

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Física de Plasmas.

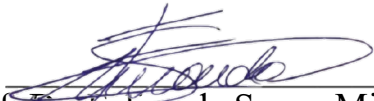
Michaela Shiotani Marcondes

**CARACTERIZAÇÃO DE LÍQUIDOS ATIVADOS POR
PLASMA GERADO PELO REATOR SURFATRON:
AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E APLICAÇÕES
ANTIMICROBIANAS**

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Rodrigo Sávio Pessoa
Orientador



Prof. Dr. Felipe de Souza Miranda
Coorientador

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Marcondes, Michaela Shiotani

Caracterização de líquidos ativados por plasma gerado pelo reator Surfatron: avaliação físico-química e aplicações antimicrobianas/ Michaela Shiotani Marcondes

São José dos Campos, 2025.

100f.

Dissertação de mestrado – Pós-Graduação em Física, Área de Física de Plasmas – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sávio Pessoa

Co-orientador: Dr. Felipe de Souza Miranda

1. Água Ativada por Plasma. 2. Solução Salina Ativada por Plasma. 3. Plasma Frio Atmosférico (CAP). I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Caracterização de líquidos ativados por plasma gerado pelo reator Surfatron: avaliação físico-química e aplicações antimicrobianas

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARCONDES, Michaela Shiotani. **Caracterização de líquidos ativados por plasma gerado pelo reator Surfatron: avaliação físico-química e aplicações antimicrobianas.** 2025. 100 f. Dissertação de mestrado em Física de Plasmas – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2025.

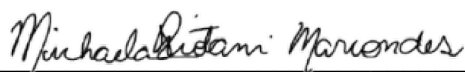
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Michaela Shiotani Marcondes

TÍTULO DO TRABALHO: Caracterização de líquidos ativados por plasma gerado pelo reator Surfatron: avaliação físico-química e aplicações antimicrobianas.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2025

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação ou tese pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).



Michaela Shiotani Marcondes

Rua Lins, 74

CEP: 12233-650, São José dos Campos - SP

**CARACTERIZAÇÃO DE LÍQUIDOS ATIVADOS POR
PLASMA GERADOS PELO REATOR SURFATRON:
AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E APLICAÇÕES
ANTIMICROBIANAS**

Michaela Shiotani Marcondes

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Luis de Jesus Pereira	Presidente	- ITA
Prof. Dr. Rodrigo Sávio Pessoa	Orientador	- ITA
Prof. Dr. Gilberto Petraconi Filho	Membro Interno	- ITA
Prof. Dr. Anelise Cristina Osorio Cesar Doria	Membro Externo	- UNIVAP

ITA

Dedico este trabalho a minha família e amigos, que sempre me apoiaram.

Agradecimentos

Agradeço, antes de tudo, a Deus e à minha família, que sempre me apoiou e incentivou em cada passo da minha jornada. Em especial, aos meus pais, Alexandre e Heleny, e aos meus avós, Mario e Mitie. Obrigada não apenas por serem minha base, mas por refletirem no olhar um orgulho que me fortalece e me motiva a sempre dar o meu melhor em tudo o que faço.

Ao meu grande amor, Luan, meu parceiro em todos os momentos, que esteve em cada etapa deste trabalho, mesmo depois de ir para outro continente. Obrigada por me incentivar, sempre me apoiar, acalmar meus surtos e nunca deixar que eu desanimasse. Amo você!

Ao meu orientador, Prof. Rodrigo, e ao meu coorientador, Dr. Felipe, sou profundamente grata por todos os ensinamentos, correções e pelo tempo que nem sempre vocês tinham para me dar, mas me deram. Obrigada pela paciência, pela orientação e pelo carinho com que sempre conduziram tudo. Vocês são exemplos não apenas de pesquisadores, mas de pessoas admiráveis.

Um agradecimento especial ao Prof. William, que me acolheu desde o meu primeiro contato com a pesquisa e se tornou um porto seguro ao longo dessa trajetória. E à sua esposa, Stella, por todo carinho, preocupação e apoio nesses anos.

Aos professores do LPP—Rodrigo, Petraconi, Argemiro, André, Douglas e Homero— agradeço pelos valiosos ensinamentos. E a toda família LPP, obrigada por tornar nosso ambiente de trabalho mais leve e divertido: Nina, Du, Filipe, Homerinho, Marcelo, Gabriel, Zé Renato, Thais, Jade, Helen, Rafa, Nilton, Pedro, Tia Eliane, Seu Jorge, Garufe, Nierlly, Álvaro, Carlão, Lucas, Rodrigo, Isabella G., Isabella H., Leticia, Alan e Evelyn.

Em especial ao Neto e a Julia. Obrigada por estarem sempre dispostos a me ajudar e ouvir meus desesperos.

Agradeço também à Prof. Cristiane Koga-Ito pelo suporte no Laboratório Genoma – ICT UNESP, e à Lady e Victória, que foram de grande ajuda na pesquisa.

"Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo."
(Martin Luther King)

Resumo

Este estudo aborda sobre a produção e aplicação de Líquidos Ativados por Plasma (PALs) para inativação microbiana, destacando a utilização de plasma frio como uma tecnologia emergente na desinfecção e modificação de superfícies. A natureza não térmica do plasma e a ausência de agentes químicos agressivos ao meio ambiente o posicionam como uma alternativa ecologicamente viável. A investigação foca na caracterização de um sistema de micro-ondas para a geração de um jato de plasma não térmico à pressão atmosférica, bem como no tratamento de diferentes líquidos, como água deionizada e solução salina, com o objetivo de produzir PALs. O estudo avalia a atividade antimicrobiana dos PALs contra bactérias como *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, e o fungo *Candida albicans*. Os resultados indicaram que a ativação por plasma provoca alterações significativas nos parâmetros físico-químicos dos líquidos tratados, incluindo redução no pH e aumento na condutividade, devido à formação acentuada de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio. Essas mudanças conferem aos PALs uma composição química distinta, potencializando sua ação antimicrobiana. Notavelmente, o tratamento com plasma resulta na acidificação dos líquidos, bem como um aumento no Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) e na salinidade, indicando a formação de novos sais e compostos. As análises incluem medições dos parâmetros físico-químicos, análises químicas por espectrofotometria UV-Vis. A caracterização do plasma foi realizada por meio de espectroscopia óptica de emissão. A variação da temperatura dos líquidos, em resposta ao tratamento com plasma, evidenciou um processo exotérmico, sugerindo que a absorção de energia térmica do plasma pode contribuir para alterações na composição dos PALs. Os ensaios microbiológicos revelaram uma atividade antimicrobiana significativa dos PALs, com eficácia aumentada para tempos de ativação mais longos. Os resultados mostram que a água deionizada ativada mostrou-se mais eficaz do que a solução salina, sugerindo que a composição inicial do líquido influencia a eficácia antimicrobiana dos PALs. O presente estudo destaca o potencial dos PALs como agentes antimicrobianos eficazes, abrindo novas perspectivas para aplicações práticas em desinfecção e esterilização, bem como contribui para o entendimento dos mecanismos de ativação de líquidos por plasmas e de sua influência nas propriedades de inativação de microrganismos.

Abstract

This study addresses the production and application of Plasma Activated Liquids (PALs) for microbial inactivation, highlighting the use of cold plasma as an emerging technology in infection and surface modification. The non-thermal nature of plasma and the absence of environmentally aggressive chemical agents have positioned it as an environmentally viable alternative. The investigation focuses on the characterization of a microwave system for the generation of a non-thermal plasma jet at atmospheric pressure, as well as on the treatment of different liquids, such as deionized water and saline solution, with the aim of producing PALs. The study evaluates the antimicrobial activity of PALs against bacteria such as *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*, and the fungus *Candida albicans*. The results indicated that plasma activation caused significant changes in the physicochemical parameters of the treated liquids, including a reduction in pH and an increase in conductivity, due to the marked formation of reactive oxygen and nitrogen species. These changes give PALs a distinct chemical composition, enhancing their antimicrobial action. Notably, plasma treatment results in acidification of the liquids, as well as an increase in Total Dissolved Solids (TDS) and salinity, decreasing the formation of new salts and compounds. The analysis includes physicochemical parameters, chemical analysis by UV-Vis spectrophotometry. Plasma characterization was performed by optical emission spectroscopy. The variation in temperature of the liquids, in response to plasma treatment, evidences an exothermic process, indicating that the absorption of thermal energy from the plasma may contribute to changes in the composition of the PALs. Microbiological assays revealed significant antimicrobial activity of the PALs, with increased efficacy for longer activation times. The results show that activated deionized water was more effective than saline, indicating that the initial composition of the liquid influences the antimicrobial efficacy of the PALs. The present study highlights the potential of PALs as effective antimicrobial agents, opening new perspectives for practical applications in infections and sterilization, as well as contributing to the understanding of the mechanisms of activation of liquids by plasmas and their influence on the inactivation properties of microorganisms.

Lista de Figuras

Figura 1: Esquemática dos princípios de geração do Plasma (17).	23
Figura 2: Sistema DBD de geometria planar (A, B e C), Coaxial (D) e Plasma Jet (E). Adaptado de (5).....	29
Figura 3: Esquemática das fases de evolução do Gliding Arc em função da distância de separação dos eletrodos. Adaptado de Dorosz, et al., 2024 (49).....	33
Figura 4: Representação das regiões de um processo de ativação indireto de líquido à plasma.	36
Figura 5: Representação da estrutura da parede celular de bactérias Gram-positivas (a) e Gram-negativas (b). Adaptado de Moreira et al., 2015 (65).	39
Figura 6: (a) Esquema representativo do sistema de Descarga Sustentada por Onda de Superfície (SWD), composto por tubo de quartzo para entrada de gás (argônio), fonte de alimentação de 2,45 GHz, medidor de fluxo térmico, sistema de geração de Água Ativada por Plasma (PAW) e dispositivos de análise, incluindo espectroscopia de emissão ótica (OES), espectrofotometria UV-Vis em tempo real e medidor multiparâmetro para avaliação de pH, ORP, TDS e condutividade elétrica. (b) Imagem ilustrando o sistema Surfatron e o jato de plasma gerado.	44
Figura 7: Análise da perda de massa com o passar do tempo de ativação do líquido pelo plasma.	46
Figura 8: Princípio geral de funcionamento de um sensor de fluxo de calor. Adaptado do manual do sensor.	47
Figura 9: Representações esquemáticas da configuração experimental, destacando o posicionamento da sonda térmica no fundo da placa de Petri: (a) com 40 mL do líquido (bocal a 17 mm da superfície do líquido) e (b) sem líquido (bocal a 27 mm do fundo da placa).....	48

Figura 10: Passos seguidos para a execução dos ensaios microbiológicos e suas análises. ...	50
Figura 11: Espectro de emissão do plasma Surfatron com fluxo de ar de 2,5 L/min a 20ms para o plasma de argônio puro (sem interação com líquidos) e para o plasma resultante da interação com a água deionizada (DI), solução salina de concentração a 0,45% (SS 0,45%), 0,9% (SS 0,9%), 3% (SS 3%) e 7,5% (SS 7,5%).	53
Figura 12: Espectro de emissão do plasma Surfatron com fluxo de ar de 2,5 L/min a 1000mS para o plasma de argônio puro (sem interação com líquidos) e para o plasma resultante da interação com a água deionizada (DI), soluções salinas de concentração a 0,45% (SS 0,45% Zoom), 0,9% (SS 0,9% Zoom), 3% (SS 3% Zoom) e 7,5% (SS 7,5% Zoom).....	54
Figura 13: Variação de (a) fluxo térmico e (b) temperatura ao longo do tempo durante a ativação do plasma com 40 mL de água deionizada (curvas vermelhas) em comparação com a ativação sem líquido (curvas pretas).	55
Figura 14: Variação do a) fluxo térmico e b) temperatura em função do tempo durante a ativação do plasma com solução salina 0,9% (40 mL SS 0,9%) em comparação à ativação sem líquido.....	56
Figura 15: Variação dos parâmetros físico-químicos em função do tempo de ativação da água deionizada: a) pH; b) Potencial de oxidação-redução (ORP); c) Total de sólidos dissolvidos (TDS); d) Condutividade elétrica (σ); e) Oxigênio dissolvido (OD); f) Massa da amostra de água deionizada ativada por plasma, medida em tempo real.	59
Figura 16: Comparação da variação dos parâmetros físico-químicos em função do tempo de ativação por plasma: a) pH; b) Potencial de Oxido-Redução (ORP); c) Total de Sólidos Dissolvidos (TDS); d) Condutividade Elétrica; e) Salinidade das soluções salinas; f) Oxigênio Dissolvido (OD); g) Concentração de Cloro Livre (Cl); h) Massa das amostras das soluções salinas (0,45%, 0,9%, 3% e 7,5%) medidas em tempo real.	64

Figura 17: (a) Espectros de absorvância UV-Vis resolvidos no tempo (190–270 nm) de água deionizada ativada por plasma para tempos de ativação variados (até 40 minutos), destacando picos de absorção RONS característicos; (b) Área espectral integrada plotada em relação ao tempo de ativação, ilustrando o acúmulo progressivo de espécies reativas. 69

Figura 18: Espectros de absorvância UV-Vis obtidos em tempo real durante a ativação por plasma das soluções salinas: a) 0,45%; c) 0,9%; e) 3%; f) 7,5%. E as áreas integradas sob a curva de absorvância em relação ao tempo de ativação para as mesmas: b) 0,45%; d) 0,9%; f) 3%; g) 7,5%. 73

Figura 19: Contagem de unidades formadoras de colônias (CFU/mL) para os ensaios com *S. aureus* (ATCC 6538), *E. coli* (ATCC 10799) e *C. albicans* (SC 5314), utilizando água deionizada (DI) como controle, e água ativada por plasma (PAW) por 10 min e 40 min. Resultados apresentados para *S. aureus*: (a) 10 min de contato e (b) 30 min de contato; *E. coli*: (c) 10 min de contato e (d) 30 min de contato; e *C. albicans*: (e) 10 min de contato e (f) 30 min de contato. Letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas (One-way ANOVA com post hoc de Tukey). 75

Figura 20: Contagem de unidades formadoras de colônias (UFC/mL) para ensaios com *S. aureus* (ATCC 6538), *E. coli* (ATCC 1099) e *C. albicans* (SC 5314), usando solução salina a 0,9% (SS) como controle e solução salina ativada por plasma (PAS) por 10 min e 40 min. Resultados apresentados para *S. aureus*: (a) 10 min de contato e (b) 30 min de contato; *E. coli*: (c) 10 min de contato e (d) 30 min de contato; e *C. albicans*: (e) 10 min de contato e (f) 30 min de contato. Letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas (ANOVA unidirecional com teste post hoc de Tukey). 77

Figura 21: Ação diferencial de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS) em células microbianas expostas à água ativada por plasma (PAW). A ilustração destaca como as diferenças estruturais entre microrganismos afetam sua suscetibilidade a RONS. Em *S. aureus*

(gram-positivo), RONS penetram na parede celular e atingem componentes intracelulares, causando danos extensos. Em *E. coli* (gram-negativo), RONS se acumulam na membrana externa e no espaço periplásmico, retardando seu efeito antimicrobiano. Em *C. albicans* (fungo), a parede celular complexa composta de quitina, glicoproteínas e β -glucanos limita a penetração de RONS, enquanto enzimas antioxidantes neutralizam ainda mais o estresse oxidativo. 80

Lista de Tabelas

- Tabela 1:** Esquemática da classificação do plasma. Adaptado de Nehra et al., 2008 (22).24
- Tabela 2:** Concentrações estimadas de Nitrato (NO_3^-), Nitrito (NO_2^-) e Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2) em função do tempo de ativação da água deionizada por plasma. 68
- Tabela 3:** Concentrações de NO_2^- , NO_3^- e H_2O_2 gerados durante a ativação por plasma da solução salina a 0,45%. 70
- Tabela 4:** Concentrações de nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) gerados em diferentes tempos de ativação por plasma na solução salina a 0,9%. 71
- Tabela 5:** Concentrações de nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) gerados em diferentes tempos de ativação por plasma na solução salina a 3%. 71
- Tabela 6:** Concentrações de nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) geradas em função do tempo de ativação por plasma na solução salina a 7,5%. 71

Lista de Abreviaturas e Siglas

AC	Corrente Alternada
ANOVA	Análise de Variância
BHI	Infusão Hérebro e Coração
BSI	Infecção de Corrente Sanguínea
CAP	Plasm Frio em Condições Atmosféricas
DBD	Descarga de Barreira Dielétrica
DC	Descarga Contínua
DI	Água Deionizada
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
EM	Eletromagnéticas
GlidingArc	Descarga de Arco Delizante
GDE	Eletrólise de Descarga Incandescente
MRSA	<i>S. aureus</i> Resistentes à Meticilina
MW	Micro-ondas
NTAPP	Plasma de Pressão Atmosférica não Térmico
OD	Oxigênio Dissolvido
OES	Espectroscopia de Emissão Óptica
OMS	Organização Mundial da Saúde
ORP	Potencial de Óxido-Redução
PAL	Líquidos Ativados a Plasma
PAS	Solução Salina Ativada a Plasma
PAW	Água Ativada a Plasma
pH	Potencial Hidrogênico

PVDF	Filmes de Fluoreto de Polivinilideno
RCS	Espécies Reativas e Cloro/Oxido-Cloro
RF	Radiofrequência
RNS	Espécies Reativas de Nitrogênio
ROS	Espécies Reativas de Oxigênio
RONs	Espécies Reativas de Oxigênio e Nitrogênio
SDW	Descargas Sustentadas por Ondas de Superfície
TDS	Total de Sólidos Dissolvidos
UV	Ultravioleta

Lista de Símbolos

n_e	densidade de elétrons
n_i	densidade de íons
n_p	densidade do plasma
n_g	densidade do gás
T_i	temperatura de íons
T_g	temperatura do gás
T_e	temperatura de elétrons
α	grau de ionização
P	pressão
k_i	constante de ionização
τ_i	tempo de formação do arco
t	tempo

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização.....	19
1.2	Objetivos.....	20
1.3	Estrutura da Dissertação	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Plasma Atmosférico.....	22
2.1.1	Plasma.....	22
2.1.2	Plasmas Frios Não Térmicos gerados em Pressão Atmosférica.....	25
2.1.2.1	Descarga Sustentada por Onda Superficial (SWD) - Surfatron	25
2.1.2.2	Descargas de Barreira Dielétrica (DBD).....	28
2.1.2.3	Descarga de Arco Deslizante (Gliding Arc).....	31
2.2	Ativação de Líquidos com Plasma	34
2.2.1	Processo de Ativação.....	34
2.2.2	Água Ativada por Plasma (PAW)	36
2.2.3	Solução Salina Ativada por Plasma (PAS).....	37
2.3	Microrganismos	38
2.3.1	Bactérias – Gram positivas e Gram-negativas.....	38
2.3.2	<i>Staphylococcus aureus</i> (<i>S. aureus</i>).....	39
2.3.3	<i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>).....	41
2.3.4	<i>Candida albicans</i> (<i>C. albicans</i>).....	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	Sistema Surfatron	43
3.2	Caracterização Óptica do Plasma SWD.....	44
3.3	Produção dos PALs	45
3.4	Caracterização dos PALs	46
3.4.1	Análise dos Parâmetros Físico-Químicos.....	46
3.4.2	Análise Térmica da Interação Plasma-Líquido	46
3.4.3	Análise das RONS	48
3.5	Ensaio Microbiológicos.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52

4.1	Caracterização Espectroscópica da Interação do Jato de Plasma SWD com Líquidos-Alvo.....	52
4.2	Avaliação Térmica da Interação Plasma-Líquido.....	55
4.3	Análise dos Parâmetros Físico-Químicos	57
4.3.1	Água Deionizada	57
4.3.2	Soluções Salinas	61
4.4	Análise das RONS.....	67
4.4.1	PAW	68
4.4.2	PAS.....	70
4.5	Análise dos Ensaio Microbiológicos	74
4.5.1	Ensaio - PAW	75
4.5.2	Ensaio - PAS.....	76
4.6	Mecanismos	78
4.6.1	Ensaio PAW	78
4.6.2	Ensaio PAS.....	81
5	CONCLUSÃO.....	83
6	TRABALHOS FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS	86
	APÊNDICE A – DADOS RESULTANTES DOS EXPERIMENTOS ENVOLVENDO <i>CANDIDA ALBICANS</i> COM PAW	95
	APÊNDICE B- DADOS RESULTANTES DOS EXPERIMENTOS ENVOLVENDO <i>STAPHYLOCOCCUS AUREUS</i> COM PAW	96
	APÊNDICE C- DADOS RESULTANTES DOS EXPERIMENTOS ENVOLVENDO <i>ESCHERICHIA COLI</i> COM PAW	97
	APÊNDICE D - DADOS RESULTANTES DOS EXPERIMENTOS ENVOLVENDO <i>CANDIDA ALBICANS</i> COM PAS.....	98
	APÊNDICE E - DADOS RESULTANTES DOS EXPERIMENTOS ENVOLVENDO <i>STAPHYLOCOCCUS AUREUS</i> COM PAS	99
	APÊNDICE F - DADOS RESULTANTES DOS EXPERIMENTOS ENVOLVENDO <i>ESCHERICHIA COLI</i> COM PAS.....	100

1 Introdução

1.1 Contextualização

Avanços na Tecnologia de Plasma Frio em Condições Atmosféricas (*Cold Atmospheric Plasma*, CAP) têm impulsionado significativamente o desenvolvimento de estudos sobre líquidos ativados por plasma (*Plasma-Activated Liquids*, PALs). Esses líquidos são produzidos pela interação de um gás parcial ou totalmente ionizado com um meio líquido, resultando na modificação de suas propriedades físico-químicas (1). As configurações de CAP mais utilizadas para a ativação de líquidos incluem Descargas de Barreira Dielétrica (*Dielectric Barrier Discharge*, DBD) (2–5), Descargas de Arco Deslizante (*Gliding Arc Discharge*) (1,3) e Descargas Sustentadas por Ondas de Superfície (*Surface Wave Discharge*, SWD) (6–10)

A SWD, em particular, opera na frequência de 2,45 GHz, gerando um plasma estável caracterizado como uma descarga de micro-ondas. Essa configuração envolve a propagação de uma onda eletromagnética ao longo da interface plasma-dielétrico, destacando-se por ser livre de eletrodos, o que minimiza a contaminação do plasma causada por desgaste de eletrodos. Além disso, o diâmetro, a espessura e a permitividade dielétrica do tubo de descarga desempenham papéis cruciais no comportamento do plasma, influenciando tanto sua propagação quanto suas características físico-químicas. Nesse contexto, o tubo de descarga não apenas atua como um recipiente, mas também como parte essencial da estrutura de guia de ondas responsável pela propagação e interação do plasma (8,10).

