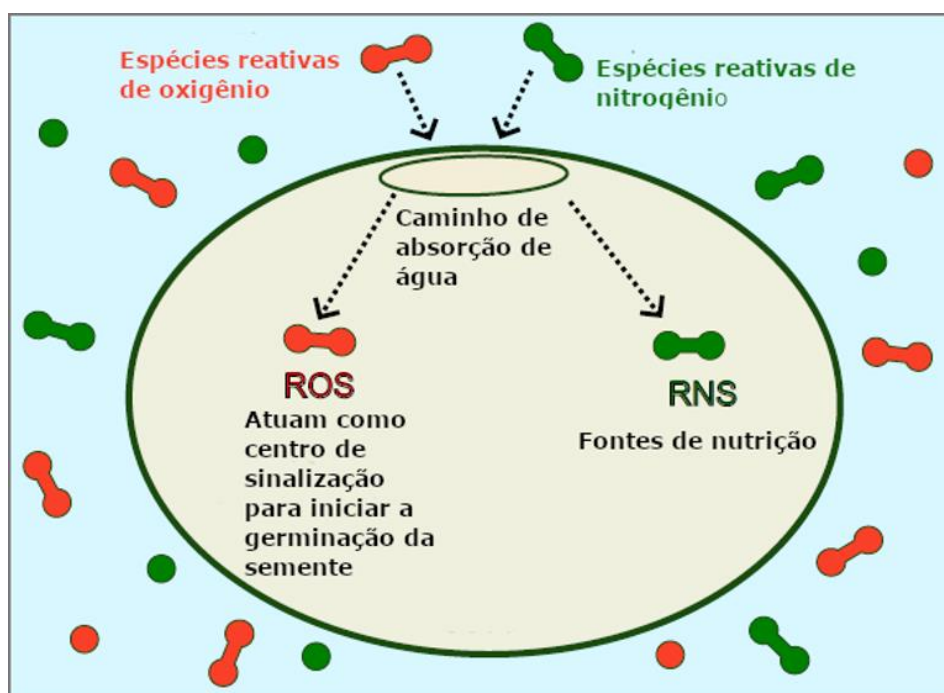
Ambos os estudos indicam que a toxicidade da PAW pode ser modulada por parâmetros como o tempo de ativação, o tipo de líquido utilizado e o ambiente onde ocorre o contato celular. Esses fatores são determinantes para o desenvolvimento de aplicações seguras da PAW, especialmente em contextos onde a exposição de células de mamíferos é inevitável.

2.8.2 Aplicações da PAW na agricultura

A aplicação da PAW na agricultura tem se destacado como uma alternativa promissora e ambientalmente amigável para enfrentar desafios recorrentes do setor, como a baixa taxa de germinação, o crescimento limitado das plantas e a contaminação microbiológica de sementes e solos (MITRA et al., 2014). A eficácia da PAW nesse contexto está diretamente relacionada à sua composição rica em ROS e RNS, que desempenham papéis fundamentais em processos fisiológicos das plantas.

As ROS atuam como centros de sinalização celular, desencadeando vias de transdução de sinais associadas à germinação, enquanto as RNS, como o óxido nítrico e os nitratos, estão envolvidas em processos de nutrição, regulação do estado redox celular e síntese de aminoácidos, proteínas e clorofila. Este processo encontra-se ilustrado na Figura 17 (DEL RÍO, 2015; EL-MAAROUF-BOUTEAU; BAILLY, 2008; ISLAM et al., 2019; KUMAR et al., 2021; THIRUMDAS et al., 2018; WONG et al., 2023). Além disso, as espécies presentes na PAW, como $\cdot\text{O}_2^-$, H_2O_2 , NO_2 e CO_2 , funcionam como doadores externos que estimulam a germinação por mecanismos complementares aos processos naturais da planta (BATK et al., 2002).

Figura 17 — Ação da PAW na germinação de sementes: ROS como sinalizadores e RNS como nutrientes.



Fonte: Adaptado de Wong *et al* 2023.

Estudos experimentais reforçam a efetividade da PAW em diferentes condições. Than *et al.* (2022) demonstraram que sementes de *Lactuca sativa* tratadas com PAW gerada por um reator DBD apresentaram um aumento de até 117% no potencial de germinação, o que demonstra a efetividade deste tipo de reator para a produção de PAW (THAN *et al.*, 2022). Resultados semelhantes foram observados por Naumova *et al.* (2011), que utilizaram descarga elétrica submersa para ativar a água e, após tratar sementes de centeio, relataram aumento de 50% na germinabilidade. Esses efeitos positivos foram notados inclusive em condições de estresse hídrico, como evidenciado por Ling *et al.* (2014), que observaram melhoria na germinação de sementes tratadas com plasma frio (LING *et al.*, 2014; NAUMOVA; MAKSIMOV; KHLIUSTOVA, 2011).

Apesar dos benefícios, é necessária atenção quanto à composição da PAW. A concentração excessiva de ROS pode induzir estresse oxidativo, prejudicando a viabilidade das sementes e o desenvolvimento inicial das plântulas. Por outro lado, espécies como o nitrato são nutrientes essenciais para o crescimento vegetal. Em função disso, estudos têm buscado desenvolver métodos para ajustar a composição da PAW de forma otimizada para aplicações agrícolas. Um exemplo é o trabalho de Subramanian *et al.* (2021), que projetaram um reator de plasma capaz de maximizar

a produção de nitrato enquanto minimiza a formação de H_2O_2 . Essa pesquisa demonstra a possibilidade de controlar as espécies reativas presentes na água ativada por meio da regulação dos parâmetros experimentais, o que não só potencializa a eficiência agrícola da PAW, como também pode reduzir o consumo energético do processo, ampliando sua viabilidade prática (SUBRAMANIAN et al., 2021a).

Além de estimular a germinação, a PAW tem se mostrado eficaz na promoção do crescimento vegetal, atuando como uma fonte alternativa de nitrogênio. Os nitratos e nitritos formados durante a ativação do nitrogênio atmosférico pela descarga de plasma podem ser absorvidos pelas raízes e utilizados diretamente no metabolismo da planta, funcionando como fertilizantes naturais. Essa capacidade de fornecer nutrientes essenciais de forma não convencional contribui significativamente para o desenvolvimento vegetativo e a produtividade agrícola, principalmente em solos empobrecidos (TAKAHATA et al., 2015; TAKAKI et al., 2013).

Outro benefício relevante é a ação antimicrobiana da PAW, que ajuda a combater microrganismos patogênicos presentes em sementes e substratos (HERIANTO et al., 2021). Curiosamente, embora seja eficaz contra microrganismos, a PAW não apresenta toxicidade significativa às células vegetais. Essa seletividade decorre da diferença na estrutura da parede celular: enquanto a parede das bactérias é composta por peptidoglicano, altamente suscetível à peroxidação lipídica, a parede celular vegetal, formada por celulose e hemicelulose, oferece maior resistência à ação dos radicais livres (THIRUMDAS et al., 2018).

Além das aplicações diretamente relacionadas à germinação e crescimento, há estudos que apontam outros usos potenciais da PAW na agricultura e no pós-colheita. Xu *et al.* (2016), por exemplo, observaram que o tratamento de frutas e vegetais cortados com PAW reduziu a atividade das enzimas responsáveis pelo escurecimento enzimático, prolongando a aparência fresca dos alimentos. Esses resultados sugerem que a PAW pode ser útil em processos de conservação de alimentos vegetais minimamente processados (XU et al., 2016).

Apesar dos bons resultados, o uso da PAW na agricultura ainda precisa de melhorias para ser aplicado em larga escala. É importante desenvolver sistemas de ativação que gastem pouca energia e que consigam produzir PAW com composição controlada. Isso porque a quantidade de espécies reativas precisa ser adequada ao tipo de aplicação, como germinação, crescimento ou desinfecção (SUBRAMANIAN et

al., 2021a; THIRUMDAS et al., 2018). Pesquisas mostram que ajustar fatores como tensão, tempo de ativação e tipo de gás usado no reator pode ajudar a controlar melhor quais espécies são geradas, tornando o processo mais eficiente e barato (KONG et al., 2009; LAURITA et al., 2015; WONG et al., 2023). Com esses avanços, a PAW pode se tornar uma alternativa prática e acessível para o uso na agricultura (TAKAHATA et al., 2015).

2.8.3 Aplicações médicas da PAW

O potencial terapêutico e de esterilização da PAW tem sido intensamente explorado na área médica, com avanços significativos em diversas frentes (KAUSHIK et al., 2018; KIM; KIM, 2021). Suas propriedades antimicrobianas robustas, incluindo a capacidade de erradicar biofilmes resistentes (MAI-PROCHNOW et al., 2021), tornam a PAW uma candidata promissora para a esterilização de dispositivos médicos e superfícies sensíveis ao calor (MILHAN et al., 2022). A possibilidade de manter a atividade antimicrobiana por longos períodos sob armazenamento adequado (-80°C) é uma vantagem logística, embora a estabilidade das RONS seja um fator limitante em condições normais (MILHAN et al., 2022).

Na odontologia, a PAW demonstra aplicabilidade em múltiplas áreas. Além do tratamento de infecções orais comuns como cáries, periodontite e candidíase (MILHAN et al., 2022), investiga-se seu uso na desinfecção de canais radiculares (endodontia), no tratamento de peri-implantite, na descontaminação de superfícies de implantes e próteses, e até mesmo no clareamento dental, devido à ação oxidante das RONS (KIM; KIM, 2021; MILHAN et al., 2022). A capacidade de combater biofilmes orais é particularmente relevante para essas aplicações.

A PAW também exhibe propriedades que favorecem a cicatrização de feridas. As RONS em concentrações controladas podem estimular a proliferação de fibroblastos e queratinócitos, promover a angiogênese (formação de novos vasos sanguíneos) e modular a resposta inflamatória, acelerando o processo de reparo tecidual (KAUSHIK et al., 2018). Dispositivos comerciais baseados em plasma frio já são utilizados na prática clínica para tratamento de feridas (KIM; KIM, 2021).

Um dos campos mais promissores e intensamente pesquisados é a aplicação da PAW na terapia contra o câncer (KAUSHIK et al., 2018; VON WOEDTKE et al., 2025). Estudos *in vitro* e *in vivo* têm demonstrado que a PAW pode induzir

seletivamente a apoptose (morte celular programada) em diversos tipos de células cancerígenas, com menor toxicidade para células normais adjacentes (KAUSHIK et al., 2018; KIM; KIM, 2021; MUTTIAH et al., 2024). O mecanismo envolve o estresse oxidativo gerado pelas RONS dentro das células tumorais, que são frequentemente mais sensíveis a esse tipo de dano do que as células saudáveis. Apesar dos resultados encorajadores, a translação clínica enfrenta desafios, como a necessidade de padronização da produção da PAW, a compreensão completa dos mecanismos de ação e a garantia de segurança e eficácia em humanos (KIM; KIM, 2021; VON WOEDTKE et al., 2025).

Outras aplicações médicas potenciais incluem a promoção da coagulação sanguínea e o uso em medicina regenerativa, embora estas áreas ainda necessitem de mais investigação (KAUSHIK et al., 2018).

2.8.4 Aplicações na indústria alimentícia

Nos últimos anos, o plasma frio tem despertado grande interesse nos setores alimentício e agrícola, especialmente em aplicações voltadas à esterilização e conservação de alimentos. No entanto, a topografia irregular de muitos produtos alimentícios oferece esconderijos naturais para microrganismos, dificultando a eficácia do tratamento direto com plasma. Para contornar esse obstáculo, a PAW surge como uma alternativa promissora e vem sendo amplamente reconhecida como um método ambientalmente amigável e economicamente viável para a desinfecção microbiana, com aplicações potenciais não só nos campos já discutidos, como também no alimentício (KAUSHIK et al., 2018; THIRUMDAS et al., 2018).

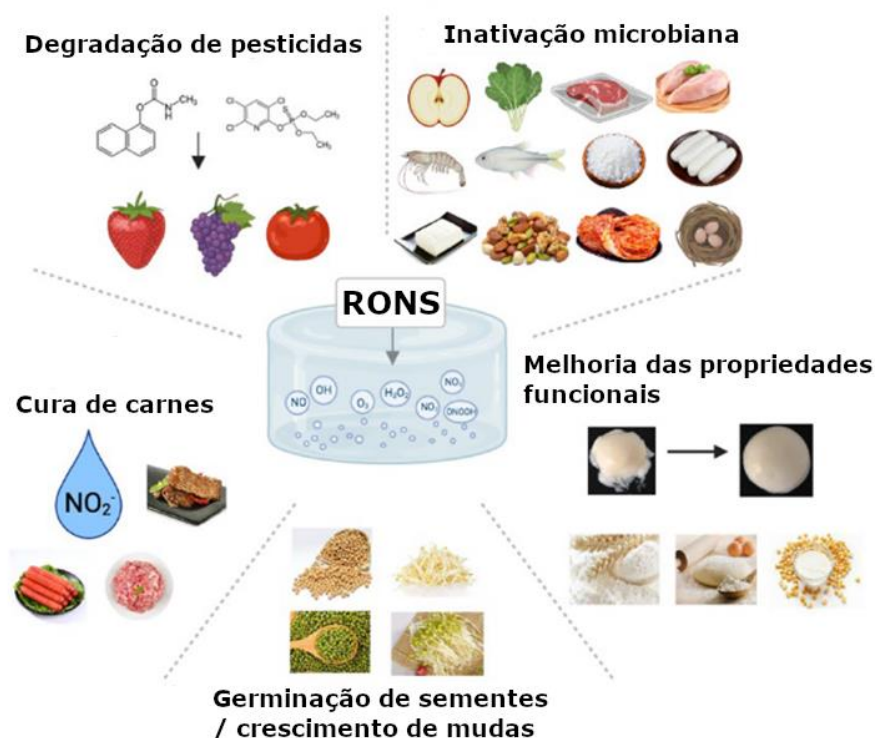
Em geral, estudos indicam que a aplicação da PAW não provoca alterações significativas na cor, sabor, aroma ou textura dos alimentos, especialmente quando utilizada de forma controlada. Em muitos casos, observou-se preservação ou até mesmo melhora de atributos como firmeza, elasticidade e aparência superficial, o que contribui para prolongar a vida útil dos produtos durante o armazenamento (GAO; FRANCIS; ZHANG, 2022; HADINOTO; NIEMIRA; TRUJILLO, 2023; HAN et al., 2023; PATRA et al., 2022; XIANG et al., 2022).