A ativação de líquidos por plasma transforma suas propriedades originais, gerando espécies químicas reativas, como radicais livres (OH, O₂⁻), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), íons nitrato (NO₃⁻) e nitrito (NO₂⁻), além de modificações no pH e na condutividade elétrica (10,11). Essa gama de características únicas torna os PALs versáteis para aplicações em diversas áreas.

Na área ambiental, os PALs têm demonstrado grande potencial no tratamento de águas residuais e na remoção de poluentes orgânicos persistentes. No setor alimentício, são empregados para a desinfecção de superfícies e na extensão da vida útil de produtos frescos. Na agricultura, destacam-se por promover o crescimento vegetal e aumentar a resistência das plantas a patógenos. Na química analítica e na síntese de nanopartículas, a ativação do líquido contribui para reações mais eficientes e seletivas. No campo da medicina, o uso de PALs tem sido amplamente estudado devido às suas propriedades antimicrobianas, destacando-se na inativação de microrganismos patogênicos, esterilização de instrumentos médicos e como adjuvantes em tratamentos de infecções. Essas características tornam os PALs promissores para

reduzir infecções hospitalares, especialmente diante da crescente resistência microbiana a antibióticos (1,12,13).

Um aspecto específico de grande interesse na área médica é a ativação de soluções salinas utilizadas rotineiramente em ambientes hospitalares, como a solução salina 0,9%. Estas soluções, quando ativadas por plasma, adquirem propriedades antimicrobianas adicionais devido à formação de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), como peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radicais hidroxila (OH), íons nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-). Essas espécies podem atuar na destruição de membranas celulares, proteínas e ácidos nucleicos de patógenos, promovendo uma esterilização eficaz e segura. Além disso, soluções salinas ativadas têm o potencial de reduzir biofilmes bacterianos, que são frequentemente resistentes aos métodos convencionais de desinfecção e tratamento.

O presente trabalho de mestrado tem como objetivo realizar uma pesquisa aprofundada no campo da ativação de líquidos, mais precisamente água e soluções salinas, utilizando um sistema de Descarga Sustentada por Ondas de Superfície (SWD). A investigação inclui a ativação de água ativada por plasma (PAW) e solução salina 0,9%, visando compreender os mecanismos de ativação, as propriedades adquiridas, as alterações físico-químicas observadas e o potencial de inativação microbiológica desses líquidos ativados em microrganismos relevantes. Os testes foram realizados com bactérias gram-positivas (*Staphylococcus aureus*), gram-negativas (*Escherichia coli*) e o fungo *Candida albicans*, frequentemente associados a infecções hospitalares.

Para ampliar a compreensão sobre os efeitos antimicrobianos e a biocompatibilidade das soluções ativadas e explorar as possibilidades de aplicações específicas, também foi realizada a ativação a plasma de soluções salinas em concentrações variadas, como 0,45%, 0,9%, 3% e 7,5%, frequentemente utilizadas em contextos hospitalares específicos, como na reposição hídrica e em tratamentos de feridas.

1.2 Objetivos

Considerando a contextualização apresentada na **Seção 1.1**, o objetivo principal deste trabalho é estudar o processo de produção de PAW e de solução salina com diferentes concentrações de NaCl ativada por meio de um jato de plasma de argônio gerado por SWD e seus efeitos no processo de inativação de microrganismos. Com base nisso, os objetivos específicos do estudo são os seguintes:

1. Caracterizar os Líquidos Ativados por Plasma (PALs) produzidos de forma *ex-situ*, a fim de analisar a evolução de parâmetros físico-químicos, como pH, Potencial de Óxido-Redução (ORP), condutividade elétrica e Total de Sólidos Dissolvidos (TDS), em relação ao tempo e ao volume de ativação.
2. Empregar a técnica de espectroscopia óptica para investigar a interação entre o plasma e a água deionizada, bem como entre o plasma e as soluções salinas, examinando a transferência de calor e as modificações nas propriedades físico-químicas em função do tempo de ativação.
3. Realizar ensaios microbiológicos dos PALs, a fim de fornecer novas compreensões sobre suas capacidades de combate a patógenos, especialmente *S. aureus*, *E. coli* e *C. albicans*.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se desenvolvida ao longo de 7 capítulos distintos, sendo o Capítulo 1 o referente a esta Introdução.

O Capítulo 2, intitulado "Revisão Bibliográfica", oferece uma análise detalhada sobre os temas de plasmas atmosféricos e ativação de líquidos com plasma. Para uma melhor compreensão, esses tópicos foram subdivididos em seções, visando fornecer um aprofundamento nos conceitos fundamentais abordados na dissertação.

O Capítulo 3, denominado "Materiais e Métodos", abrange todas as etapas executadas no decorrer deste estudo, destacando a metodologia empregada, os materiais e equipamentos utilizados, bem como as técnicas de caracterização adotadas.

No Capítulo 4, intitulado "Resultados e Discussão", são apresentados os principais resultados alcançados durante a condução deste trabalho. Utilizando as metodologias delineadas no Capítulo 3, os resultados são interpretados, desenvolvidos e discutidos, inclusive estabelecendo comparações com estudos prévios da literatura.

O Capítulo 5, dedicado às "Conclusões", sintetiza as observações essenciais derivadas dos resultados apresentados no Capítulo 4.

O Capítulo 6, intitulado "Trabalhos Futuros", apresenta direções para pesquisas futuras com base nas observações realizadas e nos resultados desta pesquisa. Por fim, o tópico "Referências Bibliográficas" lista todas as fontes citadas ao longo do texto.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Plasma Atmosférico

2.1.1 Plasma

O termo plasma (do grego $\piλάσμα$, que significa “aquilo que é formado ou moldado”) foi introduzido primeiramente por Irving Langmuir em 1928, o até então “quarto estado da matéria”, como sugeriu William Crooks no final do século XIX, foi pela primeira vez na história conceituado (12,14–17). Plasma pode ser definido formalmente como um gás parcialmente ou totalmente ionizado que consiste em uma mistura de íons, elétrons, radicais livres, fótons, partículas neutras no estado fundamental e partículas excitadas e neutras movendo-se em direções aleatórias que, em média, são eletricamente neutras ($n_e \cong n_i$, sendo n_e a densidade de elétrons e n_i a densidade de íons) (14,15,17–23)

Diversas técnicas são empregadas para energizar um gás neutro e induzir a formação de plasma. Uma das maneiras de gerar plasma é por meio da aplicação de energia térmica, como nos processos de combustão, onde reações químicas liberam energia para esse fim. Outra possibilidade é por meio da compressão adiabática do gás, capaz de aquecê-lo o suficiente para induzir a formação de plasma. Além disso, feixes de energia que atravessam o gás são utilizados, sendo os feixes compostos por partículas neutras especialmente vantajosos devido à sua resistência a interferências de campos elétricos ou magnéticos. Esses feixes neutros são frequentemente empregados para manter plasmas ou aquecer dispositivos de fusão. Adicionalmente, plasma pode ser gerado pela passagem de uma corrente elétrica através de um gás, um processo conhecido como ruptura elétrica (20,21). Sua formação pode ser melhor analisada na **Figura 1**.

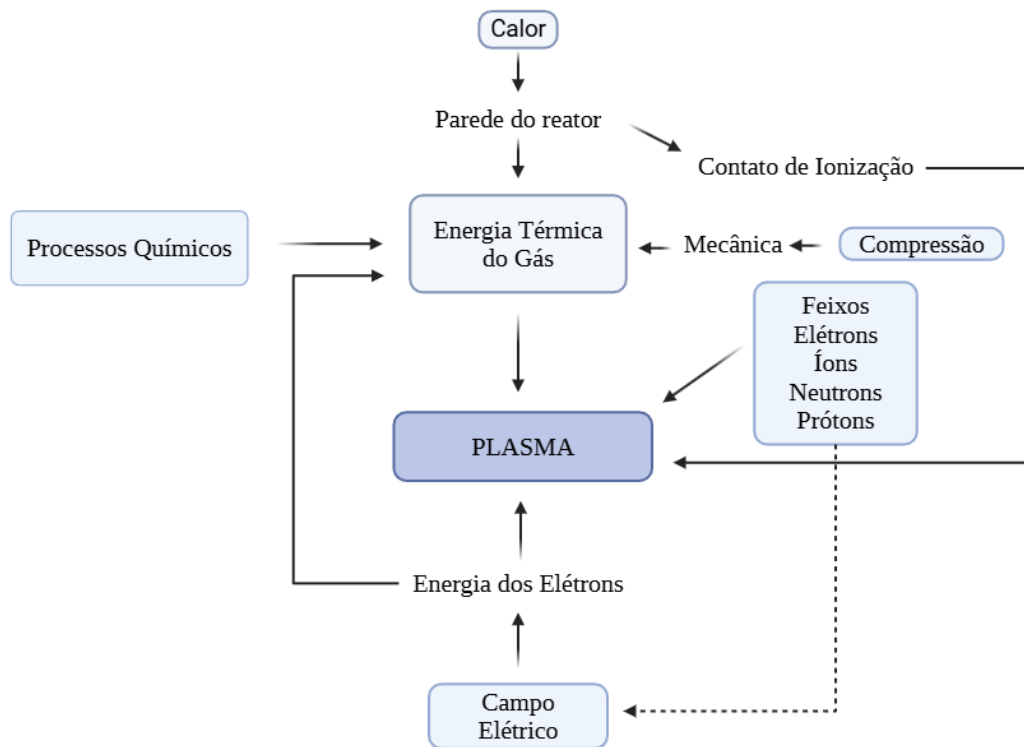


Figura 1: Esquemática dos princípios de geração do Plasma (17).

Existem parâmetros fundamentais a serem considerados na análise do plasma, como a temperatura e densidade das partículas. A temperatura, que é de natureza cinética, reflete a energia média das partículas no plasma, ressaltando a temperatura de íons (T_i), a qual é aproximadamente a temperatura do gás de operação ($T_i \approx T_g$), e a temperatura de elétrons (T_e). A diferença entre as temperaturas das espécies presentes determina a existência ou ausência do equilíbrio termodinâmico local e a dinâmica do plasma (21,24,25).

Já a densidade das espécies, é uma medida usada para quantificar a densidade de íons, elétrons, citadas anteriormente, respectivamente, como n_i e n_e . No ambiente do plasma, as partículas neutras se movem aleatoriamente, enquanto as partículas carregadas se deslocam sob a influência do campo elétrico, em um fenômeno chamado de deriva. No estado de plasma a densidade de cargas positivas e negativas são aproximadamente iguais (15,21,24,25).

O grau de ionização (α) de um plasma refere-se à proporção de átomos que perderam ou ganharam elétrons e é principalmente influenciado pela temperatura, sendo matematicamente expresso por:

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_g} \quad \text{Eq. 1}$$

onde n_g corresponde a densidade do gás. Mesmo em um gás parcialmente ionizado, onde apenas 1% das partículas estão ionizadas, o sistema pode exibir características de plasma, como resposta a campos elétricos e/ou magnéticos e alta condutividade elétrica (21,26).

Em termos gerais, os plasmas podem ser classificados em quentes e frios. A Tabela 1 esquematiza a classificação. Plasmas quentes são totalmente ionizados, ou seja, há ausência de partículas neutras, e todas as partículas constituintes estão a uma mesma temperatura. Na natureza, estes plasmas são encontrados em estrelas (22,23).

Tabela 1: Esquemática da classificação do plasma. Adaptado de Nehra et al., 2008 (22).

Classificação	Grau de ionização	Estado
Quente	Alto	$T_e \approx T_g \approx T_i$ $T_p = 10^6 - 10^8 K$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$
Frio de equilíbrio térmico	Baixo: da ordem ou acima de 1%.	$T_e \approx T_g \approx T_i \leq 2 \times 10^4 K$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$
Frio de não-equilíbrio térmico	Baixo: $10^{-2} - 10^{-5} \%$.	$T_e \gg T_i \approx T_g = 300 \dots \dots \dots 10^3 K$ $n_e \geq 10^{10} m^{-3}$

Em laboratório, estes plasmas são obtidos tipicamente em reatores de fusão nuclear. Por outro lado, os plasmas frios são parcialmente ionizados, com alta concentração de partículas neutras, podendo ser de dois tipos: plasmas térmicos e não-térmicos. Os plasmas térmicos são aqueles que se encontram em equilíbrio termodinâmico, ou seja, as temperaturas de todas as espécies presentes são aproximadamente iguais. Estes plasmas são gerados na natureza em raios. Em laboratório, plasmas térmicos podem ser produzidos na forma de arcos, sprays, chamas e jatos, podendo ser utilizados em soldas, revestimentos com materiais refratários e vitrificação de resíduos. Já os plasmas não-térmicos são aqueles em que a temperatura dos elétrons é muito maior do que a temperatura dos íons e do gás. Em muitos sistemas de plasmas não-térmicos, a temperatura de elétrons é de aproximadamente 10.000 K, enquanto a temperatura do gás é próxima à temperatura ambiente. Estes plasmas podem ser encontrados na natureza nas auroras boreais e em laboratório podem ser gerados por descargas do tipo corona, descargas de barreira dielétrica (DBD), descargas de arco deslizante e excitadas por micro-ondas, por exemplo (15,17,27).

Plasmas são gerados em temperaturas, pressão e condições específicas, podendo ser plasmas de alta temperatura, como os de fusão (a exemplo dos plasmas quentes gerados de reatores de fusão nuclear) e de equilíbrio térmico (a exemplo de plasmas gerados de tochas de plasmas térmicos), ou os plasmas de baixa temperatura, conhecidos plasmas frios gerados de descargas em não equilíbrio térmico (a exemplo do plasma empregado no presente trabalho) (14,15,23,28).

2.1.2 Plasmas Frios Não Térmicos gerados em Pressão Atmosférica

O Plasma Frio em Condição Atmosférica, em inglês Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma (NTAPP), também conhecido como “Plasma Atmosférico Frio”, do inglês “Cold Atmospheric Plasma” (CAP) ou “plasma de baixa temperatura à pressão atmosférica” são fontes de produção de espécies quimicamente reativas que atuam como agentes oxidantes (28–31) e são amplamente empregados em diversos setores, como o biomédico, médico e odontológico, oferecendo tratamento preciso e localizado em diversos campos terapêuticos (8,25,29,32). Este tipo de plasma opera sob condições de temperatura e pressão próximas aos padrões ($P \approx 1 atm$, $T_{gás} \approx 300K$), nele, a temperatura dos elétrons é mais elevada do que a do gás, como visto na **Tabela 1**, devido às grandes diferenças de massa entre eles, fazendo com que o plasma seja classificado como não térmico, mantendo-se em um estado de baixa temperatura do gás (11,19,21).

O CAP funciona a uma pressão atmosférica padrão; temperatura dos elétrons em um nível adequado para dissociação, excitação e ionização por impacto eletrônico ($>1 eV$); e transferência de calor para o alvo mantida abaixo de um limiar prejudicial (11,19). Ele é capaz de gerar uma variedade de configurações de descarga distintas, seja por meio de diferentes geometrias, arranjos de eletrodos ou fontes de alimentação, que podem incluir corrente contínua (DC), corrente alternada (AC) de baixa frequência, radiofrequência (RF, podendo operar em $\sim 0.1 - 100 MHz$) ou micro-ondas (MW, podendo operar em $\sim 1 - 20 GHz$) (21–23,30,33,34).

Os CAPs apresentam uma variedade de configurações diversas, dentre elas: Descarga Sustentada por Onda Superficial (SWD), Descarga de Barreira Dielétrica (DBD) e Descarga de Arco Deslizante, cada uma com suas próprias características, que serão detalhadas a seguir (26,35).

2.1.2.1 Descarga Sustentada por Onda Superficial (SWD) - Surfatron

O dispositivo de Descarga Sustentada por Onda Superficial (SWD) representa uma fonte de plasma robusta e versátil, que opera eficientemente em condições de pressão atmosférica.

Utilizando micro-ondas com uma frequência de 2,45 GHz, essas descargas apresentam alta estabilidade, reprodutibilidade e adaptabilidade a diferentes condições operacionais (8,10).

As colunas de plasma sustentadas por ondas eletromagnéticas (EM) de superfície geram descargas gasosas que combinam as características das descargas de rádio frequência (RF) e micro-ondas, abrangendo amplas faixas de parâmetros operacionais. Essa flexibilidade torna os SWDs particularmente úteis para estudos paramétricos detalhados, em que variáveis individuais podem ser isoladas para investigar seus efeitos específicos no sistema. Esse controle permite explorar como diferentes condições, como potência aplicada, composição do gás e fluxo, influenciam nas propriedades do plasma (36).

No contexto físico, o tubo de descarga desempenha um papel central na sustentação do plasma. Ele não é apenas um recipiente para conter o gás ionizado, mas também um elemento crítico no comportamento das ondas eletromagnéticas que propagam energia para o plasma. A interação das micro-ondas com o gás ionizado ocorre ao longo da interface plasma-dielétrico, onde a eficiência dessa interação depende diretamente de fatores como o diâmetro, espessura e composição dielétrica do tubo. Essas propriedades afetam não apenas a distribuição do campo eletromagnético no guia de ondas, mas também a estabilidade e o alcance espacial do plasma gerado.

Nas descargas de micro-ondas, o plasma gerado pelo SWD frequentemente se estende além da cavidade inicial, acompanhando o formato do tubo de descarga devido à propagação das ondas eletromagnéticas. Essa característica única permite que o plasma seja utilizado em aplicações em que é necessário um comprimento estendido ou uma área maior de interação. Além disso, a escolha precisa dos materiais do tubo e sua permitividade elétrica possibilita ajustar as características do plasma para atender a diferentes requisitos experimentais ou industriais (8,36).

2.1.2.1.1 Uso do Surfatron em aplicações Biomédicas

O Surfatron é um sistema altamente eficiente e versátil, amplamente utilizado por suas qualidades distintas, como a geração de plasma não térmico, que possibilita o tratamento de materiais sensíveis ao calor. Sua operação é estável e controlada, sem a necessidade de eletrodos, o que elimina o risco de contaminação e aumenta a confiabilidade do processo. Além disso, o Surfatron se destaca por seu baixo consumo de energia, combinado com uma alta densidade de potência, o que o torna uma ferramenta econômica e eficaz. Com essas características, seu uso tem sido amplamente explorado pela biomedicina, tanto em líquidos ativados por plasma quanto em outras aplicações (5,8,37–40).

No estudo de V. Stranak *et al.* (2006) foi analisado o efeito da esterilização em *Neisseria sicca*, *Deinococcus radiodurans*, *Enterococcus faecium* e *Stenotrophomonas maltophilia*, utilizando um reator Surfatron operando com misturas de argônio (590 sccm) e oxigênio ou nitrogênio (10 sccm) (40). As culturas bacterianas foram expostas ao plasma gerado, e as áreas de inibição foram medidas. Os resultados indicaram que o plasma produzido pelo reator foi eficaz contra bactérias Gram-negativas, enquanto para bactérias Gram-positivas a eficiência de esterilização foi menor ou não significativa.

O estudo de Vasile *et al.* (2011) investigou a otimização dos parâmetros de descarga para a funcionalização de superfícies utilizando plasma surfatron e a imobilização de proteínas em filmes de fluoreto de polivinilideno (PVDF) (38). A funcionalização foi comparada com tratamentos anteriores com plasma de N₂ e N₂/H₂, evidenciando a influência dos grupos químicos implantados na aderência das proteínas. Os resultados mostraram que o plasma de CO₂ introduziu grupos ácidos na superfície, enquanto os plasmas de N₂ e N₂/H₂ geraram superfícies básicas e anfotéricas, respectivamente. O estudo concluiu que o plasma de micro-ondas é uma técnica eficiente para modificar superfícies poliméricas, aprimorando sua adesão e biocompatibilidade, com aplicações promissoras em biossensores e dispositivos biomédicos.

Outro trabalho que mostra a aplicação do sistema surfatron na biomedicina é o de Bogdanov. *et al.* 2018 (37). Nele o uso do sistema é aplicado com o intuito de analisar a descontaminação da superfície de frutas pequenas, como mirtilo, morango e cerejas, além de analisar o efeito do CAP nas propriedades antioxidantes dos frutos. De acordo com o trabalho, os resultados indicam que a eficácia da descontaminação microbiana variou de acordo com a topografia da fruta, além de que a atividade antioxidante das frutas não foi significativamente afetadas. No entanto, os autores destacam que a desinfecção não atingiu os níveis esperados, sugerindo a necessidade de otimização dos parâmetros do plasma para melhorar a eficácia do procedimento.

Já L. Čechová *et al.* (2025) investigaram o efeito da PAW na germinação e no crescimento de sementes de *Cucumis melo*, analisando as alterações na composição da água tratada, seu impacto nos sistemas biológicos e a eficiência do tratamento (39). O estudo utilizou três sistemas de plasma, incluindo o Surfatron, operando com uma potência de entrada de 20 W, fluxo de argônio de 5 L min⁻¹ e tempos de tratamento de 2, 5 e 8 minutos. Três tipos de água foram avaliados, e os resultados indicaram que a PAW preparada a partir de água destilada proporcionou o maior estímulo ao crescimento das plântulas, especialmente quando gerada por descarga de micro-ondas sustentada por onda de superfície.

Diante dos estudos apresentados, fica evidente que o Surfatron é um sistema versátil com aplicações promissoras na biomedicina, desde a esterilização de microrganismos até a funcionalização de superfícies e a ativação de líquidos para tratamento de sementes e alimentos. A versatilidade do sistema, aliada à sua eficiência energética e estabilidade operacional, reforça seu valor como uma tecnologia promissora em diferentes áreas. No entanto, os resultados indicam que a eficácia do Surfatron pode variar conforme as condições experimentais e o tipo de aplicação, reforçando a importância da otimização dos parâmetros de descarga para maximizar seus benefícios. Com isso, à medida que novas pesquisas aprofundam o entendimento sobre os efeitos do plasma em sistemas biológicos, espera-se que sua aplicação seja ampliada, proporcionando avanços significativos tanto na desinfecção quanto na agricultura sustentável.

2.1.2.2 Descargas de Barreira Dielétrica (DBD)

O sistema DBD consiste em dois eletrodos metálicos, sendo que pelo menos um deles é revestido por uma camada dielétrica, impedindo a transição para a descarga de arco e promovendo um campo elétrico não uniforme, permitindo assim a geração de plasma não térmico (41–43). Para garantir a operação estável do plasma, a distância entre os eletrodos é limitada a alguns milímetros de largura (42). A inicialização da descarga é feita por meio de uma fonte de tensão alternada e sua natureza, seja filamentar ou difusa, varia dependendo da composição do gás de trabalho, excitação, tensão e frequência. A seleção do material para a barreira é crucial devido aos efeitos de carregamento, ionização por penetração em superfícies, entre outros (42).

O desempenho da barreira também é influenciado pelo tipo de gás e pela frequência do campo. A formação de descargas uniformes, do tipo difuso, é viabilizada pela carga superficial adequada do dielétrico e pela ocorrência de múltiplas rupturas sobrepostas. As centelhas que se expandem radialmente fornecem a carga espacial necessária para a autoestabilização de um plasma semelhante ao luminescente (glow discharge). A constante dielétrica da barreira é um fator crucial no desempenho da descarga (42).

Existem diversas técnicas para gerar plasma de DBD, variando conforme o design e a finalidade dos sistemas (**Figura 2**). Os sistemas planares são ideais para tratamentos de superfície, enquanto os de leito empacotado e microplasma são específicos para controle de poluição e terapias médicas, respectivamente. Os sistemas cilíndricos, por sua vez, destacam-se na promoção de tratamentos de gás uniforme. Essas configurações têm várias aplicações, incluindo modificação de superfície, síntese de materiais e ativação de líquidos como PAW. O

processo de ativação de água pelo DBD, por meio da exposição a efluentes gasosos contendo espécies reativas, representa uma nova fronteira na pesquisa científica, com potencial para diversas aplicações multidisciplinares, dependendo dos parâmetros de descarga ajustados (41).

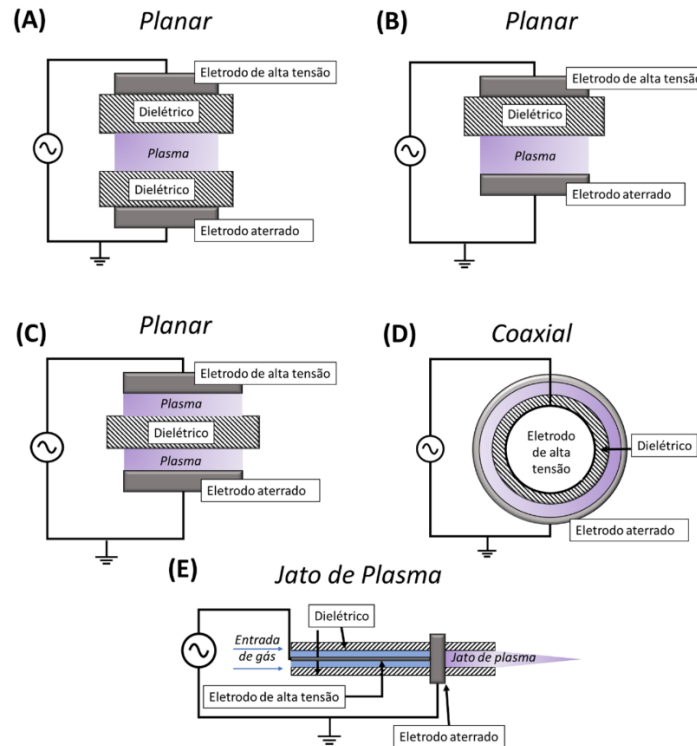


Figura 2: Sistema DBD de geometria planar (A, B e C), Coaxial (D) e Plasma Jet (E).

Adaptado de (5).

2.1.2.2.1 Uso do DBD em Aplicações Biomédicas

O DBD é uma técnica versátil de geração de plasma que permite diferentes configurações. Sua adaptabilidade e versatilidade a torna útil para diversas aplicações. No campo biomédico, a DBD é amplamente utilizada devido à sua capacidade de produzir espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), como ozônio (O_3), radicais hidroxila (OH^\cdot) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), essenciais para processos de desinfecção e esterilização. Além disso, sua capacidade de ativar líquidos gera compostos como nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-), relevantes para aplicações médicas e ambientais. Essas características tornam a DBD uma ferramenta promissora na biomedicina, oferecendo eficiência antimicrobiana e segurança para diferentes tratamentos (5,44,45).

O estudo de Miranda et al. (2024) utilizou um reator coaxial de DBD para produzir água ativada por plasma (PAW) a partir de água deionizada, empregando três gases: ar comprimido (CA), hélio (He) e argônio (Ar). Foram analisadas as propriedades físico-químicas da PAW, incluindo pH, potencial de oxirredução (ORP), condutividade e concentração de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), como NO_2^- , NO_3^- , H_2O_2 , HNO_2 e O_3 . Em testes microbiológicos, CA-PAW teve o resultado mais expressivo, reduzindo em 99,99% as bactérias testadas, enquanto a redução de *C. albicans* foi menos pronunciada. Testes de citotoxicidade indicaram que todas as PAWs foram classificadas como não citotóxicas, destacando a segurança e potencial biomédico do sistema DBD (44).

Kostov et al. (2010) utilizaram um reator DBD, colocando placas de Petri fechadas, cultivadas com meio de ágar contendo *E. coli* ou *S. aureus*, entre dois eletrodos metálicos conectados a um transformador de alta voltagem. Os danos estruturais induzidos pelo plasma nas bactérias foram analisados por Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM). A análise de SEM revelou alterações nas membranas celulares de ambos os microrganismos, com algumas células de *S. aureus* sendo destruídas e as de *E. coli* apresentando intensa erosão. O processo de esterilização envolve tanto danos químicos causados pelas espécies reativas quanto danos físicos nas membranas bacterianas (45).

Em seu estudo, Lima et al. (2025) utilizam um DBD de superfície para testes diretos e indiretos, no caso utilizando RPMI e DEMEM, em melanoma murino (B16F10) e fibroblasto (L929). O tratamento direto com plasma foi mais eficaz na redução da viabilidade das células cancerígenas B16F10, devido à ação de RONS de curta duração e radiação UV. O tratamento indireto com Plasma Activated Medium (PAM) também foi eficaz, mediado por RONS de longa duração, como peróxido de hidrogênio. O tratamento com plasma teve um efeito seletivo sobre as células cancerígenas, com poucos efeitos nas células normais, sugerindo uma diferença na permeabilidade das membranas celulares (46).

Assim como o Surfatron, o DBD é um sistema amplamente empregado em diversas áreas, com destaque para a biomedicina. Sua capacidade de gerar espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS) essenciais para processos de desinfecção e esterilização, aliada à habilidade de ativar líquidos para gerar compostos relevantes para aplicações médicas, a torna altamente eficiente e segura. Estudos como os de Miranda et al. (2024) e Lima et al. (2025) demonstram a eficácia do DBD na redução de viabilidade bacteriana e celular, com destaque para sua seletividade em células cancerígenas, sem causar danos significativos às células normais. Além disso, o reator DBD também mostrou resultados promissores em testes

microbiológicos e citotóxicos, evidenciando seu potencial tanto para esterilização quanto para o desenvolvimento de novas terapias.

2.1.2.3 Descarga de Arco Deslizante (Gliding Arc)

A Descarga de Arco Deslizante (Gliding Arc) é um sistema de Plasma Não Térmico à Pressão Atmosférica (NTAPP). Esse sistema é geralmente composto por dois eletrodos metálicos divergentes, embora possam ser utilizados mais eletrodos, dependendo da configuração. O arco elétrico é iniciado na menor distância entre os eletrodos, onde a densidade do campo elétrico é maior, e então se desloca ao longo do fluxo de gás. À medida que o arco é estendido pelo fluxo, a coluna de plasma aumenta de comprimento, enquanto a voltagem aplicada é ajustada para sustentar a descarga (30,33,34,47).

Os sistemas Gliding Arc operam em condições de pressão atmosférica ou até mesmo acima dela, com uma potência dissipada que pode atingir até 40 kW por par de eletrodos. Esses sistemas se destacam por sua capacidade de funcionar em condições de não equilíbrio térmico, onde os elétrons permanecem em temperaturas muito mais altas do que as espécies neutras e íons, possibilitando processos químicos altamente seletivos e eficientes.

Uma das características mais importantes do Gliding Arc é sua versatilidade no tratamento direto de gases ou vapores em uma ampla variedade de condições operacionais. Ele pode manipular gases em ambientes com pressões baixas ou altas, frios ou quentes, com eficiência e mínima perda de pressão no fluxo. Os gases processados incluem, mas não estão limitados a, argônio (Ar), nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂), hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S), dióxido de enxofre (SO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), outros hidrocarbonetos, vapor de água, ar e suas misturas. Essa flexibilidade torna o sistema ideal para diversas aplicações industriais e ambientais, como síntese de produtos químicos, redução de emissões de gases poluentes e geração de plasma ativado para processos catalíticos e reações químicas específicas (30,47,48).

O sistema de Gliding Arc é considerado transiente, sendo caracterizado pela evolução de 3 fases: ruptura/quebra do gás; regime térmico/fase de aquecimento do equilíbrio; e regime não térmico/fase de reação de não equilíbrio, descritas a seguir e esquematizadas na **Figura 3**. (30,33,34,47,48)

- **Ruptura do gás:** o processo inicia quando o gerador de alta voltagem cria o campo elétrico necessário para ionizar o ar entre os eletrodos. O tempo de formação do arco

(τ_i), geralmente dado em μs , pode ser calculado a partir da equação cinética que considera a concentração de elétrons:

$$\frac{dn_e}{dt} = k_i n_e n_g = \frac{n_e}{\tau_i} \quad \text{Eq. 2}$$

onde, t é o tempo em s e k_i é a constante de ionização.

- **Regime térmico:** durante essa fase de quase equilíbrio da descarga do arco deslizante, a temperatura do gás permanece relativamente constante. O plasma do arco em quase equilíbrio se desloca com o fluxo de gás, com velocidades muito próximas entre eles. À medida que o comprimento do arco aumenta, essa diferença de velocidade diminui. Durante esse movimento, o comprimento da coluna de plasma e, conseqüentemente, a potência consumida pela descarga elétrica, aumentam até atingir o máximo disponível da fonte de alimentação.
- **Regime não térmico:** quando o arco deslizante atinge um comprimento crítico ($l_{\text{crítico}}$), uma nova fase tem início. Nesta etapa, as perdas de calor do plasma excedem a energia fornecida pela fonte, impedindo a manutenção do equilíbrio termodinâmico. Isso resulta no resfriamento rápido do plasma até a temperatura do gás, enquanto os elétrons mantêm uma alta condutividade ($T_e \approx 1 \text{ eV}$, cerca de 11.600 K) e ocorre uma ionização gradual. Essa configuração do arco deslizante se assemelha à descarga de brilho contraído, favorecendo a estimulação de reações químicas não equilibradas. Após o término desta fase não equilibrada, o arco é reiniciado na menor distância entre os eletrodos, conferindo a descarga um caráter cíclico.

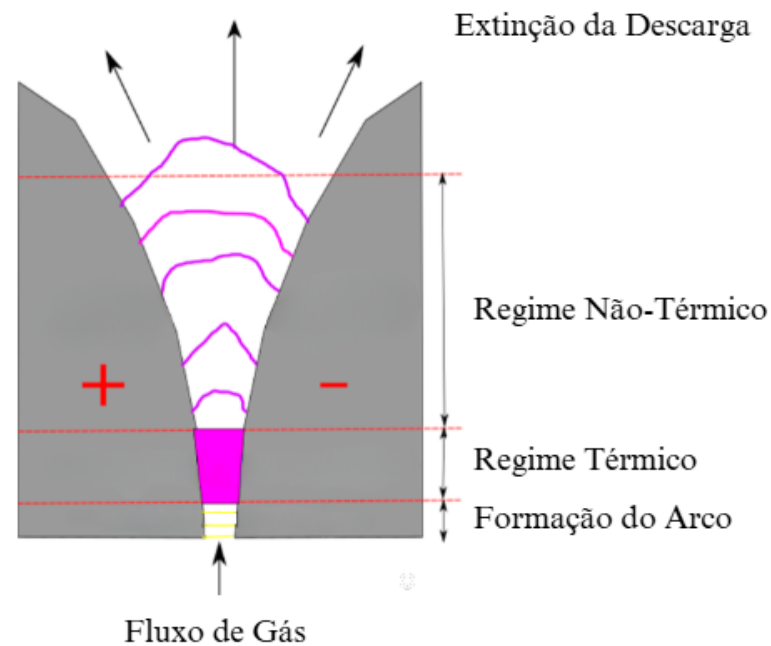


Figura 3: Esquemática das fases de evolução do Gliding Arc em função da distância de separação dos eletrodos. Adaptado de Dorosz, et al., 2024 (49).

Um arco deslizante apresenta grandes vantagens do ponto de vista da simplicidade e eficiência energética, além de capacidade de alcançar alta potência para uma alta produtividade do reator, mantendo um alto grau de não equilíbrio para sustentar um processo químico seletivo. (48).

2.1.2.3.1 Uso do Gliding Arc em aplicações Biomédicas

Como mencionado anteriormente, o Gliding Arc destaca-se devido à sua versatilidade e inúmeras vantagens, incluindo a capacidade de gerar plasma altamente energético e rico em espécies químicas reativas, como radicais hidroxila (OH^\cdot), oxigênio atômico (O) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Por combinar alta densidade de plasma com baixa temperatura do gás, o GA viabiliza aplicações inovadoras na medicina e na odontologia, impulsionando avanços no tratamento de infecções e na modificação de superfícies biomédicas, ampliando seu potencial como ferramenta terapêutica e tecnológica (5,48,50,51).

Hameedl et al. (2020) investigaram o uso do Gliding Arc para a desinfecção de água contaminada por bactérias, destacando sua eficácia como um método ambientalmente amigável e livre de resíduos secundários. O estudo avaliou três tipos de bactérias: *Escherichia coli* (Gram-negativa), *Salmonella* (Gram-negativa) e *Staphylococcus aureus* (Gram-positiva). A

exposição ao plasma reduziu progressivamente a taxa de sobrevivência bacteriana, com *Salmonella* sendo completamente eliminada em 20 minutos, enquanto *E. coli* e *S. aureus* requereram 30 minutos para inativação total.

Zhu et al. (2022) estudaram a ativação da água por um reator de arco deslizante gerador de efluente gasoso rico em NO, observando que a redução do fluxo de ar aumentou a concentração de espécies reativas. O efluente de plasma e a mistura de NO + ar apresentaram composições semelhantes de RNS, mas apenas o plasma gerou ROS. Nos testes de esterilização, a PAW tratada com 0,25 SLM de efluente de plasma por 5 minutos inativou 6 logs de *S. aureus* Resistentes à Meticilina (MRSA), enquanto uma solução com espécies de vida longa reduziu 3,51 logs. A solução tratada com NO + ar também inativou 6 logs, sugerindo o papel essencial do NO aquoso, mas sua ação antimicrobiana depende de um ambiente ácido (50).