Esses efeitos positivos estão relacionados às interações das espécies reativas com componentes estruturais dos alimentos, como proteínas, lipídios e carboidratos. As proteínas podem sofrer desnaturação ou oxidação, resultando em

alterações na textura ou capacidade de retenção de água. Lipídios, por sua vez, são suscetíveis à peroxidação, o que pode afetar aroma e sabor, no entanto, compostos como NO e NO_2^- também atuam inibindo reações oxidativas indesejadas, especialmente em produtos de origem animal. Carboidratos podem ser modificados em termos de solubilidade e comportamento térmico, o que influencia diretamente a consistência de alimentos processados. Ainda, a PAW pode promover mudanças em parâmetros como pH, acidez, umidade e teor de sólidos solúveis, dependendo do tipo de alimento e das condições de aplicação. De modo geral, tais alterações são discretas e não comprometem a aceitabilidade dos produtos, tornando a PAW compatível com as exigências sensoriais do consumidor (HAN et al., 2023; TIAN et al., 2015; ZHAO et al., 2020b).

No contexto de sua aplicação antimicrobiana, a PAW tem sido testada com sucesso em uma ampla gama de alimentos, incluindo carnes, ovos, frutas, vegetais, cogumelos e alimentos processados (HAN et al., 2023). Em carnes e produtos cárneos, além da inativação de bactérias deteriorantes e patógenos, a PAW tem sido estudada como alternativa ao uso de aditivos sintéticos, como o NO_2^- , oferecendo potencial para aplicações na cura e conservação com menor impacto químico (HAN et al., 2023; JUNG et al., 2017). Em ovos, a lavagem com PAW demonstrou alta eficiência na redução de microrganismos na casca, ao mesmo tempo em que preserva a cutícula protetora e contribui para a manutenção da frescura durante o armazenamento (LIN et al., 2019).

Figura 18 — Aplicações da PAW nos setores alimentício e agrícola



Fonte: Adaptado de Han *et al*, 2023.

Na sanitização de frutas e vegetais, a PAW se destaca pela capacidade de reduzir a carga microbiana sem comprometer características sensoriais ou nutricionais. O tratamento pode inibir o escurecimento enzimático, por meio da inativação de enzimas como polifenoloxidase e peroxidase, além de preservar pigmentos naturais e retardar processos de degradação, como perda de firmeza ou alteração da coloração. A ação de compostos como H_2O_2 e NO_3^- também contribui para manter a integridade das células vegetais, estimular enzimas antioxidantes endógenas, (como superóxido dismutase e catalase), e preservar níveis de vitamina C e compostos fenólicos, o que reforça o valor nutricional dos alimentos minimamente processados (GUO *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2020; ZHAO; WANG; MA, 2021; ZHENG *et al.*, 2019).

Em alimentos processados e prontos para o consumo, como vegetais fermentados e produtos de soja, a PAW tem se mostrado eficaz na redução de microrganismos contaminantes, sem afetar significativamente atributos como pH, textura ou aparência. Esses resultados indicam que o tratamento pode ser integrado a etapas já existentes nos processos industriais, agregando valor sem demandar

mudanças drásticas na formulação dos produtos (CHOI et al., 2019; HAN et al., 2020; ZHAI et al., 2019).

Além do uso direto em alimentos, a PAW também tem sido aplicada com sucesso na higienização de superfícies em contato com alimentos, como equipamentos de aço inoxidável e materiais poliméricos. Sua ação sobre biofilmes e microrganismos aderidos contribui para a segurança microbiológica nos ambientes de processamento, reduzindo o risco de contaminação cruzada. Essa ação é atribuída à capacidade das RONS, como $\bullet\text{OH}$ e NO , de provocar danos oxidativos à estrutura celular microbiana, mesmo em superfícies inertes (KAMGANG-YOUBI et al., 2008; XIANG et al., 2022).

Apesar dos avanços, a aplicação da PAW em escala industrial ainda enfrenta limitações, como o baixo volume de produção, o uso de altas potências e a necessidade de longos tempos de contato para eficácia antimicrobiana. Questões relacionadas ao custo, à produtividade e à padronização dos sistemas ainda precisam ser superadas para sua ampla adoção, especialmente no setor de carnes (HADINOTO; NIEMIRA; TRUJILLO, 2023; HAN et al., 2023).

Ainda assim, a PAW representa uma alternativa inovadora às tecnologias convencionais, aliando ação antimicrobiana duradoura, menor impacto ambiental e manutenção das qualidades nutricionais e sensoriais dos alimentos. Sua versatilidade e potencial de aplicação colocam-na como uma ferramenta estratégica para o futuro da conservação de alimentos (THIRUMDAS et al., 2018; WONG et al., 2023).

2.8.5 Aplicações em nanotecnologia

A aplicação da PAW em nanotecnologia, embora ainda nascente, demonstra um potencial significativo. Chaves *et al.* (2023) exploraram o uso da PAW como co-reagente na deposição por camada atômica (ALD) de filmes finos de alumina (Al_2O_3). Este método, denominado PAW-ALD, demonstrou aprimorar o crescimento e a qualidade dos filmes de Al_2O_3 , otimizando sua estequiometria e reduzindo o teor de carbono (CHAVES et al., 2023). Outros estudos em nanotecnologia incluem o tratamento de nanopartículas de silício para melhorar suas propriedades e a síntese de nanopartículas de prata, utilizando as espécies reativas da PAW (CHAVES et al., 2023).

2.9 OUTRAS APLICAÇÕES

A PAW pode ser utilizada para aumentar o ponto de *Leidenfrost*, que é a temperatura na qual um líquido em contato com uma superfície muito quente forma uma camada de vapor isolante, impedindo o contato direto e o resfriamento eficiente. A PAW, ao modificar a tensão superficial da água, permite que o líquido permaneça em contato com superfícies mais quentes antes de evaporar completamente, melhorando a transferência de calor e a eficiência do resfriamento (LOW et al, 2023).

Outra aplicação da PAW é na degradação de substâncias perfluoroalquiladas e polifluoroalquiladas (PFAS), conhecidas como 'químicos eternos' devido à sua persistência no ambiente. A PAW, por meio de suas espécies reativas, pode quebrar as ligações carbono-flúor, que são extremamente estáveis, transformando os PFAS em compostos menos nocivos ou completamente inócuos (TOPOLOVEC et al., 2024).

3 DISCUSSÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

Esta seção apresenta uma discussão dos dados experimentais obtidos na ativação de água por plasma atmosférico (DBD), com foco na análise das variações de pH e na concentração de RONS sob diferentes condições. Considerando a natureza exploratória do estudo e a reprodutibilidade limitada de parte dos dados, a abordagem aqui adotada é predominantemente qualitativa, com ênfase na identificação de tendências e na correlação com a literatura científica.

Para melhor compreensão dos resultados, apresenta-se inicialmente uma descrição do aparato experimental utilizado, incluindo o reator DBD de placas paralelas, a fonte de alta tensão e o sistema de controle de temperatura. Caso haja dúvidas em relação a valores numéricos específicos de pH ou concentrações de espécies reativas mencionados ao longo desta seção, o leitor pode consultar o Apêndice A, onde se encontram reunidas todas as tabelas com os dados obtidos para as diferentes condições testadas.

3.1 APARATO EXPERIMENTAL

O reator utilizado neste trabalho consiste em uma descarga com barreira dielétrica (DBD) do tipo placas paralelas, operando em atmosfera ambiente sem fluxo adicional de gás. O eletrodo aterrado é constituído por uma malha de aço inoxidável com diâmetro de aproximadamente 85 mm, enquanto o eletrodo de alta tensão (HVAE) corresponde a um disco de alumínio com 68 mm de diâmetro. Entre eles encontra-se a barreira dielétrica, composta por uma placa de polietileno (PE) de 1 mm de espessura e 87 mm de diâmetro, que recobre completamente o eletrodo de alta tensão. O uso da malha metálica como eletrodo inferior favorece a difusão das espécies e da radiação emitida na região de plasma, promovendo uma interação mais eficiente com a superfície da água. Operando com ar atmosférico, o reator elimina a necessidade de suprimento de gás auxiliar, simplificando os requisitos experimentais, reduzindo custos e aumentando a praticidade de operação.

A sustentação do conjunto e a definição da distância entre o dielétrico e o eletrodo aterrado foram obtidas por meio de um *o-ring* circular, com 9,1 cm de diâmetro externo, 8,4 cm de diâmetro interno e 4 mm de espessura. Esse anel cria o

gap de aproximadamente 1 mm, no qual o plasma é formado durante a aplicação da descarga.

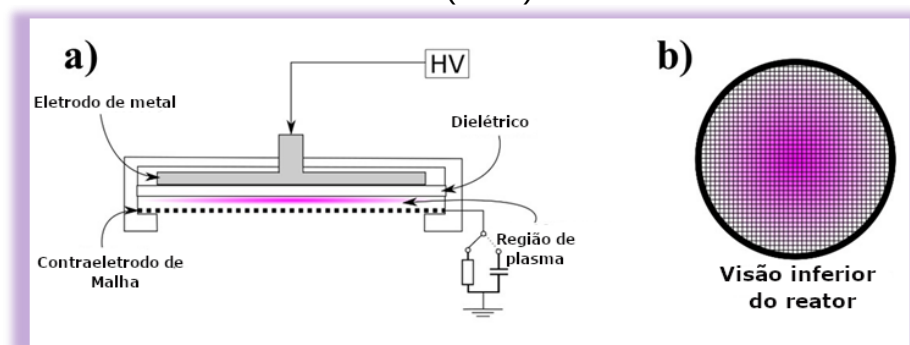
A montagem dos componentes, incluindo os eletrodos e a barreira dielétrica, é encapsulada em uma caixa cilíndrica projetada e produzida por impressão 3D, confeccionada em ácido polilático (PLA) por uma impressora 3D Creality Ender 3 32 Bits (Creality, Shenzhen, China). O uso da impressão 3D permitiu a fabricação precisa e personalizada dessas partes, garantindo praticidade, reprodutibilidade e precisão na montagem do sistema experimental.

A fonte de alta tensão utilizada foi a HF IBRAMED (Amparo, SP, Brasil), com capacidade nominal de até 15 kV de saída. A tensão efetiva aplicada durante as ativações foi estimada em $1,50 \pm 0,08$ kV, operando com um sinal em rajadas de oscilações de alta tensão com frequência de repetição de 60 Hz.

Para o controle da temperatura, foi desenvolvido um sistema baseado em uma serpentina de cobre conectada a um banho ultratermostático, com circulação contínua de água através de mangueiras revestidas por material isolante. A serpentina, moldada em formato circular, foi instalada de modo a criar uma cavidade de encaixe para a placa de Petri. Na região de apoio, a base da placa mantinha contato direto com o cobre, garantindo transferência térmica eficiente. Esse arranjo permitiu que a temperatura da água permanecesse estável durante todo o tempo de ativação com plasma.

A Figura 19 apresenta uma representação esquemática do reator utilizado, destacando os principais componentes e a região de formação do plasma.

Figura 19 — Representação esquemática do reator de descarga com barreira dielétrica (DBD)



Fonte: Chiappim *et al*, 2024.

Legenda: (a) Vista lateral do reator, indicando os principais componentes. (b) Visão inferior do reator, mostrando a região de formação do plasma.

3.2 EFEITO DO TEMPO DE ATIVAÇÃO NA ÁGUA A TEMPERATURA AMBIENTE

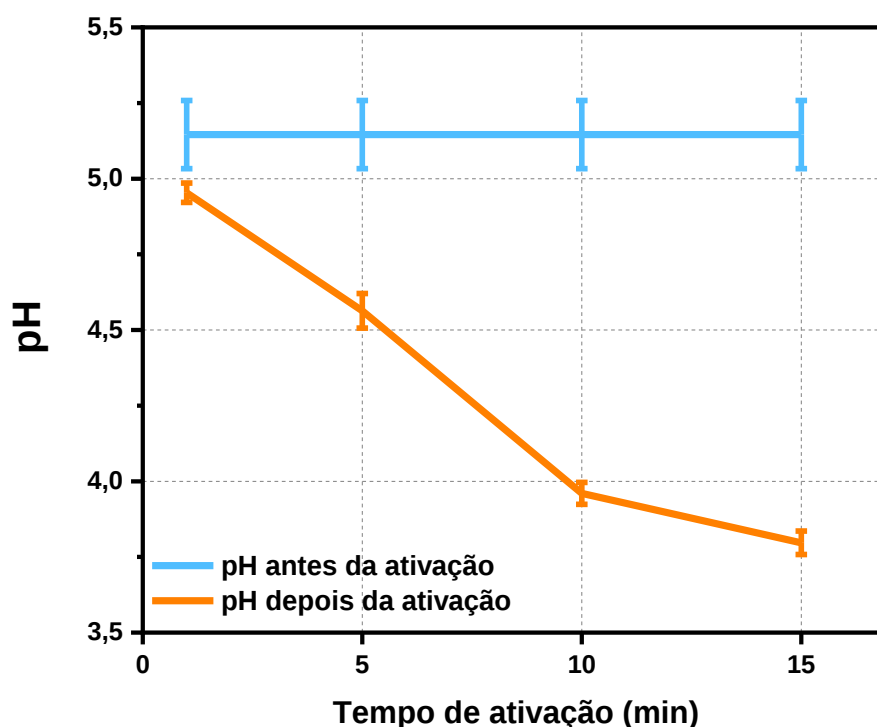
Os experimentos iniciais foram conduzidos com água deionizada (DI) a aproximadamente 25°C, variando o tempo de ativação do plasma entre 1, 5, 10 e 15 minutos. As medições de pH e as concentrações de RONS foram registradas para os diferentes intervalos de tempo de ativação.

3.2.1 Variação do pH com o tempo de ativação

A figura 20 mostra a tendência de diminuição do pH da água com o aumento do tempo de ativação. O pH inicial, em torno de 5, decresceu para valores próximos de 3,80 após 15 minutos de ativação. Observa-se que a queda é mais acentuada nos primeiros 5 minutos, tornando-se progressivamente menos intensa com o tempo. Esse comportamento, amplamente reportado na literatura, sugere a existência de um ponto de saturação, a partir do qual o pH da água tende a se estabilizar mesmo com o prolongamento da ativação. No entanto, no presente estudo, esse ponto não foi atingido, sendo apenas possível afirmar que ocorre em tempos de ativação superiores a 15 minutos.

A acidificação observada é um fenômeno bem documentado na literatura e é atribuída principalmente à formação de HNO_3 e HNO_2 na fase líquida, resultantes da dissolução de óxidos de nitrogênio (NO_x) gerados pelo plasma no ar atmosférico (BRUGGEMAN et al., 2016; OEHMIGEN et al., 2010; THIRUMDAS et al., 2018; ZHAO et al., 2020b).

Figura 20 — Variação do pH da água deionizada com o tempo de ativação por plasma a ~25 °C



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2.2 Formação de espécies reativas com o tempo de ativação

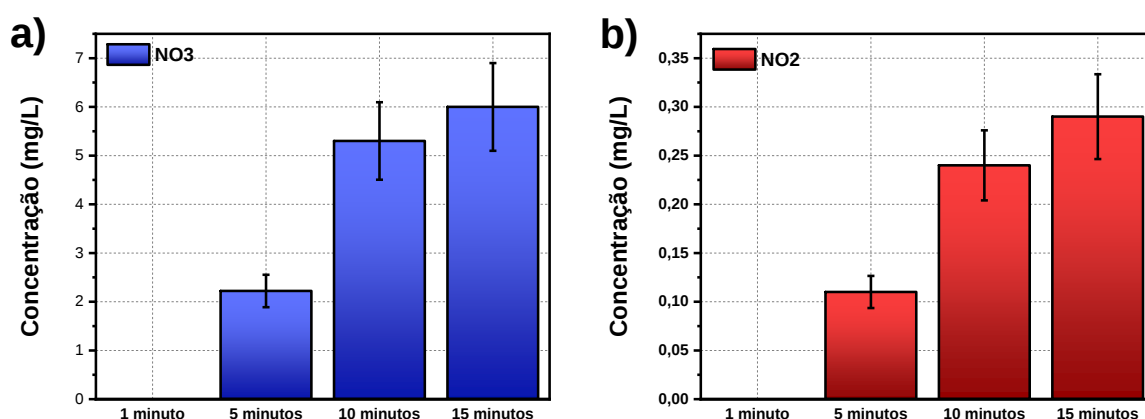
A análise das concentrações de RONS (Figura 21 abaixo) revela que a ativação do plasma a temperatura ambiente levou à formação de, ao menos NO_3^- , NO_2^- . A presença de O_3 foi detectado em concentrações muito baixas ou nulas na maioria das amostras, em concordância com estudos anteriores que relatam sua baixa estabilidade em meio aquoso e sua rápida degradação na presença de radicais hidroxila. Já as concentrações de NO_3^- e NO_2^- aumentaram com o tempo de ativação, contribuindo para a acidificação da água ativada, fenômeno também amplamente descrito na literatura (LAURITA et al., 2015, 2015; ZHAO et al., 2020b).

Nesse contexto Oehmigen *et al.* (2010) demonstraram que o aumento da tensão de descarga e do tempo de exposição pode elevar significativamente as concentrações dessas espécies. Em seus experimentos com plasma DBD operando em ar, atingiram concentrações de até 113 mg/L de NO_3^- e 1,5 mg/L de NO_2^- após 30 minutos de ativação, valores substancialmente superiores aos obtidos sob condições

menos energéticas ou com tempos mais curtos, como neste trabalho (OEHMIGEN et al., 2010).

Já a presença de H_2O_2 foi observada em concentrações estáveis ao longo de todos os períodos de ativação, indicando que não há geração adicional de H_2O_2 para a água DI ativada à temperatura ambiente. Considerando que sua formação ocorre principalmente pela recombinação de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) (WONG et al., 2023), a ausência de variação sugere que a geração desses radicais durante a ativação é mínima ou inexistente, que as condições do sistema não favorecem sua recombinação, ou ainda que os $\bullet\text{OH}$ estejam reagindo preferencialmente com outras espécies presentes.

Figura 21 — Concentração de espécies reativas em função do tempo de ativação da água a $\sim 25^\circ\text{C}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Legenda: gráfico a: concentração de nitrato; gráfico b: concentração de nitrito

3.3 EFEITO DA TEMPERATURA ELEVADA E OUTROS PARÂMETROS

Com o objetivo de investigar o impacto da temperatura sobre a acidificação da PAW, foram conduzidos experimentos com água deionizada aquecida a 50°C , mantida nessa condição durante 15 minutos de exposição à descarga DBD. Para avaliar possíveis influências da geometria dos eletrodos, foram testadas três configurações distintas, resumidas na Tabela 4.

Tabela 4 — Configurações experimentais utilizadas nas ativações da água deionizada a 50°C

Conjunto	Tipo de malha utilizada no eletrodo
----------	-------------------------------------

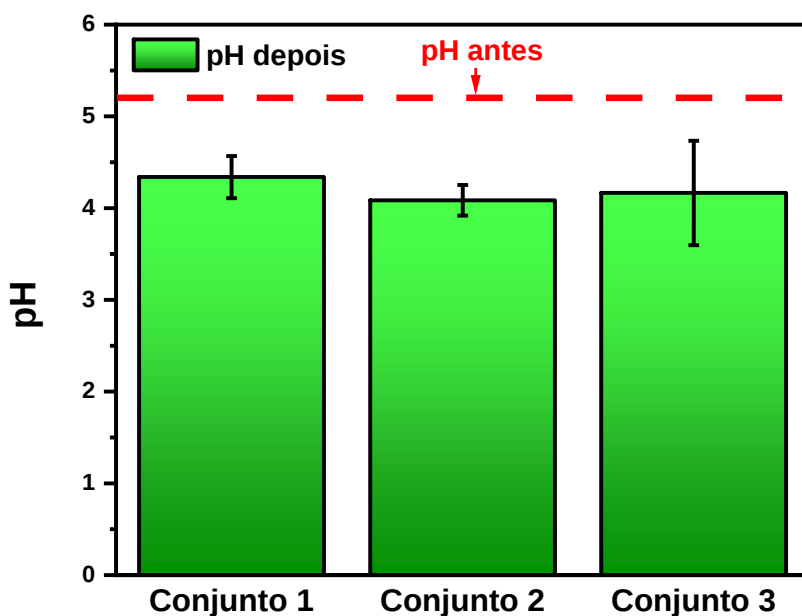
1	Malha de gramatura 20
2	Malha de gramatura 200
3	Malha de gramatura 100

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.1 Variação do pH a 50°C

A Figura 22 apresenta os valores médios de pH antes e depois da ativação da água a 50 °C, sob três diferentes condições experimentais. Em todos os conjuntos, observa-se uma diminuição clara do pH após 15 minutos de exposição ao plasma, indicando a formação de espécies ácidas, conforme discutido anteriormente. No entanto, o pH final variou pouco entre os conjuntos, sugerindo que o tipo de malha utilizado não exerceu influência significativa na acidificação da água nas condições testadas. Por outro lado, nota-se uma maior dispersão nos valores do Conjunto 3, associado à malha 100, indicando que, apesar da padronização dos parâmetros operacionais, ainda foram observadas variações entre amostras, possivelmente atribuídas a fatores externos como umidade ambiente ou à própria sensibilidade do sistema. Em comparação com os dados obtidos a 25 °C (onde o pH final médio foi de 3,80) a acidificação observada a 50 °C foi menos acentuada. Esse comportamento pode estar associado, a princípio, a uma menor solubilização de NO_x ou à ocorrência de rotas reacionais distintas em temperaturas mais elevadas. No entanto, para que essa hipótese possa ser confirmada, é necessário analisar a concentração e o perfil das espécies reativas formadas nessas condições.

Figura 22 — pH antes e depois da ativação para diferentes conjuntos de amostras de água ativada a plasma durante 15 minutos (água a ~50 °C)



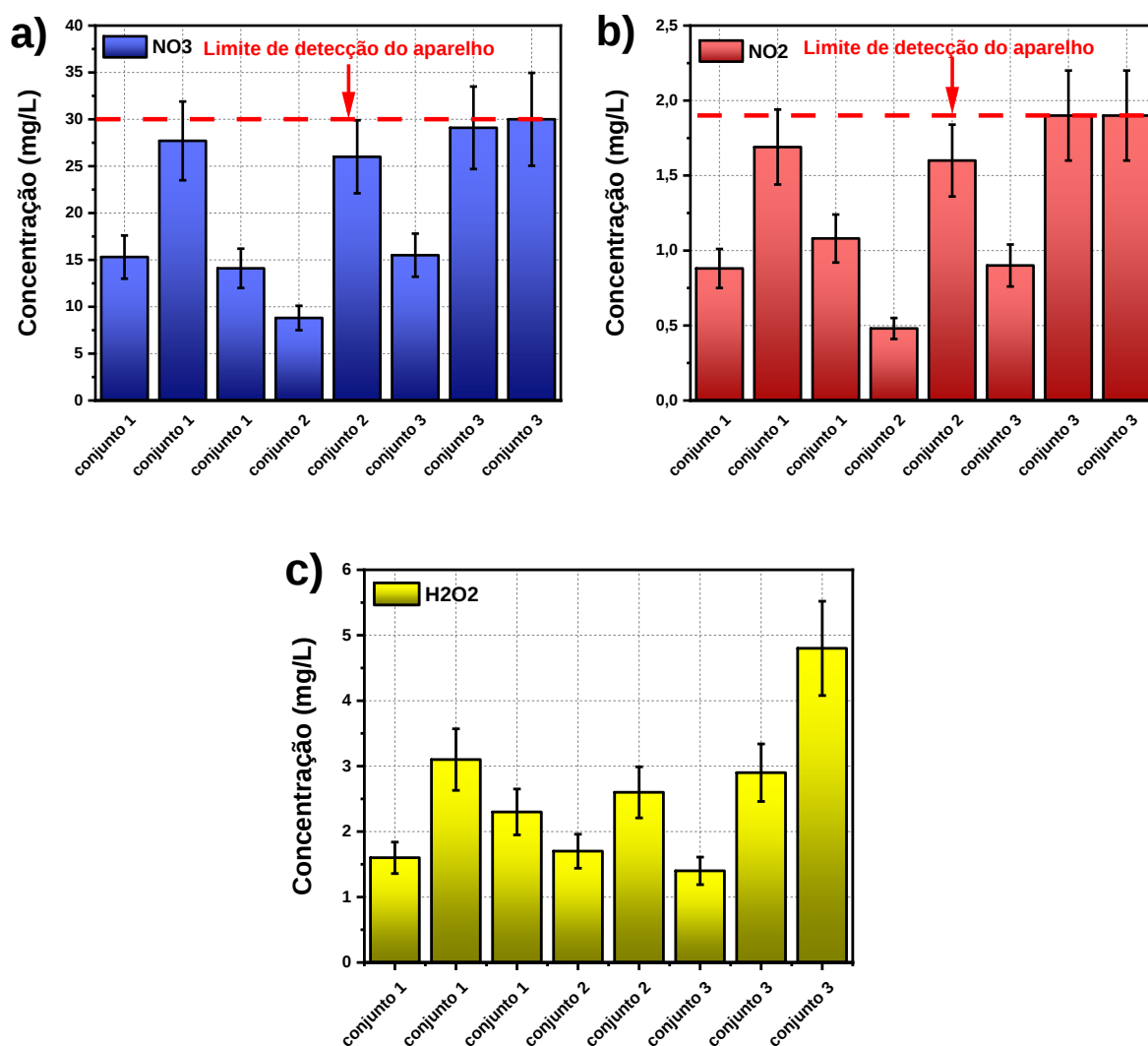
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.3.2 Formação de espécies reativas a 50°C

A Figura 23 mostra as concentrações de algumas das principais espécies reativas (NO_3^- , NO_2^- , H_2O_2) detectadas nas amostras de água ativada a 50 °C por 15 minutos, sob diferentes configurações experimentais. Observa-se que, em algumas amostras, as concentrações de nitrato e nitrito ultrapassaram os limites máximos de detecção do fotômetro utilizado, ≥ 30 mg/L para NO_3^- e $\geq 1,9$ mg/L para NO_2^- , impossibilitando a quantificação precisa desses valores.