Em outro estudo, Chiappim et al. (2023) avaliaram os efeitos do jato de plasma de arco planador (GAPJ) na inativação de *F. meridionale* e *F. graminearum*, bem como na degradação da micotoxina DON em cevada contaminada. O tratamento por 15 minutos inativou completamente *F. meridionale*, enquanto *F. graminearum* apresentou resistência. Após 20 minutos de exposição, observou-se uma redução de até 2 log UFC/g de fungos e leveduras, além de uma diminuição de 89% nos níveis de DON. No entanto, houve um aumento na concentração de D3G, sugerindo a conversão de DON. Estudos adicionais são necessários para identificar micotoxinas modificadas formadas pelo tratamento e avaliar a viabilidade do uso do GAPJ na indústria alimentícia (51).

Portanto, o Gliding Arc demonstra ser um sistema de Plasma de Atmosfera Fria (CAP) que pode ser amplamente utilizado em diversas áreas, com destaque para a biomedicina, devido à sua capacidade de gerar um plasma altamente energético e repleto de espécies químicas reativas. Essas características tornam-no uma ferramenta eficaz no tratamento de infecções, esterilização de superfícies biomédicas e modificação de materiais, além de permitir a desinfecção de água e a eliminação de patógenos resistentes, como bactéria

2.2 Ativação de Líquidos com Plasma

2.2.1 Processo de Ativação

Estudos sobre a interação entre o plasma e os líquidos deram origem ao conceito de “líquido ativado por plasma” (PAL). No contexto histórico, em 1789, Van Troostwijk e Deinman relataram a decomposição da água por uma descarga elétrica. No entanto, foi somente em 1887 que Gubkin deu um grande impulso a essa área ao introduzir a Eletrólise de Descarga

Incandescente (GDE), utilizando uma descarga incandescente para reduzir íons de prata em solução aquosa (11,19,24).

A ativação de líquidos por plasma implica na exposição de um líquido específico a um plasma com parâmetros cuidadosamente controlados, incluindo composição do plasma, espaçamento entre os eletrodos, material dos eletrodos, pressão, tempo de exposição, entre outros fatores relevantes. Esse processo resulta da interação de elementos físico-químicos, como UV, calor, campo eletromagnético e espécies reativas (1,11,24,26,31,35,52,53).

O CAP é conduzido por partículas reativas que abrangem uma variedade de espécies químicas altamente reativas, radiação em diversas faixas de comprimento de onda e campos eletromagnéticos (11,24,26,53). Essas espécies reativas desempenham um papel central no processo. No contexto do PALs, uma diversidade de espécies reativas, que podem ter um tempo de vida curto ou longo, podem ser observadas, compreendendo uma mistura de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), tais como O_3 , O_2 , O_2^- , OH , HOO , H_2O_2 , $ONOO^-$, NO_2^- , HNO_2 , NO_2 , NO_3^- (1,11,24,26,53,54).

Os sistemas para gerar PAL são variados e podem ser classificados em: descarga direta em líquidos, com ativação direta; descargas em fase gasosa sobre o líquido, com ativação de forma indireta; e descargas multifásicas do tipo bolhas ou aerossol (11,24,35).

A utilização de CAPs para a ativação de líquidos de forma indireta vem atraindo atenção. Seu estudo a separa em 3 regiões (fases) distintas, a de plasma, a de gás e a de líquido, como pode ser melhor visualizada na **Figura 4** (11,24,55). As RONS são produzidas nessas fases.

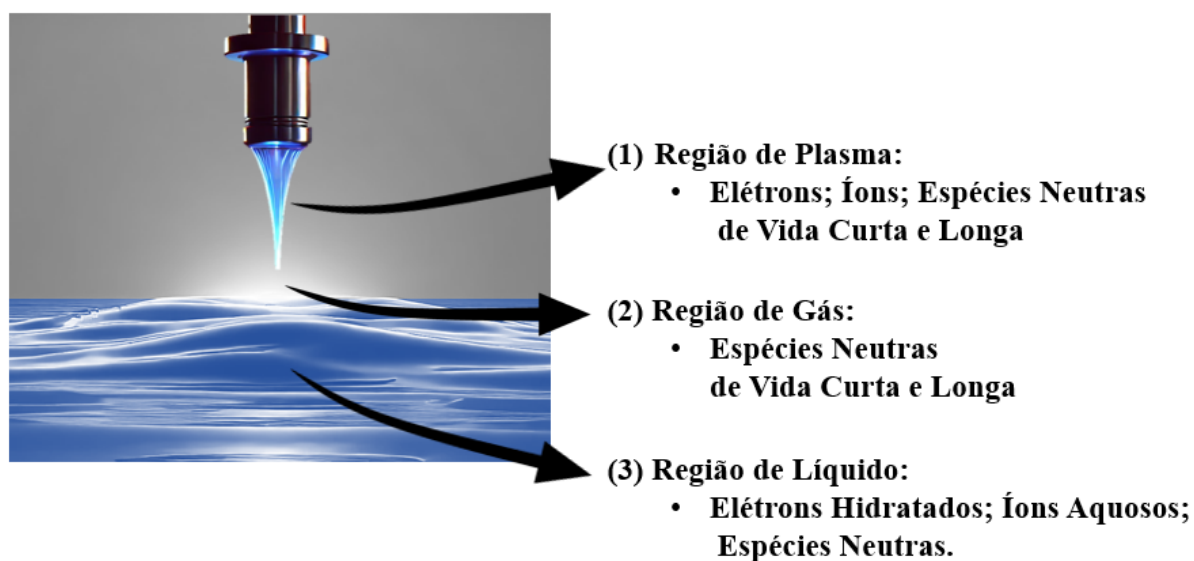


Figura 4: Representação das regiões de um processo de ativação indireto de líquido à plasma.

Na Região de plasma (1), são encontrados elétrons, íons, e espécies as neutras de vida curta e longa ($\bullet\text{OH}$, $\bullet\text{NO}$, $\bullet\text{H}$, $\bullet\text{O}$, $\bullet\text{N}$). Na Região de Gás (2), são encontradas as espécies neutras de vida longa ($\bullet\text{OH}$, O , H , $\bullet\text{NO}$, HNO_3 , O_3 , H_2O_2 , HNO_2). Já na Região de Líquido (3), são encontrados elétrons hidratados, íons aquosos e espécies neutras (H_2O_2 , NO_2 , NO_3 , O_3) (11,24,55).

Normalmente, é assumido que as espécies reativas têm origem no plasma e são transportadas por várias regiões antes de atingirem o líquido. Além disso, sabe-se que algumas dessas espécies são geradas na fase gasosa devido à exposição à radiação ultravioleta e à fragmentação de moléculas nessa região (24). No entanto, as características das espécies ativas e como elas se distribuem entre as fases gasosa e líquida são influenciadas pela estrutura do reator de plasma, pelas condições da descarga e, em particular, pela composição do gás (31).

2.2.2 Água Ativada por Plasma (PAW)

Quando moléculas de água entram em contato com as partículas geradas pelo plasma, inicia-se uma sequência de reações químicas que resulta na formação de uma mistura única de substâncias altamente reativas, conhecida como Água Ativada por Plasma (PAW). Essa água também é referida como "ácido plasmático" devido às suas propriedades biocidas e reatividade química (31,35,54).

Nos últimos anos, o interesse pela PAW aumentou significativamente devido ao seu potencial em diversas áreas, incluindo as ciências médicas e biológicas, agricultura e indústria

alimentícia. Diferentes tipos de água têm sido utilizados para ativação, como água destilada, água deionizada e até mesmo água da torneira, com o objetivo de explorar suas propriedades em diferentes contextos (1).

Parâmetros operacionais, como o método de ativação, o tipo de gás injetado, o ambiente químico e a tensão aplicada, influenciam diretamente nas propriedades da PAW, determinando o tipo e a concentração das espécies reativas geradas (1,52,54). É importante destacar que o processo de ativação ocorre sem a necessidade de aditivos químicos, tornando a PAW uma solução altamente sustentável e com grande capacidade de inativar uma ampla gama de microrganismos (35).

O plasma, ao interagir com a água, gera espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), incluindo superóxido, radical hidroxila, oxigênio singlete e óxido nítrico. Essas espécies, embora de curta duração, podem ser convertidas em formas mais estáveis, como peróxido de hidrogênio (H_2O_2), nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-) (56). Essa dinâmica química confere à PAW propriedades biocidas e antimicrobianas que a tornam promissora em aplicações como descontaminação de superfícies, tratamento de infecções e preservação de alimentos.

No entanto, as propriedades da PAW são temporárias, pois suas espécies reativas se degradam com o tempo, retornando ao estado de água comum. Essa limitação, embora aparente, reforça o caráter ecologicamente sustentável da PAW, já que a ausência de resíduos químicos permanentes a torna segura para o meio ambiente (35). Como os demais líquidos ativados por plasma (PALs), a PAW tem sido amplamente explorada em campos como agricultura e biomedicina (3,35,54,57).

Apesar dos avanços recentes no desenvolvimento e otimização de tecnologias para a geração de PAW, ainda existem lacunas no conhecimento que precisam ser abordadas. Questões relacionadas ao impacto econômico e ambiental da geração de plasma, bem como a compreensão detalhada dos mecanismos bioquímicos responsáveis por sua atividade e estabilidade, permanecem como desafios científicos importantes (35).

2.2.3 Solução Salina Ativada por Plasma (PAS)

Além da ativação da água, um destaque entre os líquidos ativados por plasma (PALs) é a Solução Salina 0,9%, frequentemente referida como soro fisiológico. Quando submetida à ativação por plasma, essa solução é designada como Solução Salina Ativada por Plasma (PAS) (58–60). Assim como a PAW, a PAS tem despertado grande interesse em diversas áreas, particularmente nas ciências médicas, devido ao seu potencial em esterilização, inativação

microbiana e de antibióticos, além de aplicações terapêuticas, como em alguns tratamentos contra o câncer (58–62).

A PAS se diferencia por produzir, além das RONS, como H_2O_2 , NO_2^- e NO_3^- , também espécies reativas de cloro (RCS), como hipoclorito (HClO/ClO^-) e cloro molecular (Cl_2). Essas RCS têm propriedades antimicrobianas adicionais, que ampliam as possibilidades de uso da PAS. No entanto, a caracterização e quantificação dessas espécies ainda precisam ser mais detalhadas, especialmente considerando as variações nos métodos de ativação do plasma e nas condições experimentais (63).

Uma diferença fundamental em relação à PAW é que a PAS não afeta a pressão osmótica, tornando-a mais adequada para uso em células e organismos vivos. Essa característica, aliada à sua composição eletrolítica semelhante à do fluido extracelular humano, faz com que a PAS seja uma opção terapêutica particularmente atrativa, mas que ainda demanda maior estudo e compreensão (58).

2.3 Microrganismos

2.3.1 Bactérias – Gram positivas e Gram-negativas

Bactérias são organismos unicelulares e procariontos (do grego, que significa “pré-núcleo”), ou seja, respectivamente, são compostos por apenas uma célula e, de maneira simplificada, não possuem seu material genético organizado por uma membrana nuclear especial. Possuem morfologias diferentes: *bacilos* (com formato cilíndricos/bastontes), *cocos* (com formato esféricas/elipsoidais) e *espirais*. (com formato espiralado). Também possuem diferentes estruturas externas, com destaque para a parede celular, que é responsável pela forma da célula e, a partir de sua variação de sua composição e estrutura, pode separar bactérias em gram-positivas e gram-negativas (64).

Nas bactérias gram-positivas, a parede celular é composta por várias camadas espessas de peptidoglicano, conferindo-lhe uma estrutura rígida e densa. As paredes celulares das bactérias gram-positivas abrigam os ácidos teicoicos, compostos essencialmente por álcoois como glicerol ou ribitol e fosfato. Existem duas categorias de ácidos teicoicos: o ácido lipoteicoico, que atravessa a camada de peptidoglicano e se conecta à membrana plasmática, e o ácido teicoico da parede, que está ligado à camada de peptidoglicano. Devido à sua carga negativa, proveniente dos grupos fosfato, os ácidos teicoicos desempenham um papel crucial na regulação do movimento de cátions para dentro e para fora da célula (65).

Ao contrário das bactérias gram-positivas, as bactérias gram-negativas apresentam paredes celulares compostas por apenas uma ou poucas camadas finas de peptidoglicano, sem ácidos teicoicos, e possuem uma membrana externa. Na **Figura 5**, é possível ver uma diferenciação simplificada entre as classificadas.

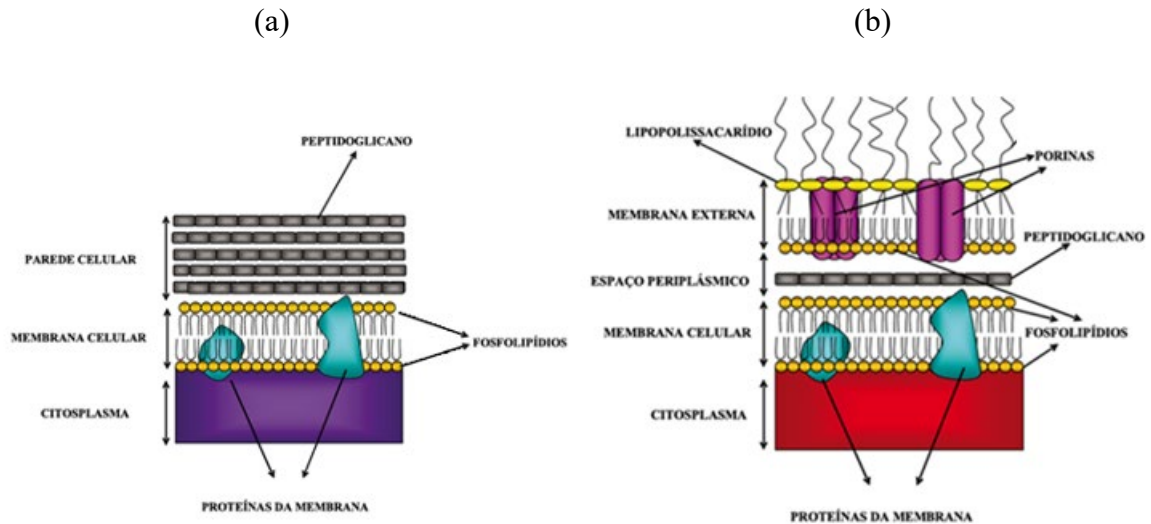


Figura 5: Representação da estrutura da parede celular de bactérias Gram-positivas (a) e Gram-negativas (b). Adaptado de Moreira et al., 2015 (65).

O peptidoglicano está ligado a lipoproteínas na membrana externa e é encontrado no periplasma, onde há uma alta concentração de enzimas de degradação e proteínas de transporte. Devido à quantidade limitada de peptidoglicano, as bactérias gram-negativas são mais suscetíveis ao rompimento mecânico. A membrana externa dessas células é composta por lipopolissacarídeos, lipoproteínas e fosfolípidios, desempenhando diversas funções especializadas, incluindo resistência à fagocitose e ao complemento, além de servir como barreira contra várias substâncias. Embora permita a passagem de nutrientes, sua permeabilidade é regulada pelas porinas, proteínas que formam canais na membrana (64).

2.3.2 *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*)

A *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) é uma bactéria pertencente ao grupo de cocos gram-positivos reconhecida por pelos seus fatores de virulência e ser um dos principais patógenos bacterianos oportunistas dos seres humanos, responsável por causar pneumonia e outras infecções do trato respiratório, infecções em locais cirúrgicos, articulações protéticas e

cardiovasculares, bem como bacteremia nosocomial, podem variar de infecções cutâneas e de tecidos moles leves a infecções invasivas graves, incluindo furúnculos, abscessos, infecções de feridas, pneumonia, síndrome do choque tóxico, meningite, endocardite, e septicemia, entre outras (42,57,66–72).

A diversidade de fatores de virulência do *S. aureus*, juntamente com a variedade de combinações desses fatores, a localização da infecção e a variabilidade na resposta imune do hospedeiro, contribuem para a vasta gama de resultados observados nessas infecções (69,71,72). Esses fatores de virulência permitem que ele se adira a superfícies, invada ou evite o sistema imunológico e cause efeitos tóxicos prejudiciais ao hospedeiro, contando com fatores de aderência (por adesinas) e secreção (por exotoxinas) (71,72).

Quando o escocês Alexander Fleming descobriu a penicilina, as doenças infecciosas causadas pela *S. aureus* estavam controladas, mas com o uso generalizado da penicilina na década seguinte, cepas de *S. aureus* resistentes à penicilina apareceram. Posteriormente, foi desenvolvida uma nova penicilina semissintética resistente à penicilinase, chamada meticilina e controlou efetivamente a infecção por *S. aureus* resistente à penicilina, porém, poucos anos depois, foi relatado o isolamento de uma cepa *S. aureus* resistentes à meticilina (MRSA) (73).

O grande problema de infecções graves por *S. aureus* é devido à essa resistência desenvolvida a antibióticos, entre os quais os MRSA são os mais importantes clinicamente (68,69,73). A resistência à meticilina é causada pelo gene cromossômico *mecA* da bactéria, que codifica modificações no receptor do beta-lactâmico. Essas modificações estimulam a produção da proteína ligadora de penicilina (PPB2a ou PBP2') com baixa afinidade pelo antibiótico, contribuindo para a resistência (67–69,73).

Atualmente, de acordo com a literatura, outros antibióticos estão sendo empregados no tratamento de infecções bacterianas, incluindo a vancomicina (69,74,75). Contudo, o uso generalizado de antibióticos tem contribuído para um aumento na incidência de resistência bacteriana, especialmente a resistência a múltiplos medicamentos do MRSA, o que tem complicado significativamente a pesquisa clínica, como Zecconi et al. (2014) cita em seu estudo sobre modificações na bactéria interferem na suscetibilidade aos antibióticos glicopeptídicos, como a vancomicina, e podem contribuir para o desenvolvimento de cepas resistentes intermediárias à vancomicina (69,74). Portanto, estes estudos evidenciam a necessidade de procurar tratamentos alternativos que possam combater a bactéria referida.

2.3.3 *Escherichia coli* (*E. coli*)

A *Escherichia coli* (*E. coli*) é uma bactéria pertencente ao grupo de bacilos Gram-negativos (76). Embora ela faça parte da flora intestinal humana, sendo uma das primeiras espécies bacterianas a colonizá-lo logo após o nascimento, algumas espécies desenvolveram mecanismos patogênicos para causar doenças em humanos e animais, podendo desencadear infecções tanto intestinais quanto extra-intestinais, sendo a principal causa de infecções na corrente sanguínea em seres humanos (BSI) (57,66,76,77).

Desde sua identificação pela primeira vez em 1885, a *E. coli* emergiu como uma das espécies bacterianas mais extensivamente estudadas no mundo (77,78). Atualmente, ela é listada como um patógeno crítico na lista global da Organização Mundial da Saúde (OMS) para pesquisa, descoberta e desenvolvimento de novos antibióticos (76). As cepas de *E. coli* são notáveis pela facilidade de cultivo e manipulação em laboratório, devido à sua capacidade de replicação rápida, adaptação fácil a mudanças nutricionais e ambientais, e à sua receptividade à manipulação genética (64,77).

Ao entrar em contato com antibióticos para tratar infecções bacterianas, a *E. coli* comensal pode adquirir resistência a eles por meio de processos naturais de seleção, atuando como um dos principais depósitos para a disseminação de resistência a antibióticos para outras bactérias patogênicas, muitas vezes por meio da transferência de plasmídeos. As infecções em humanos ocorrem por meio do contato com animais de criação ou ambientes naturais contaminados, ingestão de alimentos mal cozidos ou contaminados, água potável contaminada por resíduos animais ou humanos, ou por meio da transmissão direta de pessoa para pessoa devido à má higiene (76,77).