De forma geral, observa-se um aumento nas concentrações de NO_3^- e NO_2^- em comparação com as amostras ativadas a 25 °C, cujos valores médios para 15 minutos foram de aproximadamente 6,0 mg/L para NO_3^- e 0,29 mg/L para NO_2^- (Ver figura 21).

Figura 23 — Concentração de espécies reativas para diferentes conjuntos de amostras de água ativada a plasma durante 15 minutos (água a ~50 °C)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Legenda: gráfico a: concentração de nitrato; gráfico b: concentrações de nitrito; gráfico c: concentrações de peróxido de hidrogênio

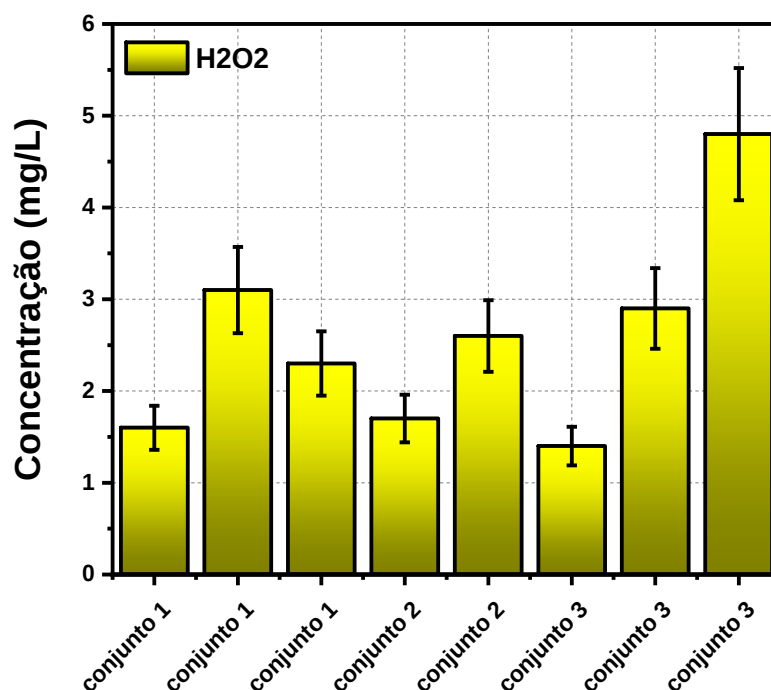
Esse aumento nas concentrações de NO_3^- e NO_2^- pode estar relacionado a uma maior formação ou estabilidade dessas espécies em temperaturas elevadas, mas também à conversão química de NO_2^- em NO_3^- mediada por agentes oxidantes como o H_2O_2 (WONG et al., 2023; ZHOU et al., 2020). No entanto, é importante destacar que a presença de H_2O_2 não foi uniforme entre as amostras: enquanto a maioria apresentou concentrações próximas a 1,6 mg/L (valor semelhante ao encontrado na água DI não ativada) níveis mais elevados, entre 4,4 e 4,8 mg/L (conforme ilustrado na Figura 24), foram observados apenas sob condições experimentais específicas. Em particular, em amostras ativadas com eletrodo de malha 100. Isso indica que a geração de peróxido de hidrogênio pode depender

fortemente das condições de operação do sistema, como a estabilidade da descarga e a geometria do eletrodo. Além disso, é possível que uma fração significativa do H_2O_2 gerado tenha sido consumida antes da medição, participando de reações com NO_2^- e outras espécies reativas. Assim, a concentração residual de H_2O_2 medida nas amostras não reflete necessariamente sua produção total, o que limita a correlação direta entre os níveis de H_2O_2 detectados e o acúmulo de nitrato.

Adicionalmente, estudos demonstram que a presença de vapor d'água, seja proveniente do gás de alimentação ou da evaporação da amostra líquida, pode favorecer a formação de H_2O_2 até certo limite. A partir desse ponto, o excesso de vapor começa a interferir na estabilidade da descarga, reduzindo a eficiência da geração de espécies reativas (WONG et al., 2023).

Perdas de massa também foram observadas a $25\text{ }^\circ\text{C}$ (tipicamente em torno de 0,5 g) mas os efeitos mais pronunciados ocorreram a $50\text{ }^\circ\text{C}$, onde a perda entre 1,5 g e 2,9 g representou menos de 6% do volume inicial. Embora essa variação de massa seja desprezível para explicar as diferenças de concentração de espécies reativas por simples redução de volume, a evaporação adicional pode ter influenciado indiretamente o regime da descarga ao aumentar localmente a umidade relativa do ar. Esse fenômeno pode ajudar a explicar por quê, mesmo sob condições com maior geração aparente de NO_3^- e NO_2^- , as concentrações de H_2O_2 permaneceram relativamente baixas ou inconsistentes em algumas amostras (MORABIT et al., 2021).

Figura 24 — Concentração de HNO₂ para diferentes conjuntos de amostras de água ativada a plasma durante 15 minutos (água a ~50 °C)



Fonte: Elaborado pelo autor

Em comparação com estudos anteriores, as concentrações de RONS obtidas neste trabalho encontram-se em uma faixa intermediária. Judée *et al.* (2018), por exemplo, observaram em PAW ativada por plasma DBD concentrações de H₂O₂ em torno de 1,85 mM (aproximadamente 63 mg/L), enquanto Subramanian *et al.* (2021) relataram valores entre 10 e 30 mg/L. Essas variações entre estudos podem estar relacionadas a diferenças nas configurações experimentais adotadas, como tipo de eletrodo, tempo de ativação e temperatura. Embora o tipo de malha utilizada não tenha causado alterações expressivas no pH final das amostras nas condições testadas, é importante destacar que a configuração dos eletrodos, incluindo sua geometria e material, pode influenciar significativamente a composição química da água ativada, especialmente no que diz respeito às espécies reativas geradas (JUDÉE *et al.*, 2018a; SUBRAMANIAN *et al.*, 2021b).

O aumento nas concentrações de nitrato e nitrito a 50 °C sugere que a temperatura pode favorecer a formação, estabilidade ou solubilização dessas espécies, ou ainda reduzir sua taxa de decomposição. No entanto, esse resultado contradiz o que é reportado na literatura, que aponta para uma redução na solubilidade

de NO_x e uma redução na formação de espécies nitrogenadas reativas com o aumento da temperatura. (HADINOTO; NIEMIRA; TRUJILLO, 2023).

Essa aparente contradição entre o aumento das concentrações de RONS e a menor acidificação a 50°C , em desacordo com a expectativa de menor solubilidade de NO_x em temperaturas elevadas, pode ser compreendida ao se considerar a complexidade da química da água ativada por plasma. A temperatura influencia a cinética e os equilíbrios químicos na PAW, podendo alterar os mecanismos de reação e a estabilidade das espécies ácidas. Por exemplo, a produção de HNO_3 na PAW é uma reação de ordem zero e dependente da temperatura (BERLATTO; KHALAF, 2024). ou seja, sua velocidade é constante em relação à concentração dos reagentes, mas ainda assim pode ser acelerada pelo aumento da temperatura. Com isso, rotas reacionais podem ser reconfiguradas, resultando em um balanço ácido-base menos agressivo, mesmo na presença abundante de RONS.

Além disso, é crucial reconhecer que a presença de altas concentrações de RONS na PAW não implica necessariamente em acidificação severa. A acidificação depende da formação de ácidos e da liberação de íons H^+ , mas a complexidade da PAW permite cenários onde RONS estão presentes em altas concentrações sem uma queda drástica de pH. Um exemplo notável é o estudo de Punith *et al.* (2022), que demonstrou a capacidade de gerar PAW com pH neutro (7.0) mesmo com concentrações elevadas de nitrito (650 mg/L) e peróxido de hidrogênio (215 mg/L). Esse estudo valida que a relação entre a concentração total de RONS e o pH não é linear (PUNITH *et al.*, 2022). Portanto, a maior concentração de RONS a 50°C não contradiz a menor acidificação, mas sim reflete uma química mais complexa onde a temperatura modula a forma e o impacto dessas espécies no pH.

Dentre as diferentes condições avaliadas a 50°C , destaca-se o uso da malha 100 associada ao controle de corrente, que resultou nas maiores concentrações de RONS, conforme evidenciado por valores *HIGH* e pela presença consistente de H_2O_2 . Esse desempenho superior reforça o potencial dessa configuração para otimizar a geração de espécies reativas, apesar da variabilidade observada. Para uma análise complementar da acidez e possível HNO_2 , a seção seguinte apresenta os resultados de espectroscopia UV-Vis.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESAFIOS DE REPRODUTIBILIDADE

Os dados experimentais apresentados demonstram que a ativação de água por plasma atmosférico (DBD) é um processo complexo, influenciado por diversos parâmetros como tempo de ativação, temperatura da água e configurações do reator (tipo de malha do eletrodo e controle de corrente). A acidificação da água e a formação de RONS (nitrato, nitrito e peróxido de hidrogênio) foram consistentemente observadas, corroborando a literatura científica que descreve a capacidade do plasma de gerar espécies reativas em líquidos (ZHOU et al., 2020).

No entanto, a baixa reprodutibilidade entre as amostras observada neste estudo representa um desafio significativo. Essa variabilidade pode ser atribuída a múltiplos fatores, incluindo pequenas flutuações na umidade e composição do ar ambiente, variações na potência do plasma, na geometria da descarga, ou até mesmo na preparação das amostras e na calibração dos equipamentos de medição (ANDERSON et al., 2016; BRUGGEMAN; LEYS, 2009). A sensibilidade dos sistemas de plasma a pequenas perturbações é um aspecto conhecido na pesquisa de plasma, e a otimização e padronização rigorosa dos parâmetros experimentais são cruciais para alcançar resultados consistentes e reprodutíveis (BRUGGEMAN; LEYS, 2009).

Apesar dos desafios de reprodutibilidade, os dados fornecem *insights* valiosos sobre as tendências gerais na formação de RONS e na variação do pH, indicando que a manipulação de parâmetros como tempo de ativação e temperatura pode influenciar a composição química da água ativada por plasma. A observação de concentrações mais elevadas de nitrato e nitrito a 50°C, por exemplo, sugere um potencial para otimizar a produção de espécies específicas para aplicações desejadas. Diversas dessas amostras apresentaram leituras acima dos limites máximos de detecção do fotômetro utilizado neste estudo (30 mg/L para NO_3^- e 1,8 mg/L para nitrito NO_2^-) sendo automaticamente registradas como *HIGH*. Essa limitação impede a quantificação precisa das concentrações de RONS nessas condições, dificultando comparações mais detalhadas entre os diferentes conjuntos experimentais. Assim, os dados rotulados como *HIGH* indicam um limite inferior estimado, mas não revelam a real magnitude da produção dessas espécies, o que representa mais um fator de incerteza a ser considerado na avaliação da reprodutibilidade e da eficácia do processo de ativação. Ainda assim, a ocorrência dessas leituras reforça a hipótese de que ajustes precisos no sistema, como o tipo de

malha do eletrodo e o controle de corrente, podem aumentar de forma significativa a geração de RONS.

Além das variações na produção de espécies reativas, observou-se também perda de massa nas amostras durante o processo de ativação, atribuída à evaporação da água. Essa perda foi quantificada a partir da diferença entre o peso total do sistema (béquer + água) antes e depois da exposição ao plasma, considerando o peso do béquer individualmente. A evaporação foi proporcional ao tempo de ativação e à temperatura, sendo mínima nas ativações de 1 minuto a temperatura ambiente (com perdas médias de aproximadamente 0,5 g) e mais acentuada nas ativações a 50 °C por 15 minutos. Nestas últimas, a maior evaporação está associada à elevação da temperatura da água, mantida por um dispositivo externo independente do sistema de plasma. As perdas variaram entre 1,5 g e 2,9 g, dependendo da configuração experimental, sendo os maiores valores observados no Conjunto 3.

Essa evaporação poderia, em princípio, impactar diretamente a concentração final de espécies reativas nas amostras, resultando em um aumento aparente das concentrações devido à redução de volume. No entanto, mesmo no pior cenário, com perdas próximas a 2,9 g, isso representa menos de 6% do volume inicial de 50 mL. Assim, é razoável concluir que a evaporação, por si só, não justifica a variabilidade significativa observada nas concentrações de RONS e nos valores de pH das amostras tratadas a 50 °C. É mais provável que essa variabilidade decorra de uma combinação de fatores associados ao próprio processo de geração do plasma, como flutuações na corrente elétrica, instabilidades na descarga e alterações locais nas condições da interface gás-líquido ao longo do tempo de tratamento. Segundo Pang *et al.* (2025), mudanças nessas condições — incluindo o acúmulo de espécies reativas na fase gasosa, modificações de pH e efeitos térmicos — podem afetar significativamente o perfil da descarga e a dinâmica de transferência de espécies entre as fases. Assim, ainda que a evaporação tenha sido modesta, seu impacto indireto sobre o regime de descarga não pode ser descartado como um dos elementos que contribuíram para as diferenças entre amostras (PANG *et al.*, 2022).

Para futuras investigações, seria fundamental implementar um controle mais rigoroso dos parâmetros experimentais, incluindo monitoramento contínuo da potência do plasma, temperatura e umidade ambiente. Além disso, a realização de um maior número de repetições e a aplicação de métodos estatísticos robustos seriam

essenciais para quantificar a variabilidade e identificar os fatores mais críticos que afetam a reprodutibilidade dos resultados. A compreensão aprofundada desses fatores permitirá o desenvolvimento de sistemas de ativação de água por plasma mais eficientes e confiáveis para diversas aplicações.

REFERÊNCIAS

- AGHDAM, A. C. **Fundamental understanding of plasma discharge formation in liquid and multiphase configurations through multiphysics modeling**. 2020. 148f. Thesis (Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering) - College of Engineering and Computing, University of South Carolina, Columbia, 2020. Disponível em: https://scholarcommons.sc.edu/cgi/viewcontent.cgi?params=/context/etd/article/6854/&path_info=CharchiAghdam_sc_0202A_16993.pdf. Acesso em: 19 jul. 2025.
- AKOLKAR, R.; SANKARAN, R. M. Charge transfer processes at the interface between plasmas and liquids. **Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films**, New York, v. 31, n. 5, p. 050811, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1116/1.4810786>. Acesso em: 24 jun. 2025
- ANDERSON, C. E.; CHA, N. R.; LINDSAY, A. D.; CLARK, D. S.; GRAVES, D. B. The role of interfacial reactions in determining plasma-liquid chemistry. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, New York, v. 36, n. 6, p. 1393–1415, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11090-016-9742-1>. Acesso em: 24 jun. 2025
- BAI, Y.; MUHAMMAD, A. I.; HU, Y.; KOSEKI, S.; LIAO, X.; CHEN, S.; YE, X.; LIU, D.; DING, T. Inactivation kinetics of *Bacillus cereus* spores by plasma activated water. **Food Research International**, Ottawa, v. 131, p. 109041, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109041>. Acesso em: 3 jun. 2025.
- BATAK, I.; DEVIĆ, M.; GIBAL, Z.; GRUBIŠIĆ, D.; POFF, K. L.; KONJEVIĆ, R. The effects of potassium nitrate and NO-donors on phytochrome A- and phytochrome B-specific induced germination of *Arabidopsis thaliana* seeds. **Seed Science Research**, Wallingford, v. 12, n. 4, p. 253–259, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1079/SSR2002118>. Acesso em: 9 jul. 2025
- BECKER, K. H. (ed.). **Non-equilibrium air plasmas at atmospheric pressure**. Bristol: Institute of Physics, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781482269123>. Acesso em: 16 jul. 2025
- BERLATTO, É.; KHALAF, P. Exploring energy-efficient techniques and chemical kinetics in reactive nitrogen species production with ambient air plasma for plasma-activated water. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 35, n. 7, p. e-20240009, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20240009>. Acesso em: 21 jul. 2025.
- BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of plasma physics**. New York: Pergamon Press, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4030-1>. Acesso em: 16 jul. 2025
- BOEHM, D.; HESLIN, C.; CULLEN, P. J.; BOURKE, P. Cytotoxic and mutagenic potential of solutions exposed to cold atmospheric plasma. **Scientific Reports**,

London, v. 6, p. 21464, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep21464>. Acesso em: 18 jun. 2025.

BOGAERTS, A. The glow discharge: an exciting plasma! **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, London, v. 14, n. 9, p. 1375–1384, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/A900772E>. Acesso em: 27 fev. 2025.

BOGAERTS, A.; NEYTS, E.; GIJBELS, R.; VAN DER MULLEN, J. Gas discharge plasmas and their applications. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, Amsterdam, v. 57, n. 4, p. 609–658, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00406-2](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00406-2). Acesso em: 7 set. 2024.

BOGAERTS, A.; TU, X.; WHITEHEAD, J. C.; CENTI, G.; LEFFERTS, L.; GUAITELLA, O.; AZZOLINA-JURY, F.; KIM, H.-H.; MURPHY, A. B.; SCHNEIDER, W. F.; NOZAKI, T.; HICKS, J. C.; ROUSSEAU, A.; THEVENET, F.; KHACEF, A.; CARREON, M. The 2020 plasma catalysis roadmap. **Journal of Physics D: Applied Physics**, London, v. 53, n. 44, p. 443001, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9048>. Acesso em: 16 jul. 2025.

BORCIA, G.; ANDERSON, C. A.; BROWN, N. M. D. The surface oxidation of selected polymers using an atmospheric pressure air dielectric barrier discharge: Part II. **Applied Surface Science**, North-Holland, v. 225, n. 1–4, p. 186–197, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2003.10.002>. Acesso em: 29 mar. 2025.

BOULOS, M. I.; FAUCHAIS, P.; PFENDER, E. **Thermal plasmas**. New York: Springer, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1337-1>. Acesso em: 16 jul. 2025.

BRADU, C.; KUTASI, K.; MAGUREANU, M.; PUAČ, N.; ŽIVKOVIĆ, S. Reactive nitrogen species in plasma-activated water: generation, chemistry and application in agriculture. **Journal of Physics D: Applied Physics**, London, v. 53, n. 22, p. 223001, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab795a>. Acesso em: 8 jul. 2025.

BRANDENBURG, R. Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments. **Plasma Sources Science and Technology**, Bristol, v. 26, n. 5, p. 053001, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa6426>. Acesso em: 15 set. 2024.

BRISSET, J.-L.; BENSTAALI, B.; MOUSSA, D.; FANMOE, J.; NJOYIM-TAMUNGANG, E. Acidity control of plasma-chemical oxidation: applications to dye removal, urban waste abatement and microbial inactivation. **Plasma Sources Science and Technology**, Bristol, v. 20, n. 3, p. 034021, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/20/3/034021>. Acesso em: 17 jul. 2025.

BRUGGEMAN, P. J.; KUSHNER, M. J.; LOCKE, B. R.; GARDENIERS, J. G. E.; GRAHAM, W. G.; GRAVES, D. B.; HOFMAN-CARIS, R. C. H. M.; MARIC, D.; REID, J. P.; CERIANI, E.; FERNANDEZ RIVAS, D.; FOSTER, J. E.; GARRICK, S. C.;

GORBANEV, Y.; HAMAGUCHI, S.; IZA, F.; JABLONOWSKI, H.; KLIMOVA, E.; KOLB, J.; KRCMA, F.; LUKES, P.; MACHALA, Z.; MARINOV, I.; MARIOTTI, D.; MEDEDOVIC THAGARD, S.; MINAKATA, D.; NEYTS, E. C.; PAWLAT, J.; PETROVIC, Z. L.; PFLIEGER, R.; REUTER, S.; SCHRAM, D. C.; SCHRÖTER, S.; SHIRAIWA, M.; TARABOVÁ, B.; TSAI, P. A.; VERLET, J. R. R.; VON WOEDTKE, T.; WILSON, K. R.; YASUI, K.; ZVEREVA, G. Plasma-liquid interactions: a review and roadmap. **Plasma Sources Science and Technology**, Bristol, v. 25, n. 5, p. 053002, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>. Acesso em: 31 ago. 2024.

BRUGGEMAN, P.; LEYS, C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. **Journal of Physics D: Applied Physics**, London, v. 42, n. 5, p. 053001, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/5/053001>. Acesso em: 31 ago. 2024.

CAVENDISH, H. XXIII. Experiments on air. **Royal Society Publishing**, v. 75, p. 372–384, 1785. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstl.1785.0023>. Acesso em: 12 jul. 2025.

CHAPMAN, B.; VOSSEN, J. L. Glow discharge processes: sputtering and plasma etching. **Physics Today**, New York, v. 34, n. 7, p. 62, 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.2914660>. Acesso em: 12 jul. 2025.

CHAVES, J.; CHIAPPIM, W.; KARNOPP, J.; NETO, B.; LEITE, D.; SILVA SOBRINHO, A.; PESSOA, R. Novel energetic co-reactant for thermal oxide atomic layer deposition: the impact of plasma-activated water on Al₂O₃ film growth. **Nanomaterials**, Basel, v. 13, n. 24, p. 3110, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano13243110>. Acesso em: 10 jun. 2025.

CHEN, F. F. **Introduction to plasma physics and controlled fusion**. New York: Springer, 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5595-4>. Acesso em: 15 jun. 2025.

CHIAPPIM, W.; KODAIRA, F. V. P.; CASTRO, G. F. S.; SILVA, D. M.; TAVARES, T. F.; ALMEIDA, A. C. P. L.; LEAL, B. H. S.; QUADE, A.; KOGA-ITO, C. Y.; KOSTOV, K. G. Proposing an affordable plasma device for polymer surface modification and microbial inactivation. **Molecules**, Basel, v. 29, n. 17, p. 4270, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules29174270>. Acesso em: 3 out. 2025.

CHOI, E. J.; PARK, H. W.; KIM, S. B.; RYU, S.; LIM, J.; HONG, E. J.; BYEON, Y. S.; CHUN, H. H. Sequential application of plasma-activated water and mild heating improves microbiological quality of ready-to-use shredded salted kimchi cabbage (*Brassica pekinensis* L.). **Food Control**, Oxford, v. 98, p. 501–509, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.12.007>. Acesso em: 10 jun. 2025.

CRICHTON, B. H. **Gas discharge physics**. London: Institution of Electrical Engineers, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/ic:19960997>. Acesso em: 27 fev. 2025.

DEEPAK, G. D. Industrial applications of thermal plasmas: review. **International Journal of Multiphysics**, Narvik, v. 18, n. 1s, p. 01-16, 2024. Disponível em: <https://themultiphysicsjournal.com/index.php/ijm/article/view/914>. Acesso em: 16 jul. 2025.

DEL RÍO, L. A. ROS and RNS in plant physiology: an overview. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 66, n. 10, p. 2827–2837, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erv099>. Acesso em: 8 jul. 2025.

DOLEZALOVA, E.; LUKES, P. Membrane damage and active but nonculturable state in liquid cultures of *Escherichia coli* treated with an atmospheric pressure plasma jet. **Bioelectrochemistry**, Lausanne, v. 103, p. 7–14, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2014.08.018>. Acesso em: 8 jul. 2025.

SANTOS, A. L. R.; HONDA, R.; SANTOS, D. C. R.; KOSTOV, K. G. Caracterização elétrica de um reator de descarga por barreira dielétrica e aplicação no tratamento de madeiras. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, Bauru, v. 26, n. 4, p. 181-185, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.17563/rbav.v26i4.247>. Acesso em: 14 fev. 2025.

EL-MAAROUF-BOUTEAU, H.; BAILLY, C. Oxidative signaling in seed germination and dormancy. **Plant Signaling and Behavior**, Austin, v. 3, n. 3, p. 175–182, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.4161/psb.3.3.5539>. Acesso em: 3 jun. 2025.

ESZTERMANN, A.; LÖWEN, H. Colloidal Brazil-nut effect in sediments of binary charged suspensions. **Europhysics Letters (EPL)**, Bristol, v. 68, n. 1, p. 120–126, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1209/epl/i2004-10168-7>. Acesso em: 16 jul. 2025.

FAN, W.; SHENG, Z.; DONG, L.; LIU, F.; ZHONG, X.; CUI, Y.; HAO, F.; DU, T. Formation of side discharges in dielectric barrier discharge. **Scientific Reports**, London, v. 7, p. 8368, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08470-4>. Acesso em: 11 jul. 2025.

FELIX, V.; KLUTE, D. **Characterization of dielectric barrier discharges for analytical applications**. 2019. 110 f. Thesis (Doctor rerum naturalium in Physics) - Fakultät Physik, Technische Universität Dortmund, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-20612>. Acesso em: 31 ago. 2024.

FRAZIER, W. C.; WESTHOFF, D. C. **Microbiology of foods**. 4. ed. New York: McGraw Hill, 1988. Disponível em: <https://www.vivekanandcollege.ac.in/uploads/dptmicrobiology/ebooks/food-microbiology-by-wc-frazier-.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2025.

FRIDMAN, A. A. **Plasma chemistry**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546075>. Acesso em: 2 set. 2024.