Portanto, assim como a *S. aureus*, a *E. coli* também é uma bactéria que cada vez mais é difícil de combater, além de apresentar o risco de disseminação de resistência a antibióticos para outras bactérias patogênicas. O fungo comensal *Candida albicans* (*C. albicans*) é comum e coloniza a cavidade orofaríngea, o trato gastrointestinal e vaginal, além da pele de indivíduos saudáveis (64,76–78).

2.3.4 *Candida albicans* (*C. albicans*)

Ao contrário das bactérias, fungos são organismos eucariotos, ou seja, seu material genético (ácido desoxirribonucleico – DNA) é circundado por uma membrana, porém, podem ser unicelulares ou pluricelulares, sendo o último grupo composto por mais de uma célula (79).

O fungo comensal e oportunista *Candida albicans* (*C. albicans*) é comum e coloniza a cavidade orofaríngea, o trato gastrointestinal e vaginal, além da pele de indivíduos saudáveis,

compondo parte da flora normal da microbiota (80,81). Este fungo possui a capacidade de formar biofilmes em superfícies bióticas e abióticas, incluindo dispositivos médicos controlados, sendo considerado de importância crítica no âmbito das micoses globais pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (75,82,83). De todas as espécies do fungo, a *C. albicans* é o agente causador mais comum de infecções mucosas e infecções sistêmicas, sendo responsável por cerca de 70% das infecções fúngicas em todo o mundo e a principal causa de infecções invasivas potencialmente fatais nas últimas décadas (80,81,84).

A passagem de uma colonização inofensiva para uma condição patogênica ocorre quando os hospedeiros enfrentam deficiências imunológicas, danos aos tecidos epiteliais ou perturbações no equilíbrio microbiano. De forma paradoxal, o aumento no número de pacientes suscetíveis coincide com os avanços na medicina moderna, incluindo o uso generalizado de antibióticos, tratamentos de quimioterapia contra o câncer e procedimentos de transplante de órgãos sólidos (81).

C. albicans se destaca por sua grande habilidade de adaptação, envolvendo sua transição de uma forma comensal para uma forma patológica, dependendo das condições ambientais (80,81). Além disso, a espécie não se restringe apenas à alternância entre formas unicelulares de levedura e formas miceliais, mas também mantém uma relação contínua com o hospedeiro, transitando entre pelo menos seis distintos morfotipos semelhantes a leveduras (81).

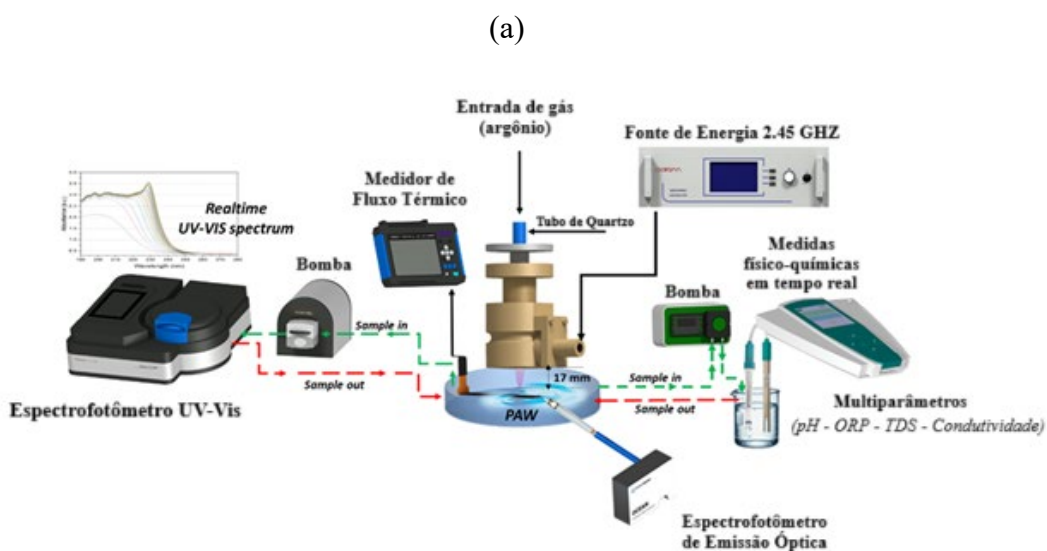
A eficácia no tratamento da candidíase é comprometida pela falta de opções terapêuticas antifúngicas, devido aos desafios relacionados à toxicidade para o hospedeiro, à atividade fungistática e ao desenvolvimento de resistência (85). Diante desses desafios, surge novamente a necessidade de buscar alternativas para combater o microrganismo.

Como uma alternativa, os PALs vem sendo investigados para a inativação de fungos. Evidências na literatura indicam que suas propriedades, especialmente o pH mais ácido, NO_3^- e H_2O_2 , têm a capacidade de induzir estresse oxidativo nos fungos, aumentar sua permeabilidade, danificar suas paredes celulares, alterar suas membranas celulares e na interferir de forma interna em seu metabolismo. Essa última interferência interrompe o funcionamento normal dos fungos e, por fim, levar à sua morte celular (80).

3 Materiais e Métodos

3.1 Sistema Surfatron

Conforme ilustrado na **Figura 6**, o sistema experimental inclui uma fonte de plasma baseada em uma descarga sustentada por onda de superfície (*Surface-Wave Sustained Discharge, SWD*) operando a uma frequência de 2,45 GHz. Para a alimentação de energia, foi utilizado um gerador de estado sólido (Sairem, GMS 200) com capacidade máxima de 200 W, ajustado para uma potência operacional de 70 W. Esse ajuste foi realizado para garantir que a potência refletida permanecesse abaixo do limite de 5%. A sintonização do sistema SWD foi cuidadosamente calibrada para atender a essa condição.



(b)

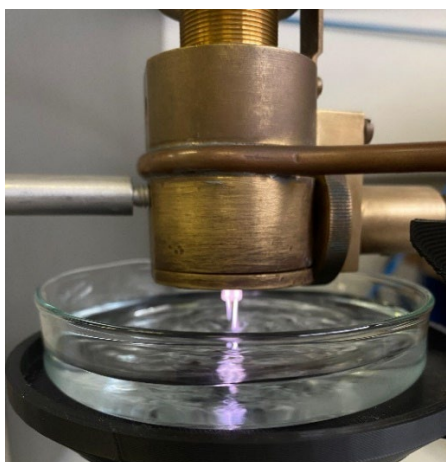


Figura 6: (a) Esquema representativo do sistema de Descarga Sustentada por Onda de Superfície (SWD), composto por tubo de quartzo para entrada de gás (argônio), fonte de alimentação de 2,45 GHz, medidor de fluxo térmico, sistema de geração de Água Ativada por Plasma (PAW) e dispositivos de análise, incluindo espectroscopia de emissão ótica (OES), espectrofotometria UV-Vis em tempo real e medidor multiparâmetro para avaliação de pH, ORP, TDS e condutividade elétrica. (b) Imagem ilustrando o sistema Surfatron e o jato de plasma gerado.

No interior da cavidade SWD, foi empregado um tubo de quartzo (diâmetro interno de 4 mm, diâmetro externo de 6 mm) que canaliza um fluxo constante de gás argônio (99,95% de pureza), regulado por um rotâmetro. A extremidade do tubo de quartzo por onde se expande o jato de plasma (bocal) foi posicionada 17 mm acima da superfície dos líquidos. Durante todo o processo de ativação, o sistema foi continuamente resfriado com ar comprimido para evitar degradação térmica e manter a integridade estrutural do tubo de quartzo.

3.2 Caracterização Óptica do Plasma SWD

Para caracterizar o plasma produzido pelo sistema SWD, a Espectroscopia de Emissão Óptica (OES) foi empregada em uma ampla faixa espectral de 200–1100 nm. Os espectros de emissão foram registrados usando um espectrômetro OceanHDX, permitindo a detecção e identificação de espécies atômicas, iônicas e moleculares dentro da descarga. Uma fibra óptica, equipada com uma lente de coleta, foi posicionada aproximadamente 5 cm na frente do jato de plasma para otimizar a aquisição do sinal e garantir uma captura espectral representativa. Para equilibrar a resolução temporal com a sensibilidade da análise, dois tempos de integração distintos (20 ms e 1000 ms) foram usados, facilitando a detecção de emissões intensas e menos proeminentes. Espectros de emissão do plasma Surfatron com fluxo de argônio de 2,5 L/min foram obtidos para o plasma de argônio puro (sem interação com líquidos) e para o plasma resultante da interação com a água deionizada (DI) e soluções salinas de concentração a 0,45% (SS 0,45%), 0,9% (SS 0,9%), 3% (SS 3%) e 7,5% (SS 7,5%). Ou seja, no processo de interação do plasma com a superfície do líquido, são formadas espécies na fase gasosa associadas à composição do líquido, tipicamente, por processos de remoção átomos do líquido por impacto de íons ou por evaporação (dependendo da potência aplicada ao jato de plasma).

3.3 Produção dos PALs

Para cada execução experimental, 40 mL dos líquidos foram depositados em uma placa de Petri de 95 mm de diâmetro e 15 mm de altura, utilizada ocasionalmente como substrato para ativação de plasma por um período máximo de 40 minutos. O jato de plasma foi então direcionado para a superfície do líquido, promovendo uma interação direta entre a descarga e a solução. Os experimentos foram conduzidos sob condições uniformes, com uma potência constante de 70 W e argônio como gás de trabalho, mantido a uma vazão de 2,5 L/min (slm). O tratamento com plasma foi aplicado por até 40 minutos, garantindo parâmetros consistentes em todas as amostras e permitindo comparações confiáveis. Os líquidos avaliados incluíram água deionizada e soluções salinas em diferentes concentrações: 0,45%, 0,9%, 3% e 7,5%.

Com o objetivo de compreender melhor o comportamento físico-químico da PAS e a influência do cloreto de sódio (NaCl), foram testadas diferentes concentrações salinas, além da solução padrão de 0,9%. Essas concentrações foram selecionadas devido ao seu uso em contextos clínicos específicos, sendo: 0,45%, 3% e 7,5% (86–89).

- **0,45% - Solução Salina Hipotônica:** Utilizada em contextos clínicos específicos, como no tratamento de desidratação hipertônica, onde há maior perda de água livre em relação aos eletrólitos, resultando em hipernatremia. A solução reduz a osmolaridade do plasma e do fluido celular, promovendo a hidratação intracelular e corrigindo o desequilíbrio osmótico. No entanto, seu uso requer monitoramento cuidadoso para evitar complicações como hiponatremia ou edema cerebral (87).
- **3% - Solução Salina Hipertônica:** Utilizada por suas propriedades osmóticas, é amplamente aplicada na expansão do volume do fluido extracelular ao induzir o deslocamento de água do espaço intracelular para o extracelular. Essa solução é útil em situações como controle de edema cerebral ou correção de hiponatremia grave (87).
- **7,5% - Solução Salina Hipertônica Concentrada:** Assim como a solução a 3%, promove a expansão do fluido extracelular, mas é particularmente eficaz como vasodilatador fisiológico, sendo empregada na recuperação hemodinâmica em casos de choque hemorrágico. Seu uso permite uma rápida estabilização do volume sanguíneo com um menor volume administrado, sendo especialmente útil em emergências médicas (87–89).

3.4 Caracterização dos PALs

3.4.1 Análise dos Parâmetros Físico-Químicos

Uma avaliação abrangente dos principais parâmetros físico-químicos foi realizada nos líquidos ativados por plasma, incluindo pH, condutividade elétrica (σ), sólidos dissolvidos totais (TDS) e potencial de oxido-redução (ORP). Esses parâmetros foram monitorados dinamicamente em tempo real usando um medidor de pH Metrohm 913, garantindo alta precisão e capturando mudanças transitórias durante a ativação do plasma. Os níveis de oxigênio dissolvido (OD) e cloro livre (Cl^-) foram determinados, respectivamente, com um medidor AK87 V2 (AKSO) e um medidor Micro 20 (AKSO), usados em intervalos regulares para avaliar variações ao longo do experimento. Além disso, a perda de massa de cada amostra foi monitorada em tempo real com uma balança semi-analítica de precisão Marte, AD3300 (Figura 7).



Figura 7: Análise da perda de massa com o passar do tempo de ativação do líquido pelo plasma.

3.4.2 Análise Térmica da Interação Plasma-Líquido

Um sensor de fluxo de calor modelo Hukseflux FHF03-02, acoplado a um registrador de dados Hioki LR8432-20, operando com resolução de aquisição de 10 ms, foi empregado para monitorar o fluxo térmico e a temperatura local ao longo de 40 minutos, iniciando-se no momento da ignição do plasma. As medições foram realizadas em três condições distintas: com água deionizada (40 mL), com solução salina a 0,9% (40 mL) e na ausência de líquidos (jato de plasma e argônio puro)..

O sensor FHF03-02 é baseado em uma matriz de termopares que convertem a diferença de temperatura entre as suas superfícies em um sinal de tensão. Essa tensão é proporcional ao fluxo de calor que atravessa o sensor, segundo a relação:

$$\phi = \frac{U}{S} \quad \text{Eq. (3)}$$

onde ϕ é o fluxo de calor (W/m^2), U é a tensão de saída (V) e S é a sensibilidade do sensor ($\text{V} \cdot \text{m}^2/\text{W}$), calibrada individualmente e fornecida pelo fabricante ($2 \times 10^{-6} \text{ V}/(\text{W}/\text{m}^2)$), conforme **Figura 8**.

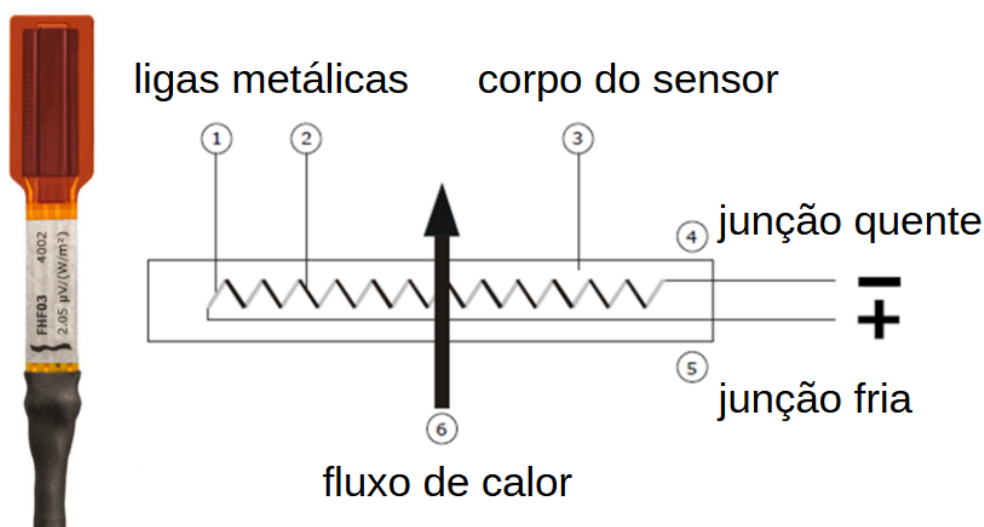


Figura 8: Princípio geral de funcionamento de um sensor de fluxo de calor. Adaptado do manual do sensor.

O sensor presente no modelo FHF03 é uma termopilha. Uma termopilha consiste em vários termopares, cada um formado por duas ligas metálicas, indicadas como 1 e 2, conectadas eletricamente em série. Um único termopar gera uma tensão de saída proporcional à diferença de temperatura entre suas junções quente e fria. Ao se conectar vários termopares em série, o sinal gerado é amplificado. Em um sensor de fluxo de calor, as junções quente e fria estão localizadas nas faces opostas do sensor (indicadas como 4 e 5). Em estado estacionário, o fluxo de calor (6) é uma função linear da diferença de temperatura através do sensor e da condutividade térmica média do corpo do sensor (3). A termopilha gera um sinal de tensão proporcional ao fluxo de calor que atravessa o sensor (90).

A convenção adotada pelo sensor define que:

- Fluxo de calor positivo corresponde a calor fluindo para dentro do sensor (do ambiente para o sensor),
- Fluxo de calor negativo representa calor fluindo para fora do sensor (do sensor para o ambiente).

Porém, no contexto da medição com o plasma, a região superior do sensor (a face voltada para o jato de plasma) sofre aquecimento, enquanto a parte inferior (em contato com a base da placa) permanece relativamente fria. Isso cria um gradiente de temperatura descendente, induzindo fluxo de calor da região aquecida para o interior do sensor. De acordo com a calibração do FHF03-02, essa situação resulta em um sinal negativo de fluxo térmico, o que é fisicamente coerente com o processo de transferência de calor do plasma para a superfície do sensor.

Conforme ilustrado na **Figura 9**, a sonda do sensor foi posicionada no fundo de uma placa de Petri de vidro, sob duas condições principais: (1) Com 40 mL do líquido (água deionizada ou solução salina), onde o jato de plasma era aplicado a 17 mm da superfície do líquido; (2) Sem líquido, com o jato de plasma posicionado a 27 mm do fundo da placa (superfície do sensor exposta). Essa configuração permitiu a avaliação comparativa da transferência de calor em diferentes condições térmicas e dielétricas, evidenciando o papel da presença do líquido como moderador térmico e meio de dissipação de energia.

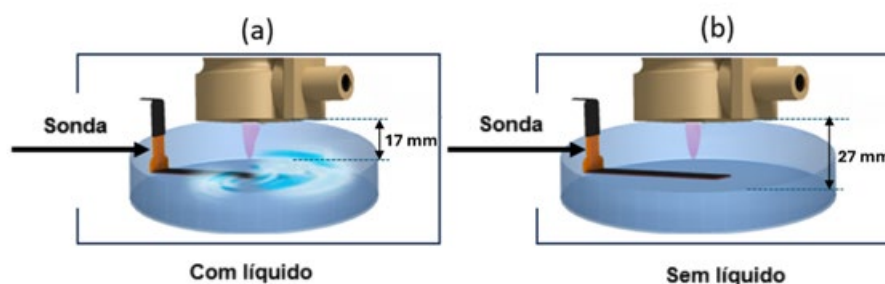


Figura 9: Representações esquemáticas da configuração experimental, destacando o posicionamento da sonda térmica no fundo da placa de Petri: (a) com 40 mL do líquido (bocal a 17 mm da superfície do líquido) e (b) sem líquido (bocal a 27 mm do fundo da placa).

3.4.3 Análise das RONS

Para investigar mais profundamente as mudanças químicas induzidas pelo plasma, as amostras foram analisadas em tempo real usando espectrofotometria ultravioleta-visível (UV-Vis) com um espectrofotômetro Thermo Scientific Evolution 220. O espectro de absorbância

foi registrado na faixa de 190–270 nm, permitindo a identificação qualitativa das concentrações de RONS por meio da análise de picos característicos.

Espécies específicas de RONS, como nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), foram analisadas usando tiras reagentes semiquantitativas: Quantofix Peroxide 25 (0,5–25 mg/L para H_2O_2) e Quantofix Nitrate/Nitrite (10–500 mg/L para NO_3^- e 1–80 mg/L para NO_2^-). Durante os experimentos, as medições foram realizadas em intervalos regulares de 0,5 min, 1 min, 1,5 min, 2 min, 2,5 min, 3 min, 3,5 min, 4 min, 4,5 min, 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 25 min, 30 min, 35 min e 40 min, fornecendo uma evolução temporal detalhada das espécies químicas.

3.5 Ensaios Microbiológicos

Consistente com as metodologias empregadas por Chiappim et al. (57), este estudo utilizou cepas microbianas de referência, incluindo a bactéria Gram-positiva *S. aureus* (ATCC 6538), a bactéria Gram-negativa *E. coli* (ATCC 10799) e o fungo *C. albicans* (SC 5314). O procedimento detalhado dos ensaios e da análise microbiológica está representado no fluxograma da **Figura 10**.

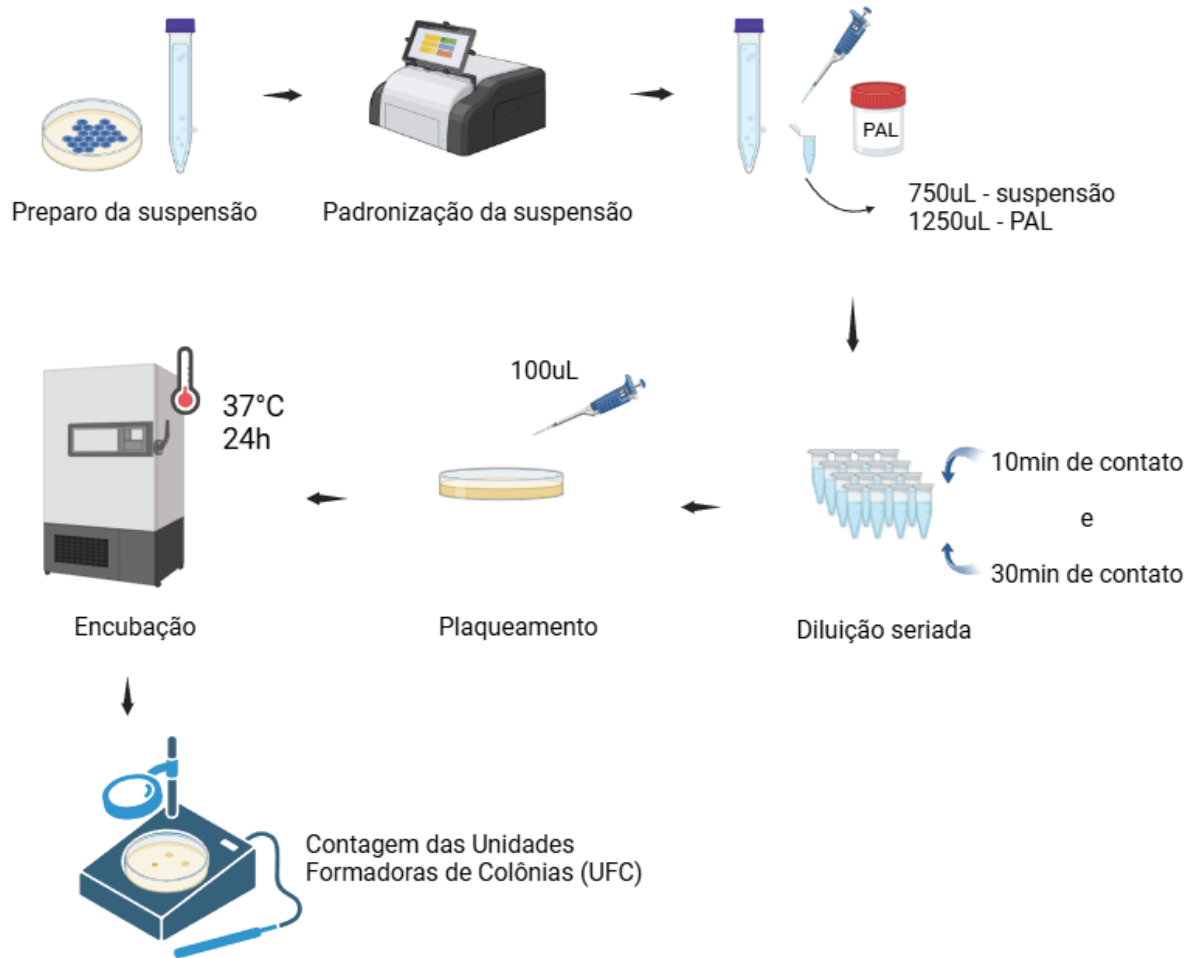


Figura 10: Passos seguidos para a execução dos ensaios microbiológicos e suas análises.

As culturas bacterianas foram propagadas em Brain Heart Infusion Broth (BHI), enquanto a cepa fúngica foi cultivada em Ágar Sabouraud Dextrose. As culturas foram incubadas em condições aeróbicas a 37°C durante 24 horas.

Suspensões microbianas padronizadas, com concentração de 10^6 células/mL, foram preparadas em solução salina estéril (NaCl a 0,9%). As medições espectrofotométricas foram realizadas utilizando um espectrofotômetro (AJX-1600, Micronal, São Paulo, SP, Brasil) para garantir a uniformidade. Os parâmetros medidos foram: $\lambda = 490$ nm com OD de 0,374 para *S. aureus*, $\lambda = 600$ nm com OD de 0,050 para *E. coli*, e $\lambda = 530$ nm com OD de 0,138 para *C. albicans*.

A atividade antimicrobiana foi avaliada nos seguintes grupos de teste: água deionizada (controle); água ativada por plasma (PAW) ativada por 10 minutos; PAW ativada por 40 minutos; solução salina (controle); solução salina ativada por plasma (PAS) ativada por 10

minutos; e PAS ativada por 40 minutos. Todas as amostras foram esterilizadas em autoclave antes das ativações por plasma.

Para os testes, 750 μL da suspensão microbiana foram misturados com 1250 μL de PAW ou PAS em microtubos, homogenizados e incubados por períodos de 10 e 30 minutos. Em seguida, diluições seriadas foram preparadas em solução salina 0,9% estéril. Uma alíquota de 100 μL de cada diluição foi espalhada em Brain Heart Infusion (BHI) para *S. aureus* e *E. coli* e em Ágar Sabouraud Dextrose para *C. albicans*, utilizando a técnica de plaqueamento de Miles et al (12). Após incubação a 37°C por 24 horas em condições aeróbicas, as contagens de colônias foram realizadas e as unidades formadoras de colônia por mililitro (UFC/mL) foram calculadas. Cada ensaio foi realizado em triplicata.

As análises estatísticas e representações gráficas foram realizadas utilizando o software GraphPad Prism versão 7.0 (GraphPad Software, San Diego, CA, EUA). Os dados foram submetidos a um teste de normalidade antes das análises posteriores. Os efeitos antimicrobianos entre todos os grupos foram comparados por meio de uma análise de variância (ANOVA) unidirecional, com comparações múltiplas realizadas pelo teste post hoc de Tukey.

4 Resultados e Discussão

4.1 Caracterização Espectroscópica da Interação do Jato de Plasma SWD com Líquidos-Alvo

As **Figuras 11 e 12** ilustram os espectros de emissão óptica do plasma gerado pelo sistema Surfatron, operando com fluxo de argônio a 2,5 L/min, para o argônio puro (sem interação com líquidos) e do plasma em interação com a água deionizada (DI) e com soluções salinas (SS) em concentrações de 0,45%, 0,9%, 3% e 7,5%. Os espectros foram registrados com tempos de integração de 20 ms (**Figura 11**) e 1000 ms (**Figura 12**), permitindo uma análise das espécies presentes no plasma e de suas emissões em função do tipo de líquido exposto ao jato de plasma de argônio.

As linhas de emissão na faixa de comprimentos de onda entre 330 e 406 nm, visíveis com maior clareza na **Figura 12**, estão associadas às transições do sistema positivo do N₂. Estas transições indicam a presença de espécies moleculares de nitrogênio excitadas, contribuindo para a formação de espécies reativas de nitrogênio (RNS) nos líquidos ativados. Além disso, na região próxima a 309 nm, é observada a emissão característica de radicais hidroxila (OH), responsáveis pela produção de peróxido de hidrogênio, uma espécie chave para diversas aplicações químicas e biológicas (28,41).

Na região de ~777 nm, destaca-se a presença de emissão atribuída ao oxigênio atômico (O), enquanto picos localizados entre ~700-950nm são característicos de Ar, possivelmente relacionados a transições eletrônicas do argônio ou interações com espécies dissolvidas no líquido (28,41,91).

O tempo de integração para a aquisição dos sinais de emissão óptica foi ajustado para 20 ms, como apresentado na **Figura 11**, e 1000 ms, como ilustrado na **Figura 12**, com o objetivo de maximizar a visualização dos espectros, tanto para o plasma de argônio quanto para cada um dos líquidos analisados.

O tempo de integração de 20 ms, usado nos espectros da **Figura 11**, permite uma melhor avaliação das emissões mais intensas, como as linhas características do argônio na região de 700 a 950 nm. Já o tempo de 1000 ms, apresentado na **Figura 12**, permite observar as emissões de comprimento de onda de menor intensidade, possibilitando uma análise mais detalhada de espécies presentes em concentrações reduzidas.

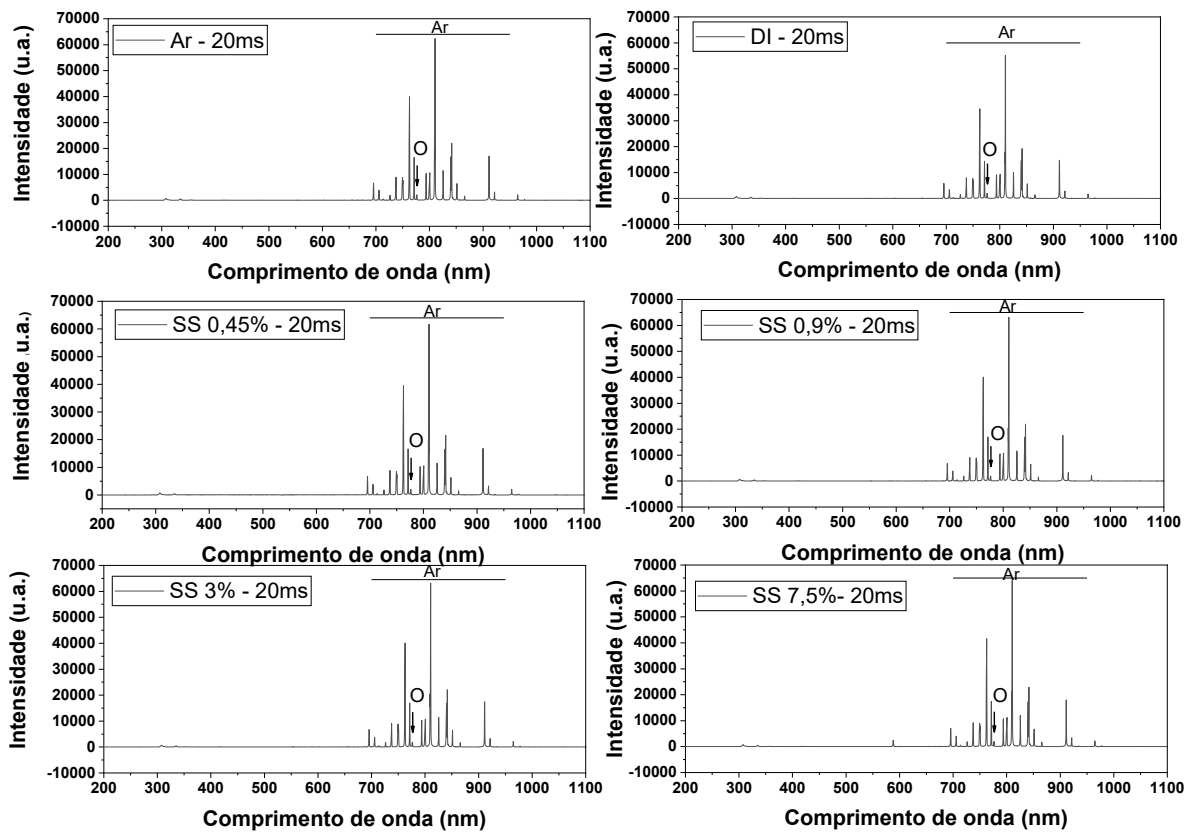


Figura 11: Espectro de emissão do plasma Surfatron com fluxo de ar de 2,5 L/min a 20ms para o plasma de argônio puro (sem interação com líquidos) e para o plasma resultante da interação com a água deionizada (DI), solução salina de concentração a 0,45% (SS 0,45%), 0,9% (SS 0,9%), 3% (SS 3%) e 7,5% (SS 7,5%).

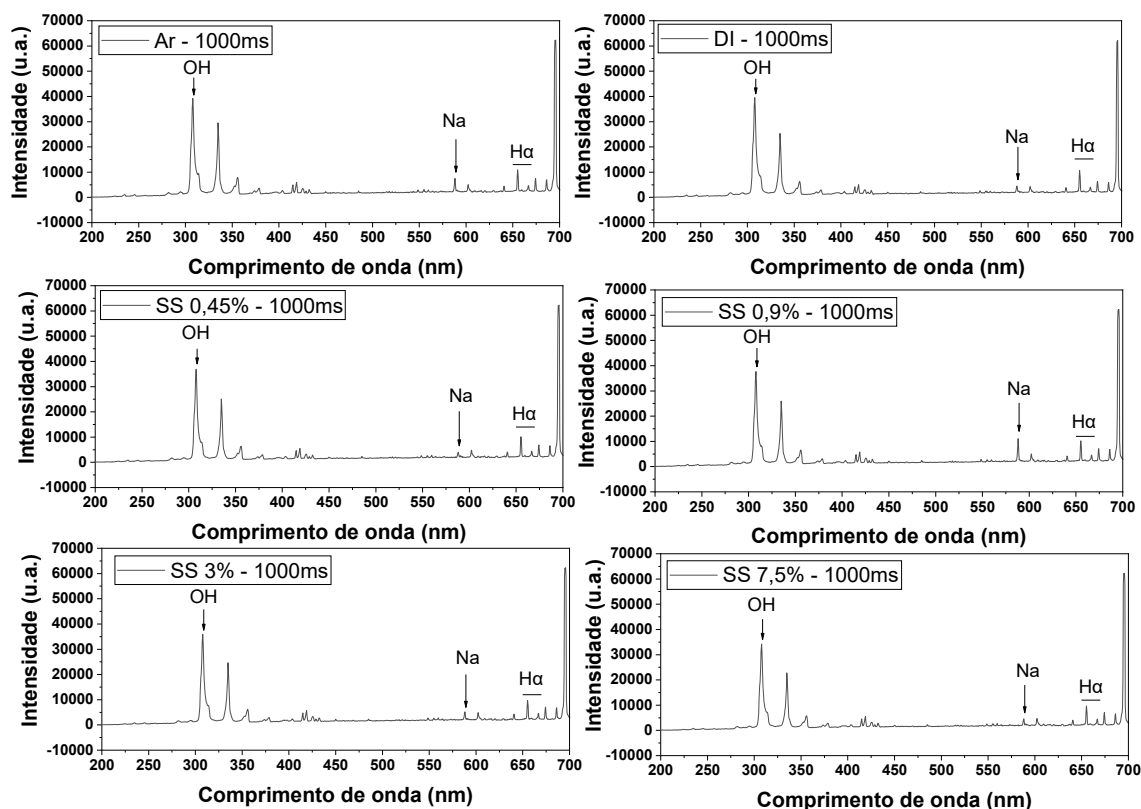


Figura 12: Espectro de emissão do plasma Surfatron com fluxo de ar de 2,5 L/min a 1000mS para o plasma de argônio puro (sem interação com líquidos) e para o plasma resultante da interação com a água deionizada (DI), soluções salinas de concentração a 0,45% (SS 0,45% Zoom), 0,9% (SS 0,9% Zoom), 3% (SS 3% Zoom) e 7,5% (SS 7,5% Zoom).

Os gráficos apresentados nas **Figuras 11 e 12** correspondem a espectros de emissão óptica de um plasma de argônio gerado pelo reator Surfatron, em diferentes condições de interação com líquidos. O comportamento geral dos espectros pode ser descrito da seguinte forma (28,41,91):

1. **Argônio Puro (Ar):** No espectro do argônio puro, observam-se emissões predominantes do gás suporte, principalmente na faixa de 700 a 900 nm. Essas linhas representam transições eletrônicas típicas do argônio, refletindo a estabilidade do jato de plasma.
2. **Água Deionizada (DI):** No espectro da água deionizada, a emissão do radical OH (~309 nm) é evidente, indicando a dissociação de moléculas de água pelo plasma e a geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), como o peróxido de hidrogênio. Isso demonstra o papel fundamental da água como fonte de ROS durante a interação com o jato de plasma.

3. **Soluções Salinas (SS):** A comparação entre as diferentes concentrações de solução salina revela que, à medida que a concentração de sal aumenta, ocorrem alterações na intensidade relativa e no número de picos detectados. Esses efeitos podem ser atribuídos à maior disponibilidade de íons dissolvidos na solução, que interagem com o plasma, favorecendo a formação de espécies reativas de nitrogênio (RNS) e outras espécies químicas.

4.2 Avaliação Térmica da Interação Plasma-Líquido

A dinâmica térmica durante a interação do jato de plasma com diferentes líquidos foi avaliada por meio de um sensor de fluxo de calor Hukseflux FHF03-02, conectado a um registrador de dados Hioki LR8432-20, operando com resolução de aquisição de 10 ms. As **Figuras 13** e **14** apresentam os resultados obtidos para dois cenários: ativação do plasma na ausência de líquidos e na presença de 40 mL de água deionizada (**Figura 13**) ou de solução salina 0,9% (**Figura 14**). Apenas a amostra salina de concentração 0,9% foi utilizada devido a sensibilidade do sensor e a danificação do mesmo com as outras soluções salinas.

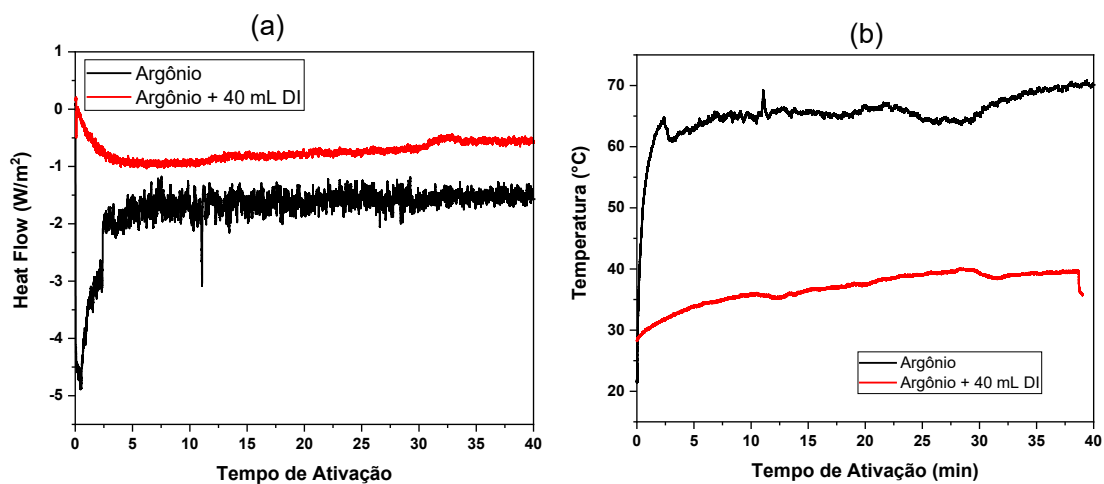


Figura 13: Variação de (a) fluxo térmico e (b) temperatura ao longo do tempo durante a ativação do plasma com 40 mL de água deionizada (curvas vermelhas) em comparação com a ativação sem líquido (curvas pretas).

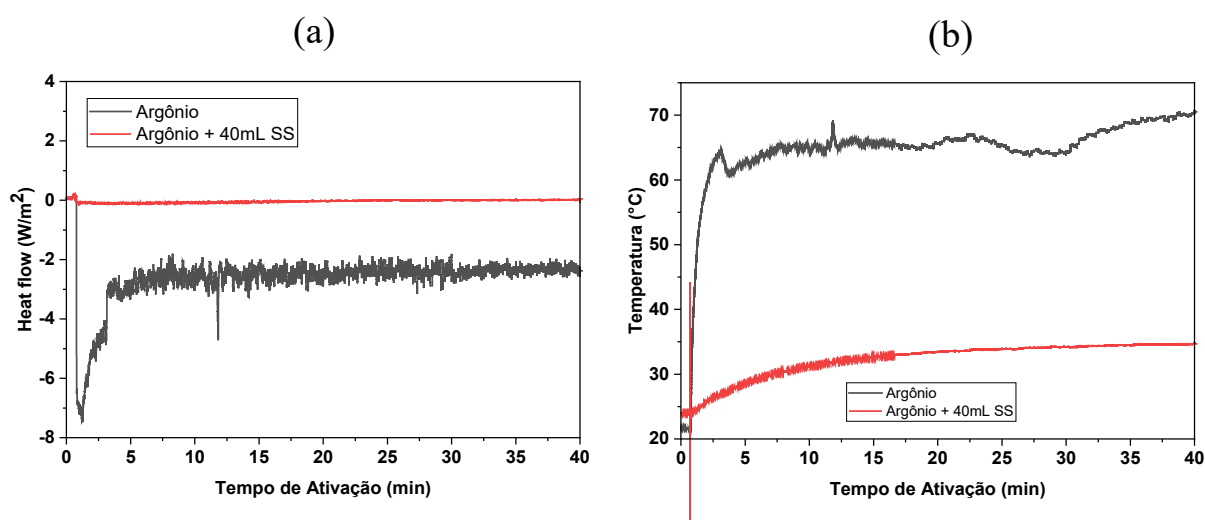


Figura 14: Variação do a) fluxo térmico e b) temperatura em função do tempo durante a ativação do plasma com solução salina 0,9% (40 mL SS 0,9%) em comparação à ativação sem líquido.