GAN, Z.; ZHANG, Y.; GAO, W.; WANG, S.; LIU, Y.; XIAO, Y.; ZHUANG, X.; SUN, A.; WANG, R. Effects of nonthermal plasma-activated water on the microbial sterilization

and storage quality of blueberry. **Food Bioscience**, Amsterdam, v. 49, p. 101857, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101857>. Acesso em: 8 jul. 2025.

GAO, Y.; FRANCIS, K.; ZHANG, X. Review on formation of cold plasma activated water (PAW) and the applications in food and agriculture. **Food Research International**, Ottawa, v. 157, p. 111246, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111246>. Acesso em: 9 jul. 2025.

GAUNT, L. F.; BEGGS, C. B.; GEORGHIOU, G. E. Bactericidal action of the reactive species produced by gas-discharge nonthermal plasma at atmospheric pressure: a review. **IEEE Transactions on Plasma Science**, New York, v. 34, n. 4, p. 1257–1269, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPS.2006.878381>. Acesso em: 16 fev. 2025.

GEORGE, A.; SHEN, B.; CRAVEN, M.; WANG, Y.; KANG, D.; WU, C.; TU, X. A Review of non-thermal plasma technology: a novel solution for CO₂ conversion and utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, London, v. 135, p. 109702, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109702>. Acesso em: 18 jul. 2025.

GOLDSTON, R. J.; RUTHERFORD, P. H. **Introduction to plasma physics**. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0022377898219696>. Acesso em: 16 jul. 2025.

GUBKIN, J. Electrolytische metallabscheidung an der freien oberfläche einer salzlösung. **Annalen der Physik**, Berlin, v. 268, n. 9, p. 114–115, 1887. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/andp.18872680909>. Acesso em: 12 jul. 2025.

GULATI, P.; PAL, N.; KUMAR, M.; PRAKASH, R.; SRIVASTAVA, V.; VYAS, V. Diagnostic of plasma discharge parameters in helium filled dielectric barrier discharge. **Journal of Trends in Applied Physics**, Witney, v. 6, n. 1, p. 35, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2251-7235-6-35>. Acesso em: 15 set. 2024.

GUO, J.; HUANG, K.; WANG, X.; LYU, C.; YANG, N.; LI, Y.; WANG, J. Inactivation of yeast on grapes by plasma-activated water and its effects on quality attributes. **Journal of Food Protection**, Des Moines, v. 80, n. 2, p. 225–230, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-16-116>. Acesso em: 10 jul. 2025.

GUO, J.; WANG, J.; XIE, H.; JIANG, J.; LI, C.; LI, W.; LI, L.; LIU, X.; LIN, F. Inactivation effects of plasma-activated water on *Fusarium graminearum*. **Food Control**, Oxford, v. 134, p. 108683, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108683>. Acesso em: 8 jul. 2025.

HADINOTO, K.; NIEMIRA, B. A.; TRUJILLO, F. J. A review on plasma-activated water and its application in the meat industry. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Chicago, v. 22, n. 6, p. 4993–5019, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13250>. Acesso em: 6 mar. 2025.

HAN, J.-Y.; SONG, W.-J.; KANG, J. H.; MIN, S. C.; EOM, S.; HONG, E. J.; RYU, S.; KIM, S. B.; CHO, S.; KANG, D.-H. Effect of cold atmospheric pressure plasma-activated water on the microbial safety of Korean rice cake. **LWT**, London, v. 120, p. 108918, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108918>. Acesso em: 10 jul. 2025.

HAN, Q. Y.; WEN, X.; GAO, J. Y.; ZHONG, C. S.; NI, Y. Y. Application of plasma-activated water in the food industry: a review of recent research developments. **Food Chemistry**, London, v. 405, p. 134797, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134797>. Acesso em: 27 maio 2025.

HE, Y.; SHEN, J.; ALHARBI, N. S.; CHEN, C. Volatile organic compounds degradation by nonthermal plasma: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 30, p. 32123 - 32152, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25524-5>. Acesso em: 17 fev. 2025.

HERIANTO, S.; HOU, C.; LIN, C.; CHEN, H. Nonthermal plasma-activated water: a comprehensive review of this new tool for enhanced food safety and quality. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Chicago, v. 20, n. 1, p. 583–626, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12667>. Acesso em: 27 maio 2025.

HOEBEN, W. F. L. M.; VAN OOIJ, P. P.; SCHRAM, D. C.; HUISKAMP, T.; PEMEN, A. J. M.; LUKEŠ, P. On the possibilities of straightforward characterization of plasma activated water. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, New York, v. 39, n. 3, p. 597–626, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11090-019-09976-7>. Acesso em: 8 jul. 2025.

HÖFT, H.; BECKER, M. M.; KETTLITZ, M.; DAP, S.; NAUDÉ, N.; BRANDENBURG, R.; WELTMANN, K. D. Exploring the mechanisms leading to diffuse and filamentary modes in dielectric barrier discharges in N₂ with N₂O admixtures. **European Physical Journal D: Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics**, Les Ulis, v. 77, p. 35, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-023-00601-z>. Acesso em: 15 set. 2025.

ISLAM, S.; OMAR, F. B.; SAJIB, S. A.; ROY, N. C.; REZA, A.; HASAN, M.; TALUKDER, M. R.; KABIR, A. H. Effects of LPDBD plasma and plasma activated water on germination and growth in rapeseed (*Brassica napus*). **Gesunde Pflanzen**, Heidelberg, v. 71, n. 3, p. 175–185, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10343-019-00463-9>. Acesso em: 8 jul. 2025.

JUDÉE, F.; SIMON, S.; BAILLY, C.; DUFOUR, T. Plasma-activation of tap water using DBD for agronomy applications: identification and quantification of long lifetime chemical species and production/consumption mechanisms. **Water Research**, Oxford, v. 133, p. 47–59, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.035>. Acesso em: 19 fev. 2025.

JULÁK, J.; SCHOLTZ, V.; VAŇKOVÁ, E. Medically important biofilms and non-thermal plasma. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, Oxford, v. 34,

n. 12, p. 178, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11274-018-2560-2>. Acesso em: 8 jul. 2025.

JUNG, S.; LEE, J.; LIM, Y.; CHOE, W.; YONG, H. I.; JO, C. Direct infusion of nitrite into meat batter by atmospheric pressure plasma treatment. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, Amsterdam, v. 39, p. 113–118, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.11.010>. Acesso em: 10 jul. 2025.

KAMGANG-YOUBI, G.; HERRY, J.-M.; BRISSET, J.-L.; BELLON-FONTAINE, M.-N.; DOUBLA, A.; NAÏTALI, M. Impact on disinfection efficiency of cell load and of planktonic/adherent/detached state: case of *Hafnia alvei* inactivation by plasma activated water. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Heidelberg, v. 81, n. 3, p. 449–457, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1641-9>. Acesso em: 8 jul. 2025.

KAUSHIK, N. K.; GHIMIRE, B.; LI, Y.; ADHIKARI, M.; VEERANA, M.; KAUSHIK, N.; JHA, N.; ADHIKARI, B.; LEE, S. J.; MASUR, K.; VON WOEDTKE, T.; WELTMANN, K. D.; CHOI, E. H. Biological and medical applications of plasma-activated media, water and solutions. **Biological Chemistry**, Berlin, v. 400, n. 1, p. 39–62, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/hsz-2018-0226>. Acesso em: 1 set. 2025.

KHLYUSTOVA, A.; LABAY, C.; MACHALA, Z.; GINEBRA, M. P.; CANAL, C. Important parameters in plasma jets for the production of RONS in liquids for plasma medicine: a brief review. **Frontiers of Chemical Science and Engineering**, Heidelberg, v. 13, n. 2, p. 238–252, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11705-019-1801-8>. Acesso em: 21 fev. 2025.

KIM, S.; KIM, C. H. Applications of plasma-activated liquid in the medical field. **Biomedicines**, Basel, v. 9, n. 11, p. 1700, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biomedicines9111700>. Acesso em: 6 mar. 2025.

KOGA-ITO, C.; CÉSAR SAGÁS, J.; SÁVIO PESSOA, R.; GEORGIEV KOSTOV, K.; SANTIAGO MACIEL, H. **Plasmas não térmicos**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012. Disponível em: <https://www.culturaacademica.com.br/catalogo/plasmas-nao-termicos/>. Acesso em: 1 set. 2024.

KOGELSCHATZ, U. Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, Dordrecht, v. 23, n. 1, p. 1–46, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1022470901385>. Acesso em: 31 ago. 2024.

KOGELSCHATZ, U. Fundamentals and applications of dielectric-barrier discharges. [s.l.: s.n.], 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228799858_Fundamentals_and_applications_of_dielectric-barrier_discharges. Acesso em: 31 ago. 2024.

KOGELSCHATZ, U.; ELIASSON, B.; EGLI, W. Dielectric-barrier discharges. Principle and applications. **Journal de Physique IV Proceedings**, Paris, v. 7, n. C4, p. C4–47–C4-66, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/jp4:1997405>. Acesso em: 31 ago. 2024.

KONG, M. G.; KROESEN, G.; MORFILL, G.; NOSENKO, T.; SHIMIZU, T.; VAN DIJK, J.; ZIMMERMANN, J. L. Plasma medicine: an introductory review. **New Journal of Physics**, Bristol, v. 11, n. 11, p. 115012, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/11/115012>. Acesso em: 29 mar. 2025.

KOOSHKI, S.; PAREEK, P.; JANDA, M.; MACHALA, Z. Selective reactive oxygen and nitrogen species production in plasma-activated water via dielectric barrier discharge reactor: an innovative approach and its Impact on dye degradation. **SSRN**, Rochester, v. 63, p. 105477, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4760487>. Acesso em: 17 fev. 2025.

KOSTOV, K. G.; ROCHA, V.; KOGA-ITO, C. Y.; MATOS, B. M.; ALGATTI, M. A.; HONDA, R. Y.; KAYAMA, M. E.; MOTA, R. P. Bacterial sterilization by a dielectric barrier discharge (DBD) in air. **Surface and Coatings Technology**, Amsterdam, v. 204, n. 18–19, p. 2954–2959, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.01.052>. Acesso em: 24 mar. 2025.

KUMAR, S. P. J.; CHINTAGUNTA, A. D.; REDDY, Y. M.; RAJJOU, L.; GARLAPATI, V. K.; AGARWAL, D. K.; PRASAD, S. R.; SIMAL-GANDARA, J. Implications of reactive oxygen and nitrogen species in seed physiology for sustainable crop productivity under changing climate conditions. **Current Plant Biology**, Amsterdam, v. 26, p. 100197, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2021.100197>. Acesso em: 8 jul. 2025.

KUSANO, Y.; SØRENSEN, B. F.; ANDERSEN, T. L.; TOFTEGAARD, H. L.; LEIPOLD, F.; SALEWSKI, M.; SUN, Z.; ZHU, J.; LI, Z.; ALDEN, M. Water-cooled non-thermal gliding arc for adhesion improvement of glass-fibre-reinforced polyester. **Journal of Physics D: Applied Physics**, London, v. 46, n. 13, p. 135203, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/13/135203>. Acesso em: 11 jul. 2025.

LAURITA, R.; BARBIERI, D.; GHERARDI, M.; COLOMBO, V.; LUKES, P. Chemical analysis of reactive species and antimicrobial activity of water treated by nanosecond pulsed DBD air plasma. **Clinical Plasma Medicine**, Amsterdam, v. 3, n. 2, p. 53–61, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cpme.2015.10.001>. Acesso em: 19 fev. 2025.

LI, Z.; OHNO, T.; SATO, H.; SAKUGAWA, T.; AKIYAMA, H.; KUNITOMO, S.; SASAKI, K.; AYUKAWA, M.; FUJIWARA, H. A method of water-bloom prevention using underwater pulsed streamer discharge. **Journal of Environmental Science and Health: Part A**, Abingdon, v. 43, n. 10, p. 1209–1214, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10934520802171782>. Acesso em: 8 jul. 2025.

LIAO, X.; LIU, D.; XIANG, Q.; *et al.* Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: a review. **Food Control**, Oxford, v. 75, p. 83-91, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.12.021>. Acesso em: 20 fev. 2025.

LIEBERMAN, M. A.; LICHTENBERG, A. J. **Principles of plasma discharges and materials processing**. Hoboken: Wiley, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/0471724254>. Acesso em: 10 ago. 2024.

LIETZ, A. M.; KUSHNER, M. J. Air plasma treatment of liquid covered tissue: long timescale chemistry. **Journal of Physics D: Applied Physics**, London, v. 49, n. 42, p. 425204, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/42/425204>. Acesso em: 17 jul. 2025.

LIN, C.-M.; CHU, Y.-C.; HSIAO, C.-P.; WU, J.-S.; HSIEH, C.-W.; HOU, C.-Y. The optimization of plasma-activated water treatments to inactivate *Salmonella Enteritidis* (ATCC 13076) on shell eggs. **Foods**, Basel, v. 8, n. 10, p. 520, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods8100520>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LINDSAY, A.; ANDERSON, C.; SLIKBOER, E.; SHANNON, S.; GRAVES, D. Momentum, heat, and neutral mass transport in convective atmospheric pressure plasma-liquid systems and implications for aqueous targets. **Journal of Physics D: Applied Physics**, London, v. 48, n. 42, p. 424007, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/42/424007>. Acesso em: 8 jul. 2025.

LING, L.; JIAFENG, J.; JIANGANG, L.; MINCHONG, S.; XIN, H.; HANLIANG, S.; YUANHUA, D. Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean. **Scientific Reports**, London, v. 4, n. 1, p. 5859, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep05859>. Acesso em: 9 jul. 2025.

LIU, C.; CHEN, C.; JIANG, A.; SUN, X.; GUAN, Q.; HU, W. Effects of plasma-activated water on microbial growth and storage quality of fresh-cut apple. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, Amsterdam, v. 59, p. 102256, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102256>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LIU, X.; LI, Y.; ZHANG, R.; HUANGFU, L.; DU, G.; XIANG, Q. Inactivation effects and mechanisms of plasma-activated water combined with sodium laureth sulfate (SLES) against *Saccharomyces cerevisiae*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Berlin, v. 105, n. 7, p. 2855–2865, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11227-9>. Acesso em: 3 jun. 2025.

LOW, M.; SOW, W.; HUNG, Y. M.; TAN, M. K. Increase in Leidenfrost point via plasma-activated water. **International Journal of Thermal Sciences**, Heidelberg, v. 184, p. 107908, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107908>. Acesso em: 10 jun. 2025.

LOW, M.; S HUNG, Y. M.; TAN, M. K. Cooling enhancement for light-emitting diode using plasma-activated water. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdam, v. 230, p. 120671, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120671>. Acesso em: 10 jun. 2025.

LU, X.; NAIDIS, G. V.; LAROUSSI, M.; REUTER, S.; GRAVES, D. B.; OSTRIKOV, K. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: generation, transport, and biological effects. **Physics Reports**, North-Holland, v. 630, p. 1–84,

2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.03.003>. Acesso em: 24 fev. 2025.

LUKES, P.; BRISSET, J.-L.; LOCKE, B. R. Biological effects of electrical discharge plasma in water and in gas–liquid environments. *In*: PARVULESCU, V. I.; MAGUREANU, M.; LUKES, P. (Ed.). **Plasma chemistry and catalysis in gases and liquids**. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9783527649525.ch8>. Acesso em: 25 fev. 2025.

LUKES, P.; DOLEZALOVA, E.; SISROVA, I.; CLUPEK, M. Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxyxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H₂O₂ and HNO₂. **Plasma Sources Science and Technology**, Bristol, v. 23, n. 1, p. 015019, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/23/1/015019>. Acesso em: 2 jun. 2025.

MA, R.; WANG, G.; TIAN, Y.; WANG, K.; ZHANG, J.; FANG, J. Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 300, p. 643–651, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.061>. Acesso em: 25 fev. 2025.

MA, R.; FENG, H. Q.; LIANG, Y. D.; ZHANG, Q.; TIAN, Y.; SU, B.; ZHANG, J.; FANG, J. An atmospheric-pressure cold plasma leads to apoptosis in *Saccharomyces cerevisiae* by accumulating intracellular reactive oxygen species and calcium. **Journal of Physics D: Applied Physics**, London, v. 46, n. 28, p. 285401, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/28/285401>. Acesso em: 8 jul. 2025.

MAI-PROCHNOW, A.; ZHOU, R.; ZHANG, T.; OSTRIKOV, K. (Ken); MUGUNTHAN, S.; RICE, S. A.; CULLEN, P. J. Interactions of plasma-activated water with biofilms: inactivation, dispersal effects and mechanisms of action. **npj Biofilms and Microbiomes**, New York, v. 6, n. 1, p. 38610, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41522-020-00180-6>. Acesso em: 3 jun. 2025.

MASTANAIAH, N. **Dielectric barrier discharge (DBD) plasma sterilization: an in-depth study of the factors contributing to and enhancing the sterilization process**. 2013. 178f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Herbert Wertheim College of Engineering, University of Florida, 2013. Disponível em: https://faculty.eng.ufl.edu/aprg/wp-content/uploads/sites/130/2019/09/Dissertation_Mastanaiah-Navya_reduced.pdf. Acesso em: 31 ago. 2024.

MCPHERSON, M. J. **Subsurface ventilation and environmental engineering**. London: Chapman and Hall, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1550-6>. Acesso em: 8 jul. 2025.

MILHAN, N. V. M.; CHIAPPIM, W.; SAMPAIO, A. D. G.; CRUZ VEGIAN, M. R.; PERSON, R. S.; KOGA-ITO, C. Y. Applications of plasma-activated water in dentistry: a review. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 23, n. 8,

p. 4131, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms23084131>. Acesso em: 1 set. 2024.

MITRA, A.; LI, Y. F.; KLÄMPFL, T. G.; SHIMIZU, T.; JEON, J.; MORFILL, G. E.; ZIMMERMANN, J. L. Inactivation of surface-borne microorganisms and increased germination of seed specimen by cold atmospheric plasma. **Food and Bioprocess Technology**, New York, v. 7, n. 3, p. 645–653, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1126-4>. Acesso em: 3 jun. 2025.

MORABIT, Y.; HASAN, M. I.; WHALLEY, R. D.; ROBERT, E.; MODIC, M.; WALSH, J. L. A review of the gas and liquid phase interactions in low-temperature plasma jets used for biomedical applications. **European Physical Journal D: Atoms Molecules Clusters and Optical Physics**, Les Ulis, v. 75, n. 1, p. 32, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-020-00004-4>. Acesso em: 19 fev. 2025.

MUTTIAH, B.; NASIR, N. M.; MARIAPPAN, V.; VADIVELU, J.; VELLASAMY, K. M.; YAP, S. L. Targeting colon cancer and normal cells with cold plasma-activated water: exploring cytotoxic effects and cellular responses. **Physics of Plasmas**, Woodbury, v. 31, n. 8, p. 083516, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0216291>. Acesso em: 3 jun. 2025.

NADHIFA, S.; AFRIANSYAH, R.; BISMO, S. Ozone generation process using parallel plates plasma reactor at room temperature. **E3S Web of Conferences**, Les Ulis, v. 67, p. 04016, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186704016>. Acesso em: 18 fev. 2025.

NAUMOVA, I. K.; MAKSIMOV, A. I.; KHLIUSTOVA, A. V. Stimulation of the germinability of seeds and germ growth under treatment with plasma-activated water. **Surface Engineering and Applied Electrochemistry**, New York, v. 47, n. 1, p. 263-265, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3103/S1068375511030136>. Acesso em: 3 jun. 2025.

NERETTI, G.; TAGLIOLI, M.; COLONNA, G.; BORGHI, C. A. Characterization of a dielectric barrier discharge in contact with liquid and producing a plasma activated water. **Plasma Sources Science and Technology**, Bristol, v. 26, n. 1, p. 015013, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/26/1/015013>. Acesso em: 17 fev. 2025.

OEHMIGEN, K.; HÄHNEL, M.; BRANDENBURG, R.; WILKE, C.; WELTMANN, K. D.; VON WOEDTKE, T. The role of acidification for antimicrobial activity of atmospheric pressure plasma in liquids. **Plasma Processes and Polymers**, Weinheim, v. 7, n. 3-4, p. 250–257, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppap.200900077>. Acesso em: 19 fev. 2025.

PANG, B.; LIU, Z.; ZHANG, H.; WANG, S.; GAO, Y.; XU, D.; LIU, D.; KONG, M. G. Investigation of the chemical characteristics and anticancer effect of plasma-activated water: the effect of liquid temperature. **Plasma Processes and Polymers**, Weinheim, v. 19, n. 1, p. 2100079, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppap.202100079>. Acesso em: 3 jun. 2025.

PARVULESCU, V. I.; MAGUREANU, M.; LUKES, P. (Ed.). **Plasma chemistry and catalysis in gases and liquids**. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9783527649525>. Acesso em: 25 fev. 2025.

PATRA, A.; PRASATH, V. A.; PANDISELVAM, R.; SUTAR, P. P.; JEEVARATHINAM, G. Effect of plasma activated water (PAW) on physicochemical and functional properties of foods. **Food Control**, Oxford, v. 142, p. 109268, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109268>. Acesso em: 27 maio 2025.

PUNITH, P.; SINGH, A. K.; J., A.; BOOPATHY, B.; CHATTERJEE, R.; M., H.; CHAKRAVORTTY, D.; RAO, L. Generation of neutral pH high-strength plasma-activated water from a pin to water discharge and its bactericidal activity on multidrug-resistant pathogens. **Plasma Processes and Polymers**, Weinheim, v. 20, n. 1, p. 2200133, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppap.202200133>. Acesso em: 1 jul. 2025.

RAIZER, Y. P. **Gas discharge physics**. Berlin: Springer-Verlag, 1991. Disponível em: <https://link.springer.com/book/9783642647604>. Acesso em: 2 set. 2024.

RAMKUMAR, M. C.; COOLS, P.; ARUNKUMAR, A.; GEYTER, N.; MORENT, R.; KUMAR, V.; UDAYKUMAR, S.; GOPINATH, P.; JAGANATHAN, S. K.; PANDIYARAJ, K. N. Polymer coatings for biocompatibility and reduced nonspecific adsorption. In: WALL, J. G.; PODBIELSKA, H.; WAWRZYŃSKA, M. (ed.). **Functionalised cardiovascular stents**. Duxford: Woodhead Publishing, 2018. p. 155-198. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100496-8.00009-3>. Acesso em: 10 jul. 2025.

REZAEI, F.; VANRAES, P.; NIKIFOROV, A.; MORENT, R.; GEYTER, N. Applications of plasma-liquid systems: a review. **Materials**, Basel, v. 12, n. 17, p. 2751, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12172751>. Acesso em: 19 jul. 2025.

RIEMANN, K.-U. The Bohm criterion and sheath formation. **Journal of Physics D: Applied Physics**, Bristol, v. 24, n. 4, p. 493–518, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/24/4/001>. Acesso em: 16 jul. 2025.

SALGE, J. Plasma-assisted deposition at atmospheric pressure. **Surface and Coatings Technology**, Amsterdam, v. 80, n. 1-2, p. 1-7, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02676-2](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02676-2). Acesso em: 24 mar. 2025.

SAMPAIO, A. D. G.; CHIAPPIM, W.; MILHAN, N. V. M.; CRUZ VEGIAN, M. R.; PESSOA, R. S.; KOGA-ITO, C. Y. Effect of the pH on the antibacterial potential and cytotoxicity of different plasma-activated liquids. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 23, n. 22, p. 13893, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms232213893>. Acesso em: 17 jun. 2025.

SAMUKAWA, S.; HORI, M.; RAUF, S.; TACHIBANA, K.; BRUGGEMAN, P.; KROESEN, G.; WHITEHEAD, J. C.; MURPHY, A. B.; GUTSOL, A. F.; STARIKOVSKAIA, S.; KORTSHAGEN, U.; BOEUF, J. P.; SOMMERER, T. J.; KUSHNER, M. J.; CZARNETZKI, U.; MASON, N. The 2012 plasma roadmap.

Journal of Physics D: Applied Physics, Bristol, v. 45, n. 25, p. 253001, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/25/253001>. Acesso em: 7 mar. 2025.

SHAO, T.; ZHANG, C.; LONG, K.; ZHANG, D.; WANG, J.; YAN, P.; ZHOU, Y. Surface modification of polyimide films using unipolar nanosecond-pulse DBD in atmospheric air. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 256, n. 12, p. 3888–3894, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.01.045>. Acesso em: 29 mar. 2025.

SILSBY, J. A.; SIMON, S.; WALSH, J. L.; HASAN, M. I. The influence of gas–liquid interfacial transport theory on numerical modelling of plasma activation of water. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, Dordrecht, v. 41, n. 4, p. 1363–1380, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10182-7>. Acesso em: 1 set. 2024.

ŠIMONČICOVÁ, J.; KRYŠTOFOVÁ, S.; MEDVECKÁ, V.; ĎURIŠOVÁ, K.; KALIŇÁKOVÁ, B. Technical applications of plasma treatments: current state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Berlin, v. 102, n. 15, p. 5117–5129, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09877-x>. Acesso em: 8 jul. 2025.

ŠÍRA, M.; TRUNEC, D.; ST'ACHEL, P.; BURŠÍKOVÁ, V.; NAVRÁTIL, Z. Surface modification of polycarbonate in homogeneous atmospheric pressure discharge. **Journal of Physics D: Applied Physics**, Bristol, v. 41, n. 1, p. 015205, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/1/015205>. Acesso em: 29 mar. 2025.

SMET, C.; GOVAERT, M.; KYRYLENKO, A.; EASDANI, MD.; WALSH, J. L.; VAN IMPE, J. F. Inactivation of single strains of *listeria monocytogenes* and *Salmonella Typhimurium* planktonic cells biofilms with plasma activated liquids. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 10, p. 1539, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01539>. Acesso em: 8 jul. 2025.

SUBEDI, D. P.; TYATA, R. B.; SHRESTHA, R; WONG, C. S. An experimental study of atmospheric pressure dielectric barrier discharge (DBD) in argon. **Frontiers In Physics**: 4th International Meeting, Melville, v. 1588, n. 1, p. 103-108, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4867673>. Acesso em: 14 set. 2024.