Nas **Figuras 13a** e **14a** observa-se a evolução do fluxo térmico ao longo do tempo de ativação do plasma. Os sinais negativos indicam que o calor está fluindo da região superior (aquecida pelo plasma) para o interior do sensor, instalado no fundo da placa de Petri. Essa direção do fluxo é esperada e está de acordo com o princípio de funcionamento do sensor FHF03-02, cuja saída de tensão é proporcional à diferença de temperatura entre suas faces: quando a face superior (voltada ao plasma) está mais quente que a inferior, o fluxo é reportado como negativo, conforme a convenção do fabricante.

No início da ativação, observa-se um aumento abrupto do fluxo térmico negativo, indicando uma transferência intensa de calor proveniente do jato de plasma. Com o passar do tempo, o sistema tende ao equilíbrio térmico e o fluxo se estabiliza. A condição sem líquido (curvas pretas) apresenta os maiores valores negativos, resultado do aquecimento direto da superfície da placa, sem barreira térmica.

Em contraste, as curvas vermelhas, correspondentes à presença de líquidos, revelam um amortecimento significativo na intensidade do fluxo térmico. No caso da água deionizada (**Figura 13a**), observa-se uma modulação gradual do calor, enquanto a solução salina (**Figura 14a**) mostra ainda menor variação, o que pode ser atribuído às melhores propriedades térmicas da solução salina (como maior condutividade e capacidade calorífica), que favorecem uma dissipação de calor mais eficiente.

As **Figuras 13b e 14b** complementam essa análise ao mostrar a evolução da temperatura ao longo do tempo. Na ausência de líquidos, a temperatura medida pelo sensor atinge rapidamente valores superiores a 65 °C. Em contrapartida, na presença de líquidos, a temperatura se mantém significativamente mais baixa: cerca de 30 °C para água deionizada e 27 °C para solução salina ao final do intervalo experimental. Esses dados confirmam o papel dos líquidos como moderadores térmicos, limitando o aumento da temperatura na interface plasma-líquido.

A diferença de temperatura entre os dois cenários oferece uma perspectiva quantitativa sobre o acoplamento energético do plasma com o meio líquido. Para a água deionizada, a redução térmica em torno de 30 °C indica que parte da energia do plasma é absorvida pelo líquido e utilizada em processos como dissociação molecular e formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), como radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Já a solução salina promove uma redução térmica ainda maior (~ 35 °C), compatível com sua maior capacidade de condução térmica e presença de íons dissolvidos. Esses íons também influenciam diretamente na química do plasma, favorecendo a geração de espécies reativas de nitrogênio (RNS), como nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-), além de possíveis radicais derivados de cloro, como o hipoclorito (ClO^-).

Assim, a presença de líquidos não apenas regula o balanço térmico do sistema, como também direciona a formação seletiva de espécies químicas reativas, modulando os efeitos físico-químicos conforme a composição da solução utilizada.

4.3 Análise dos Parâmetros Físico-Químicos

4.3.1 Água Deionizada

O pH é uma medida que expressa a concentração de íons de hidrogênio (H^+) em uma solução, indicando seu nível de acidez ou basicidade. Para a água, o pH geralmente varia entre 6,5 e 8,5, dependendo de fatores como a presença de impurezas e a concentração de dióxido de carbono dissolvido (92). Entretanto, quando a água é exposta ao plasma, interações complexas entre espécies químicas reativas, como radicais livres, íons e espécies RONS, levam à acidificação da solução devido à formação de compostos ácidos. Como resultado, o pH das soluções ativadas por plasma (PALs) tende a diminuir significativamente, especialmente com o aumento do tempo de exposição (52).

Durante a ativação por plasma da água DI pelo plasma de argônio SWD, observa-se uma queda acentuada do pH nos momentos iniciais (até aproximadamente 4 minutos), indicando

acidificação significativa do meio, como mostrado na **Figura 15a**. Esse comportamento inicial é atribuído à rápida introdução de RONS no meio aquoso, incluindo ácido nítrico (HNO_3), radicais hidroxila (OH) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que desencadeiam uma série de reações químicas e contribuem para a formação de compostos ácidos.

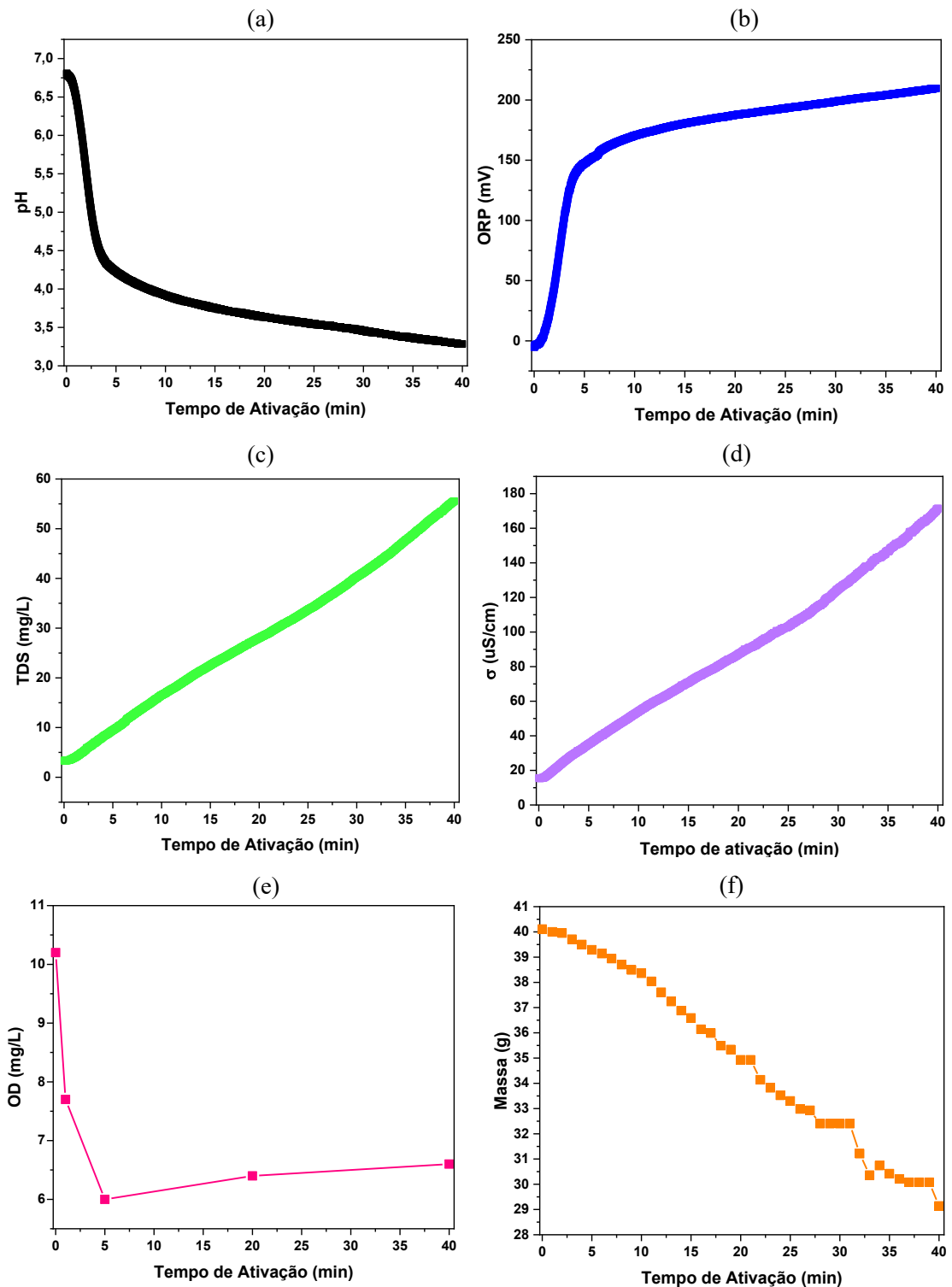


Figura 15: Variação dos parâmetros físico-químicos em função do tempo de ativação da água deionizada: a) pH; b) Potencial de oxidação-redução (ORP); c) Total de sólidos dissolvidos (TDS); d) Condutividade elétrica (σ); e) Oxigênio dissolvido (OD); f) Massa da amostra de água deionizada ativada por plasma, medida em tempo real.

Após o período de ativação inicial, uma diminuição mais gradual no pH é observada entre 4 e 17 minutos, refletindo a continuação das reações químicas a uma taxa mais controlada. Isso sugere que o sistema começa a se aproximar de um estado de equilíbrio dinâmico. Entre 17 e 40 minutos, o pH diminui linearmente, atingindo um valor de cerca de 3,29 no final do período. Esse padrão indica que o sistema ainda está em transição, mas com mudanças mais estabilizadas, sugerindo um equilíbrio entre a geração, dissolução e saturação de espécies reativas.

A análise da curva mostra que o impacto do plasma é mais pronunciado nos estágios iniciais da ativação, com a introdução rápida e massiva de RONS levando à acidificação significativa do meio. À medida que o sistema progride, a estabilização gradual do pH reflete o papel da saturação química na regulação das condições do sistema. Esses processos reforçam a relevância do pH como um parâmetro-chave para monitorar a reatividade química de soluções ativadas por plasma e suas potenciais aplicações em vários contextos (93).

A capacidade de uma solução oxidar ou reduzir outra substância é avaliada pelo potencial de oxidação-redução (ORP), que é diretamente influenciado pela concentração e força dos oxidantes presentes. Na **Figura 15b**, observa-se um aumento significativo do ORP nos primeiros 4 min, alcançando valores próximos de 137 mV, seguido por um aumento mais gradual até atingir aproximadamente 209 mV ao final do período de ativação. Esse comportamento reflete a rápida geração inicial de RONS, como peróxidos, nitratos e radicais livres, que contribuem para um ambiente altamente oxidativo.

O ORP é um parâmetro especialmente relevante para aplicações de desinfecção, pois está diretamente relacionado à capacidade antimicrobiana da solução ativada. Altos valores de ORP estão associados à destruição de componentes vitais dos microrganismos, como lipídios, proteínas e ácidos nucleicos, levando à perda de viabilidade celular (52,94). Esse processo ocorre devido ao dano estrutural promovido nas membranas celulares e à interferência nos mecanismos de defesa dos microrganismos. O comportamento do ORP é inversamente proporcional ao pH, como evidenciado na comparação entre as curvas de pH e ORP. À medida que o pH diminui, a concentração de íons hidrogênio aumenta, favorecendo condições mais

oxidantes. Por outro lado, quando o pH aumenta, a disponibilidade de espécies oxidantes diminui, reduzindo o potencial oxidativo da solução. Assim, valores mais baixos de pH e altos valores de ORP criam condições ideais para a ação antimicrobiana, destacando o papel crucial desse parâmetro na avaliação da reatividade química e da eficácia das soluções ativadas por plasma.

O total de sólidos dissolvidos (TDS) refere-se à concentração de substâncias dissolvidas em uma solução, incluindo íons, sais, minerais e compostos orgânicos. No contexto da ativação por plasma, o TDS é uma medida importante para monitorar as alterações químicas no sistema, pois reflete a presença de novas espécies reativas geradas durante o processo. Na **Figura 15c**, observa-se um aumento constante e linear do TDS ao longo do tempo de ativação, partindo de valores próximos a zero e atingindo 55,66 mg/L após 40 minutos. Esse aumento é atribuído à dissolução de compostos formados pela interação plasma-líquido, como nitratos, nitritos e peróxidos. Esses compostos, ao se dissolverem na solução, aumentam a concentração de partículas carregadas, influenciando também a condutividade elétrica. O comportamento linear do TDS indica que a geração de espécies reativas e sua dissolução no meio aquoso ocorrem de maneira contínua e estável durante todo o período de ativação.

A condutividade elétrica (σ) mede a capacidade de uma solução de conduzir corrente elétrica, sendo diretamente influenciada pela concentração de íons dissolvidos, como cátions e ânions. No caso da água, a σ reflete a presença de sais, minerais e outras espécies carregadas que determinam sua condutividade. Durante o tratamento com plasma, observa-se a rápida dissolução de espécies reativas, como nitratos, nitritos e peróxidos, que aumentam a densidade de cargas livres na solução, promovendo a elevação contínua da condutividade elétrica. Na **Figura 15d**, observa-se um aumento linear da condutividade elétrica ao longo do tempo de ativação, partindo de 15,53 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no início e alcançando 171,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ após 40 minutos. Esse comportamento linear indica que a geração de espécies químicas reativas e sua dissolução no meio aquoso ocorrem de forma estável e contínua durante o processo de ativação.

Esse aumento na σ destaca a influência do tratamento com plasma na modificação da estrutura eletroquímica da solução. A geração contínua de íons e espécies reativas altera dinamicamente a composição iônica do meio, o que não apenas reflete a eficiência do processo, mas também reforça a importância da condutividade elétrica como um parâmetro essencial para monitorar o impacto químico e eletroquímico do plasma na solução ativada (52,93).

O oxigênio dissolvido (OD) reflete a interação entre o plasma e o meio aquoso, evidenciando a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), como radicais livres, ozônio (O_3) e peróxidos. Essas espécies desempenham um papel essencial na atividade antimicrobiana

das soluções ativadas, promovendo a oxidação de biomoléculas e a desestabilização de membranas celulares, contribuindo para a inativação de microrganismos (95). Na **Figura 15e**, observa-se uma queda abrupta do OD nos primeiros 5 minutos, de aproximadamente 10,2 mg/L para 6 mg/L, devido ao consumo rápido de oxigênio dissolvido pela geração de ROS. Após esse período, o OD estabiliza-se em torno de 6 mg/L, sugerindo um equilíbrio dinâmico entre consumo e geração de novas espécies químicas.

A **Figura 15f** apresenta a variação da massa da amostra de água DI durante a ativação do plasma, medida em tempo real usando uma balança analítica. Uma redução contínua da massa é observada ao longo do tempo, começando em aproximadamente 40 g no início da ativação e atingindo cerca de 29 g no final de 40 minutos. Essa redução é atribuída principalmente à evaporação do líquido causada pelo aquecimento gerado pela interação plasma-água. A transferência de energia térmica promove a vaporização gradual, destacando o efeito do plasma na dinâmica térmica do líquido (96).

A curva exibe pequenos saltos e flutuações ao longo do tempo, que podem estar associados à instabilidade do fluxo de plasma ou à formação de bolhas durante o processo. Esses dados reforçam a importância do monitoramento da massa como um indicador das condições térmicas e da eficiência do processo. Além disso, a redução da massa reflete a perda de água devido à evaporação, o que pode impactar a concentração de espécies químicas dissolvidas, influenciando parâmetros como TDS, condutividade elétrica e ORP. Essa relação direta entre evaporação e dinâmica química ressalta a necessidade de controlar a temperatura e o tempo de ativação para garantir a eficiência e a estabilidade da ativação do plasma.

4.3.2 Soluções Salinas

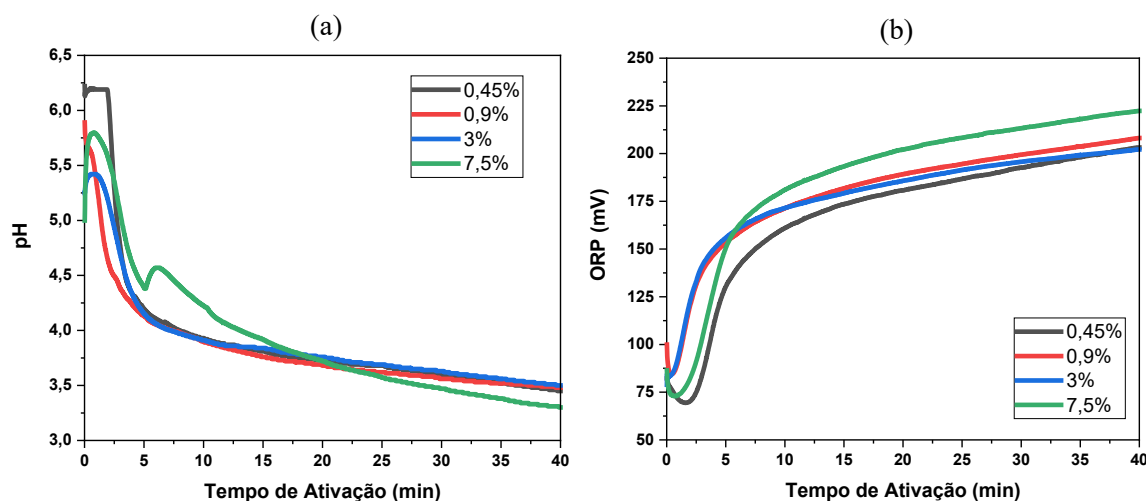
As propriedades físico-químicas das soluções salinas ativadas por plasma (PAS) são significativamente influenciadas pelo tratamento com plasma, conforme evidenciado pelas variações observadas em parâmetros como pH, potencial de oxidação-redução (ORP), sólidos dissolvidos totais (TDS), condutividade elétrica (σ), salinidade, oxigênio dissolvido (OD), concentração de cloro livre (Cl) e perda de massa durante a ativação (**Figura 16**).