SUBRAMANIAN, P. S. G.; J., A.; P., L.; RAO, H.; SHIVAPUJI, A. M.; GIRARD-LAURIAULT, P.-L.; RAO, L. Plasma-activated water from DBD as a source of nitrogen for agriculture: specific energy and stability studies. **Journal of Applied Physics**, Melville, v. 129, n. 9, p. 093303, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0039253>. Acesso em: 29 maio 2025.

SUN, Z.; LI, J. Study on electrical characteristics of planar DBD structure excited by high frequency AC power supply. In: **IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)**, Chengdu, p. 1-5, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CIYCEE53554.2021.9676876>. Acesso em: 24 mar. 2025.

TACHIBANA, K.; NAKAMURA, T. Comparative study of discharge schemes for production rates and ratios of reactive oxygen and nitrogen species in plasma activated water. **Journal of Physics D: Applied Physics**, Bristol, v. 52, n. 38, p. 385202, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab2529>. Acesso em: 25 fev. 2025.

TAKAHATA, J.; TAKAKI, K.; SATTA, N.; TAKAHASHI, K.; FUJIO, T.; SASAKI, Y. Improvement of growth rate of plants by bubble discharge in water. **Japanese Journal of Applied Physics**, Tokyo, v. 54, n. 1S, p. 01AG07, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.7567/jjap.54.01ag07>. Acesso em: 9 jul. 2025.

TAKAKI, K.; TAKAHATA, J.; WATANABE, S.; SATTA, N.; YAMADA, O.; FUJIO, T.; SASAKI, Y. Improvements in plant growth rate using underwater discharge. **Journal of Physics: Conference Series**, Bristol, v. 418, n. 1, p. 012140, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/418/1/012140>. Acesso em: 14 fev. 2025.

TAKAMATSU, T.; KAWATE, A.; UEHARA, K.; OSHITA, T.; MIYAHARA, H.; DOBRYNIN, D.; FRIDMAN, G.; FRIDMAN, A.; OKINO, A. Bacterial Inactivation in liquids using multi-gas plasmas. **Plasma Medicine**, Redding, v. 2, n. 4, p. 237-247, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1615/PlasmaMed.2014010792>. Acesso em: 25 fev. 2025.

TENDERO, C.; TIXIER, C.; TRISTANT, P.; DESMAISON, J.; LEPRINCE, P. Atmospheric pressure plasmas: a review. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, Amsterdam, v. 61, n. 1, p. 2–30, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.10.003>. Acesso em: 7 jul. 2025.

THAN, H. A. Q.; PHAM, T. H.; NGUYEN, D. K. V.; PHAM, T. H.; KHACEF, A. Plasma activated water for increasing germination and plant growth of *Lactuca sativa* L. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, Dordrecht, v. 42, n. 6, p. 73–89, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10210-6>. Acesso em: 8 jul. 2025.

THIRUMDAS, R.; KOTHAKOTA, A.; ANNAPURE, U.; SILIVERU, K.; BLUNDELL, R.; GATT, R.; VALDRAMIDIS, V. P. Plasma activated water (PAW): chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. **Trends in Food Science and Technology**, Cambridge, v. 77, p. 21–31, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.007>. Acesso em: 6 mar. 2025.

TIAN, Y.; MA, R.; ZHANG, Q.; FENG, H.; LIANG, Y.; ZHANG, J.; FANG, J. Assessment of the physico-chemical properties and biological effects of water activated by non-thermal plasma above and beneath the water surface. **Plasma Processes and Polymers**, Weinheim, v. 12, n. 5, p. 439–449, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppap.201400082>. Acesso em: 17 mar. 2025.

TONKS, L.; LANGMUIR, I. Oscillations in ionized gases. **Physical Review**, College Park, v. 33, n. 2, p. 195–210, 1929. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.33.195>. Acesso em: 16 jul. 2025.

TOPOLOVEC, B.; JOVANOVIC, O.; PUAC, N.; SKORO, N.; LUMBAQUE, E. C.; PETROVIC, M. Plasma water treatment for PFAS: study of degradation of perfluorinated substances and their byproducts by using cold atmospheric pressure plasma jet. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 12, n. 3, p. 112979, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112979>. Acesso em: 10 jun. 2025.

TSOUKOU, E. **Understanding the potential of plasma activated liquids for biomedical applications**. 2021. 237f. Thesis (Doctor of Philosophy) - School of Food Science and Environmental health, Technological University Dublin, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21427/65FW-MX34>. Acesso em: 31 ago. 2024.

VERLACKT, C. C. W.; BOGAERTS, A.; VAN BOXEM, W. Ultrasonically treated liquid interfaces for progress in cleaning and separation processes. **Physical Chemistry Chemical Physics**, London, v. 20, n. 10, p. 6845–6859, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C7CP07593F>. Acesso em: 19 fev. 2025.

VON WOEDTKE, T.; BEKESCHUS, S.; WELTMANN, K.-D.; WENDE, K. Plasma-treated liquids for medicine: a narrative review on state and perspectives. **Plasma Processes and Polymers**, Weinheim, v. 22, n. 1, p. 2400255, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppap.202400255>. Acesso em: 3 jun. 2025.

WAGNER, H. E.; BRANDENBURG, R.; KOZLOV, K. V.; SONNENFELD, A.; MICHEL, P.; BEHNKE, J. F. The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment. **Vacuum**, Orlando, v. 71, n. 3, p. 417–436, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00765-0](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00765-0). Acesso em: 29 mar. 2025.

WANG, S.; SALVI, D. Recent progress in the application of plasma-activated water (PAW) for food decontamination. **Current Opinion in Food Science**, Kidlington, v. 42, p. 51–60, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.04.012>. Acesso em: 3 jun. 2025.

WENDE, K.; BEKESCHUS, S.; SCHMIDT, A.; JATSCH, L.; HASSE, S.; WELTMANN, K. D.; MASUR, K.; VON WOEDTKE, T. Chemistry and biochemistry of cold physical plasma derived reactive species in liquids. **Biological Chemistry**, Berlin, v.400, n. 1, p. 19-38, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/hsz-2018-0242>. Acesso em: 21 fev. 2025.

WISSEL, S. A.; ZWICKER, A.; ROSS, J.; GERSHMAN, S. The use of DC glow discharges as undergraduate educational tools. **American Journal of Physics**, College Park, v. 81, n. 9, p. 663–669, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1119/1.4811435>. Acesso em: 12 jul. 2025.

WONG, K. S.; CHEW, N. S. L.; LOW, M.; TAN, M. K. Plasma-activated water: physicochemical properties, generation techniques, and applications. **Processes**, Basel, v. 11, n. 7, p. 2213, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr11072213>. Acesso em: 1 set. 2025.

XIANG, Q.; FAN, L.; LI, Y.; DONG, S.; LI, K.; BAI, Y. A review on recent advances in plasma-activated water for food safety: current applications and future trends.

Critical Reviews in Food Science and Nutrition, Boca Raton, v. 62, n. 8, p. 2250–2268, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1852173>. Acesso em: 27 maio 2025.

XIAO, D. **Gas discharge and gas insulation**. Xangai: Shanghai Jiao Tong University Press; Berlim; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48041-0>. Acesso em: 26 fev. 2025.

XU, X. Dielectric barrier discharge: properties and applications. **Thin Solid Films**, New York, v. 390, n. 1-2, p. 237–242, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)00956-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)00956-7). Acesso em: 14 set. 2024.

XU, Y.; TIAN, Y.; MA, R.; LIU, Q.; ZHANG, J. Effect of plasma activated water on the postharvest quality of button mushrooms, *Agaricus bisporus*. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 197, p. 436–444, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.144>. Acesso em: 25 fev. 2025.

YUAN, D.; WANG, Z.; KIRSCH, S.; HANKE-RAUSCHENBACH, R.; STEIN, B.; BRAUN, D.; KUCHLER, U.; PIETSCH, G. Ozone production in parallel multichannel dielectric barrier discharge from oxygen and air: the influence of gas pressure. **Journal of Physics D: Applied Physics**, London, v. 49, n. 45, p. 455203, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/45/455203>. Acesso em: 15 set. 2025.

ZHAI, Y.; LIU, S.; XIANG, Q.; LYU, Y.; SHEN, R. Effect of plasma-activated water on the microbial decontamination and food quality of thin sheets of bean curd. **Applied Sciences**, Basel, v. 9, n. 20, p. 4223, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app9204223>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ZHANG, Q.; MA, R.; TIAN, Y.; SU, B.; WANG, K.; YU, S.; ZHANG, J.; FANG, J. Sterilization efficiency of a novel electrochemical disinfectant against *Staphylococcus aureus*. **Environmental Science and Technology**, Washington, v. 50, n. 6, p. 3184–3192, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05108>. Acesso em: 3 jun. 2025.

ZHAO, Y.-M.; OJHA, S.; BURGESS, C. M.; SUN, D.-W.; TIWARI, B. K. Inactivation efficacy and mechanisms of plasma activated water on bacteria in planktonic state. **Journal of Applied Microbiology**, Oxford, v. 129, n. 5, p. 1248–1260, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jam.14677>. Acesso em: 8 jul. 2025.

ZHAO, Y.-M.; PATANGE, A.; SUN, D.-W.; TIWARI, B. K. Plasma-activated water: physicochemical properties, microbial inactivation mechanisms, factors influencing antimicrobial effectiveness, and applications in the food industry. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Chicago, v. 19, n. 6, p. 3951–3979, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12644>. Acesso em: 21 fev. 2025.

ZHENG, Y.; WU, S.; DANG, J.; WANG, S.; LIU, Z.; FANG, J.; HAN, P.; ZHANG, J. Reduction of phoxim pesticide residues from grapes by atmospheric pressure non-thermal air plasma activated water. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v.

377, p. 98-105, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.05.058>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ZHOU, R.; OSTRIKOV, K.; ZHOU, R.; WANG, P.; XIAN, Y.; MAI-PROCHNOW, A.; LU, X.; CULLEN, P. J.; ZHOU, R.; BAZAKA, K. Plasma-activated water: generation, origin of reactive species and biological applications. **Journal of Physics D: Applied Physics**, Bristol, v. 53, n. 30, p. 303001, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab81cf>. Acesso em: 1 set. 2024.

APÊNDICE A – TABELAS MENCIONADAS NA SEÇÃO DE DISCUSSÃO EXPERIMENTAL.

Tabela A 1 — pH da água DI antes e depois da ativação (Água a ~25°C)

Tempo de Ativação (min)	pH antes da ativação	pH depois da ativação
1	5,14 ± 0,04	4,95 ± 0,03
5	5,35 ± 0,09	4,56 ± 0,06
10	5,06 ± 0,05	3,96 ± 0,04
15	5,02 ± 0,04	3,80 ± 0,04

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela A 2 — Concentração de espécies reativas na 3ª amostra de cada intervalo de tempo (Água a ~25°C)

Tempo de Ativação (min)	NO ₃ (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	O ₃ (mg/L)	H ₂ O ₂ (mg/L)
1	LO	0	0	1,7 ± 0,26
5	2,22 ± 0,33	0,11 ± 0,2	0	1,8 ± 0,27
10	5,3 ± 0,8	0,24 ± 0,04	0,02 ± 0,003	1,5 ± 0,23
15	6 ± 0,9	0,29 ± 0,04	0,02 ± 0,003	1,6 ± 0,24

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela A 3 — pH antes e depois da ativação (15 minutos, ~50 °C)

Condição Experimental	pH antes da ativação	pH depois da ativação
Água a 50°C (Conjunto 1)	5,10 ± 0,04	4,34 ± 0,23
50°C - malha 200 (Conjunto 2)	5,12 ± 0,03	4,165 ± 0,168
50°C - malha 100 (Conjunto 3)	5,7 ± 0,06	4,16 ± 0,57

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Legenda: Valores médios com propagação de erro foram calculados para os Conjuntos 1 e 3, que contêm três ou mais amostras cada, permitindo uma estimativa estatística válida com base no desvio médio. Para o Conjuntos 2, que possui apenas duas amostras, os dados foram apresentados individualmente, com indicação apenas da incerteza instrumental do pHmetro (±0,03).

Tabela A 4 — Concentração de espécies reativas (15 minutos, ~50 °C)

Condição Experimental	Amostra	NO ₃ (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	O ₃ (mg/L)	H ₂ O ₂ (mg/L)
Água a 50°C (Conjunto 1)	3ª	15,3 ± 2,3	0,88 ± 0,13	0	1,6 ± 0,24
Repetição a 50°C (Conjunto 1)	1ª	27,7 ± 4,2	1,69 ± 0,25	0,01 ± 0,002	3,1 ± 0,47

Repetição a 50°C (Conjunto 1)	2ª	14,1 ± 2,1	1,08 ± 0,16	0	2,3 ± 0,35
50°C - malha 200 (Conjunto 2)	1ª	8,8 ± 1,3	0,48 ± 0,07	0	1,7 ± 0,26
50°C - malha 200 (Conjunto 2)	2ª	26 ± 3,9	1,6 ± 0,24	0	2,6 ± 0,39
50°C - malha 100 (Conjunto 3)	1ª	15,5 ± 2,3	0,9 ± 0,14	0	1,4 ± 0,21
50°C - malha 100 (Conjunto 3)	2ª	29,1 ± 4,4	HIGH	0	2,9 ± 0,44
50°C - malha 100 (Conjunto 3)	3ª	HIGH	HIGH	0,01	4,8 ± 0,72

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).