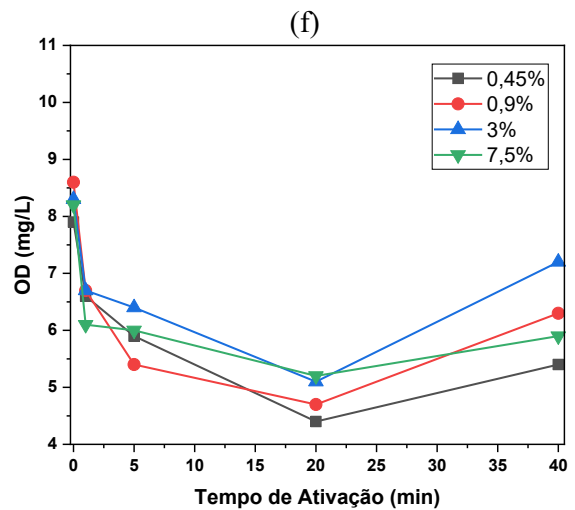
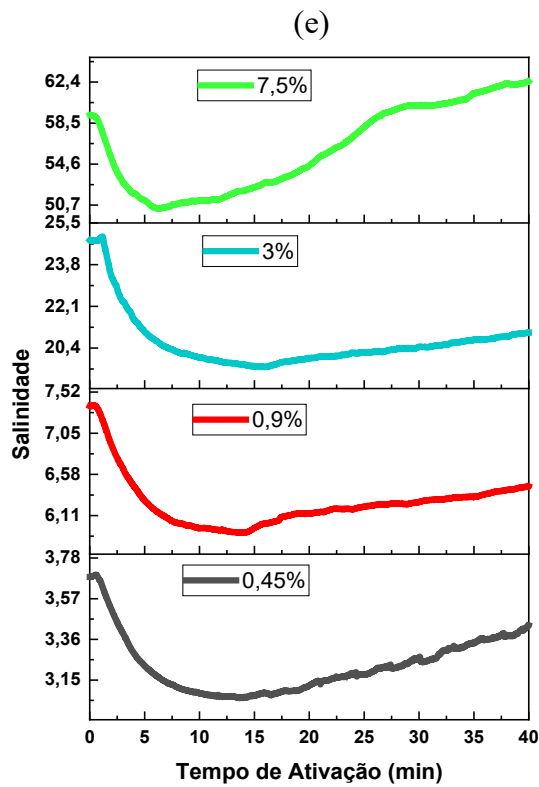
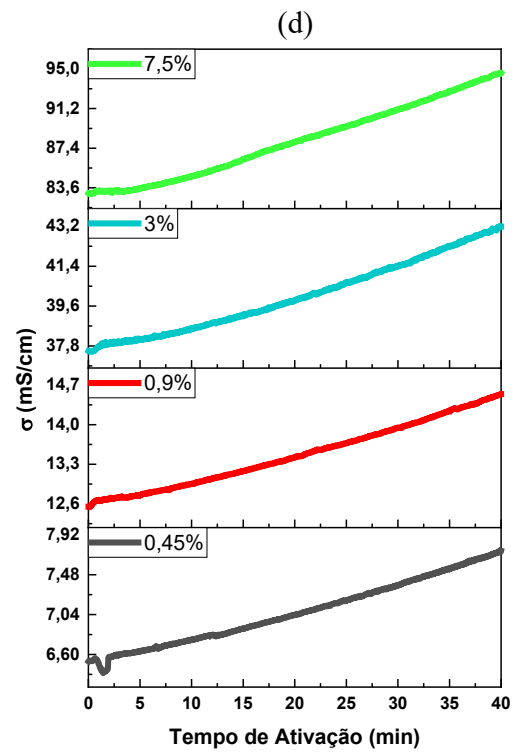
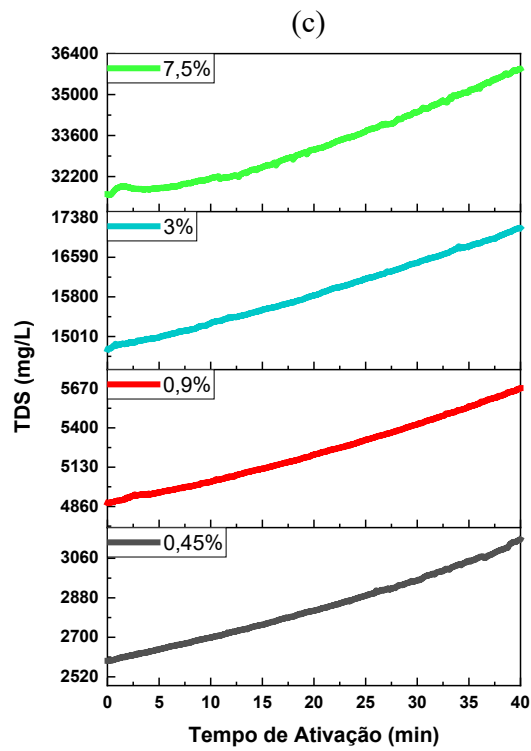
A **Figura 16a** apresenta a variação do pH ao longo do tempo de ativação das diferentes soluções salinas (0,45%, 0,9%, 3% e 7,5%). Assim como observado para a água deionizada, as soluções salinas demonstram uma redução do pH durante o contato prolongado com o plasma. No entanto, há diferenças marcantes no comportamento devido à composição iônica das soluções salinas.

Inicialmente, as soluções salinas apresentam um pH levemente mais ácido do que a água deionizada, refletindo a influência dos sais dissolvidos. À medida que o tempo de ativação aumenta, o pH diminui, mas o efeito tampão conferido pelos íons Na^+ e Cl^- nas soluções salinas restringe a amplitude dessa redução. Essa resistência à acidificação é evidente nas concentrações mais elevadas de sal, que apresentam uma redução de pH mais atenuada em comparação às soluções menos concentradas, apresentando os respectivos percentuais de redução: 44,53% (0,45%); e 40,91% (0,9%); 33,33% (3%); 34% (7,5%).

O comportamento observado pode ser explicado pela capacidade dos íons presentes nas soluções salinas de neutralizar parcialmente os efeitos ácidos das RONS geradas pelo plasma. Os íons Na^+ e Cl^- equilibram o impacto das RONS, minimizando a queda no pH. Em contraste, a água deionizada, que não contém íons, sofre uma acidificação mais pronunciada, destacando a ausência de um sistema tampão que possa neutralizar o efeito ácido das RONS.

Além disso, o pH final das soluções salinas é mais alcalino em comparação ao da água deionizada, reforçando o papel da composição iônica no controle do pH durante o processo de ativação por plasma. Esse comportamento destaca a importância da salinidade como um fator chave para a estabilidade química das soluções ativadas e sua adequação a diferentes aplicações.





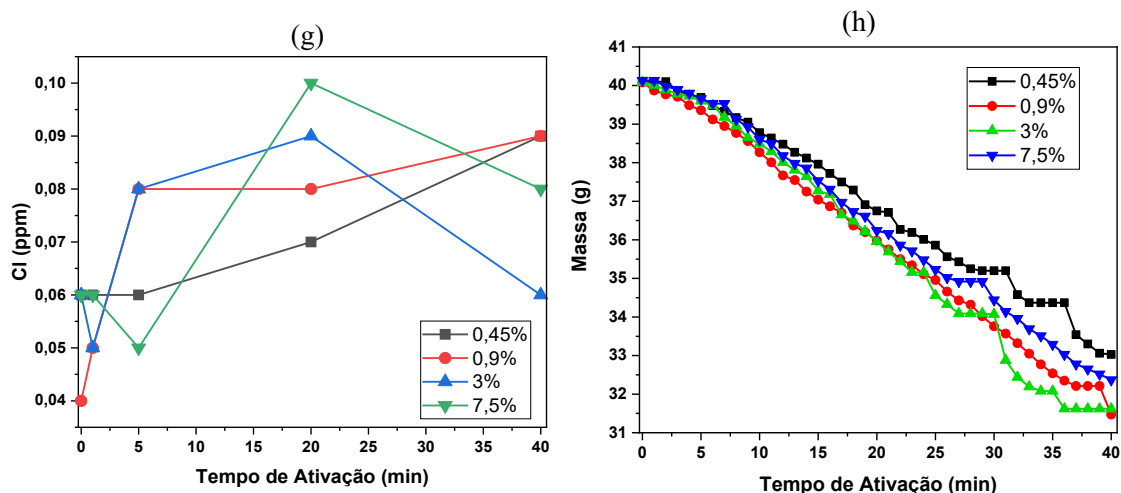


Figura 16: Comparação da variação dos parâmetros físico-químicos em função do tempo de ativação por plasma: a) pH; b) Potencial de Oxido-Redução (ORP); c) Total de Sólidos Dissolvidos (TDS); d) Condutividade Elétrica; e) Salinidade das soluções salinas; f) Oxigênio Dissolvido (OD); g) Concentração de Cloro Livre (Cl); h) Massa das amostras das soluções salinas (0,45%, 0,9%, 3% e 7,5%) medidas em tempo real.

A **Figura 16b** mostra a evolução do ORP das soluções salinas (0,45%, 0,9%, 3% e 7,5%) durante a ativação por plasma. Inicialmente, os valores de ORP variam conforme a salinidade, apresentando 82,2 mV (0,45%), 99,9 mV (0,9%), 78,9 mV (3%) e 86,4 mV (7,5%), refletindo diferenças nas propriedades redox das soluções. Com a ativação por plasma, ocorre um aumento rápido nos primeiros 4–5 min, seguido por uma elevação mais gradual até a estabilização após 40 minutos, atingindo 203,2 mV (0,45%), 208,2 mV (0,9%), 202,2 mV (3%) e 222,4 mV (7,5%). Assim como ocorre no pH que, como comentado anteriormente, tem comportamento inversamente proporcional, todas alcançam valores finais similares, destacando a influência da salinidade na reatividade química e estabilidade oxidativa das soluções ativadas por plasma.

A **Figura 16c** apresenta a variação do TDS durante a ativação por plasma para diferentes concentrações salinas (0,45%, 0,9%, 3% e 7,5%). Todas as soluções mostram um aumento contínuo e linear no TDS ao longo do tempo, refletindo a geração de novas espécies dissolvidas, como nitratos, nitritos e peróxidos. No entanto, o aumento percentual do TDS varia de acordo com a concentração inicial de sais na solução. As soluções menos concentradas (0,45% e 0,9%) apresentam os maiores aumentos relativos, de 17,69% e 18,13%, respectivamente, enquanto as mais concentradas (3% e 7,5%) apresentam aumentos percentuais menores, de 15,87% e 9,38%. Esse comportamento pode ser explicado pelo seu menor conteúdo iônico inicial permitir um

maior impacto proporcional das espécies recém-introduzidas. Em contraste, as soluções com maior salinidade (3% e 7,5%) mostram mudanças relativas menores, provavelmente porque a grande concentração iônica inicial reduz o efeito relativo das espécies geradas pelo plasma adicionais.

A **Figura 16d** apresenta o aumento contínuo da condutividade elétrica (σ) das soluções salinas (0,45%, 0,9%, 3% e 7,5%) durante a ativação por plasma. A condutividade inicial varia de 6,5 mS/cm (0,45%), 12,55 mS/cm (0,9%), 43,19 mS/cm (3%) e 83,6 mS/cm (7,5%) e, depois de 40min, finaliza em 7,74 mS/cm (0,45%), 14,54 mS/cm (0,9%), 43,19 mS/cm (3%) 94,63 mS/cm (7,5%). Portanto, observa-se um crescimento linear em todas as concentrações, refletindo a formação de espécies reativas, como nitratos e nitritos, que contribuem para a elevação da densidade de íons dissolvidos.

Os aumentos percentuais de 18,71% (0,45%), 15,86% (0,9%), 14,93% (3%) e 13,89% (7,5%) indicam que soluções de menor salinidade (0,45% e 0,9%) exibem os maiores aumentos relativos na condutividade, sugerindo um maior impacto proporcional de espécies iônicas recém-introduzidas. Em contraste, soluções de maior salinidade (3% e 7,5%) mostram aumentos relativos mais modestos, provavelmente devido ao seu alto conteúdo inicial de íons, o que reduz o efeito relativo de espécies adicionais geradas por plasma. O maior aumento absoluto foi observado na solução de 7,5% (11,54 mS/cm), reforçando o papel da dissolução de íons induzida por plasma no aumento da condutividade.

A **Figura 16e** mostra a evolução da salinidade das soluções salinas durante a ativação por plasma. Os valores iniciais de salinidade foram 3,68 (0,45%), 7,36 (0,9%), 24,79 (3%) e 59,29 (7,5%). Após 40 minutos de ativação por plasma, as soluções de 0,45%, 0,9% e 3% apresentaram reduções de 6,79%, 12,5% e 15,16%, respectivamente, enquanto a solução de 7,5% mostrou um aumento de 5,31%. A salinidade das soluções de menor concentração inicialmente diminui devido à interação de espécies reativas com os íons dissolvidos, mas aumenta após cerca de 6 minutos, com a dissolução de nitratos e nitritos gerados pelo plasma. Já na solução de 7,5%, ocorre uma leve redução inicial seguida por um aumento progressivo, superando o valor original após 40 minutos. Isso sugere que soluções altamente concentradas favorecem a retenção de espécies reativas e a estabilização de produtos químicos gerados pelo plasma. Assim, a variação da salinidade resulta do equilíbrio entre consumo e geração de íons

A **Figura 16f** mostra a evolução do oxigênio dissolvido (OD) nas soluções salinas durante a ativação por plasma, destacando um padrão semelhante ao observado na água deionizada (**Figura 16e**). Em todas as condições, o OD apresenta uma queda inicial acentuada,

atribuída ao consumo rápido de oxigênio dissolvido pela formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), como radicais livres, nitratos e nitritos.

Na água deionizada, o OD (vide **Figura 15e**) reduz nos primeiros minutos, estabilizando-se em seguida devido à ausência de íons que auxiliem na regeneração de ROS. Nas soluções salinas, a redução inicial do OD também é evidente, mas a recuperação posterior varia de acordo com a concentração de sal. Essa recuperação significativa dessas soluções pode ser devido ao consumo de oxigênio dissolvido na formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), como radicais hidroxila ($\text{OH}\cdot$), ozônio (O_3) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). O nível mais baixo de OD é atingido por volta dos 20 minutos, indicando que as reações oxidativas induzidas pelo plasma continuam a consumir oxigênio ao longo desse período.

Esses resultados evidenciam que a salinidade exerce influência direta na dinâmica do OD, regulando o consumo e a regeneração de espécies reativas geradas pelo plasma. Soluções mais concentradas apresentam maior estabilidade química, enquanto soluções menos concentradas são mais sensíveis às transformações iniciais. O OD, portanto, se mostra um parâmetro essencial para monitorar o equilíbrio químico-dinâmico das interações plasma-líquido e o impacto da salinidade na formação de espécies reativas.

A **Figura 16g** mostra a evolução da concentração de cloro livre (Cl) em ppm nas soluções salinas durante a ativação por plasma. Ao contrário de outros parâmetros, a concentração de cloro livre apresenta um comportamento dinâmico e não linear, com flutuações ao longo do tempo, sugerindo um equilíbrio complexo entre geração, recombinação e consumo por reações induzidas pelo plasma. Enquanto as soluções de 0,45% e 7,5% apresentam um declínio inicial, as de 0,9% e 3% mostram um aumento, indicando que a formação de cloro depende fortemente da salinidade e das condições do plasma.

A solução de 0,9% mantém uma concentração relativamente estável, sugerindo um equilíbrio entre formação e consumo de cloro, enquanto as soluções de 3% e 7,5% apresentam maiores oscilações, provavelmente devido à maior reatividade oxidativa. Já a solução de 0,45%, com menor concentração de íons, exibe um aumento gradual, porém limitado, indicando que a baixa salinidade restringe a formação de cloro, mas reduz sua depleção por minimizar reações concorrentes.

A **Figura 16h** ilustra a perda de massa em tempo real de soluções salinas durante 40 minutos de ativação do plasma, mostrando uma diminuição contínua na massa ao longo do tempo devido à evaporação induzida pelo aquecimento do plasma e interações gás-fluxo. A massa inicial para todas as soluções é de 40 g, com redução de massa seguindo uma tendência geral semelhante. No entanto, a taxa de perda de massa varia com a salinidade, destacando a

influência da concentração iônica na dinâmica da evaporação. Medições experimentais mostram que 0,45% de NaCl exibe uma taxa de perda de massa de 0,177 g/min, 0,9% de NaCl tem 0,215 g/min, 3% de NaCl atinge 0,212 g/min e 7,5% de NaCl mede 0,194 g/min. Esses dados indicam que a solução de 3% experimenta a maior taxa de evaporação, enquanto a solução de 0,45% mostra a menor. Notavelmente, a relação entre concentração iônica e taxa de perda de massa é não linear: em vez de diminuir ou aumentar constantemente com a salinidade, uma concentração intermediária de sal (3%) produz a evaporação mais pronunciada. Isso pode surgir de um equilíbrio entre transferência de calor e massa aprimorada em forças iônicas moderadas e os efeitos opostos de alta pressão osmótica e interações iônicas em salinidades muito altas ou muito baixas. Na solução mais concentrada (7,5%), a taxa de evaporação (0,186 mg/min) permanece maior do que a da solução de 0,45%, sugerindo que o aquecimento induzido por plasma, a convecção local e os fenômenos de superfície podem superar os efeitos simples de "estabilização" osmótica ou iônica.

Ao longo da ativação do plasma, as curvas de perda de massa em tempo real geralmente mostram um declínio constante na massa da solução ao longo do tempo, embora "etapas" irregulares ocasionais possam aparecer. Esses desvios podem ser atribuídos a instabilidades do plasma, variações de aquecimento localizadas ou mudanças transitórias na superfície do líquido, todas as quais podem alterar temporariamente a taxa de evaporação. Essas descobertas ressaltam a importância de considerar a evaporação ao usar plasma para ativar líquidos. À medida que a água evapora, a concentração de íons dissolvidos e espécies reativas muda, o que pode impactar significativamente a química da solução ao afetar a regulação do pH, a força iônica e a estabilidade das espécies reativas. Esses efeitos são particularmente cruciais na desinfecção assistida por plasma, processamento químico e tratamentos biomédicos, onde a composição consistente da solução é essencial para manter a eficácia.

4.4 Análise das RONS

A presença de nitrito, nitrato e peróxido de hidrogênio nos PALs gerados pelo plasma foi confirmada por meio de dois métodos complementares: ensaio colorimétrico e espectrofotometria UV-Vis.

O ensaio colorimétrico utilizou tiras reagentes específicas para NO_2^- , NO_3^- e H_2O_2 para estimar suas concentrações em cada um dos líquidos expostos ao plasma. Os resultados, resumidos nas **Tabelas 2-6**, ilustram a evolução dinâmica dessas espécies reativas ao longo do

tempo. Os tempos de ativação foram registrados em minutos da seguinte forma: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0; 25,0; 30,0; 35,0 e 40,0 minutos.

Já a espectrofotometria UV-Vis, forneceu uma avaliação qualitativa mais detalhada da composição do PAS, permitindo a identificação de picos de absorção característicos associados a cada espécie reativa. Essas medições são descritas nas **Figuras 17 e 18**.

A combinação desses métodos possibilitou uma avaliação abrangente, tanto qualitativa quanto quantitativa, das concentrações de RONS em função do tempo de exposição ao plasma. Os dados demonstram uma relação direta entre o aumento no tempo de ativação e a geração dessas espécies reativas, destacando o impacto do plasma no enriquecimento químico dos líquidos ativados.

4.4.1 PAW

4.4.1.1 Ensaio Colorimétrico

Como é possível analisar na **Tabela 2**, nos estágios iniciais (até 2,0 min), não são detectados níveis de NO_3^- , enquanto NO_2^- e H_2O_2 mostram aumentos modestos. Após 10,0 min, a geração de espécies reativas se torna mais pronunciada. Em 15,0 min, as concentrações de NO_3^- aumentam para entre 10 e 25 mg/L, com aumentos simultâneos em NO_2^- e H_2O_2 . Além de 20,0 min, as concentrações dessas espécies gradualmente se estabilizam, sugerindo que o sistema está se aproximando de um equilíbrio dinâmico entre a geração e o consumo de RONS.

Tabela 2: Concentrações estimadas de Nitrato (NO_3^-), Nitrito (NO_2^-) e Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2) em função do tempo de ativação da água deionizada por plasma.

Tempo de Ativação (min)	NO_3^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	H_2O_2 (mg/L)
0.5 – 2.0	0	1 – 5	0.5 – 2
2.5	0 – 10	1 – 5	0.5 – 2
3.0 – 5.0	0 – 10	1 – 5	2 – 5
10.0	0 – 10	1 – 5	5 – 10
15.0	10 – 25	5 – 10	5 – 10
20.0 – 40.0	10 – 25	5 – 10	10 – 25

4.4.1.2 Espectrofotometria UV-Vis

A **Figura 16**, que apresenta a absorbância em função do comprimento de onda da água deionizada ativada por diferentes tempos de ativação até 40 min, revela um aumento

progressivo da absorbância conforme o tempo de ativação aumenta. Esse comportamento reflete um crescimento contínuo na concentração de RONS na água deionizada ativada por plasma. Os picos identificados correspondem a espécies como H_2O_2 , HNO_2 , NO_3^- , NO_2^- e O_3 , confirmando a formação contínua dessas moléculas ao longo do processo.

A curva de absorbância evidencia o acúmulo dessas espécies reativas, que desempenham um papel essencial nos mecanismos de ação do plasma, como será destacado em ensaios de microbiológicos apresentados mais adiante. Esses compostos são fundamentais para as propriedades antimicrobianas e oxidativas do PAW, além de serem cruciais para suas aplicações biomédicas e industriais.

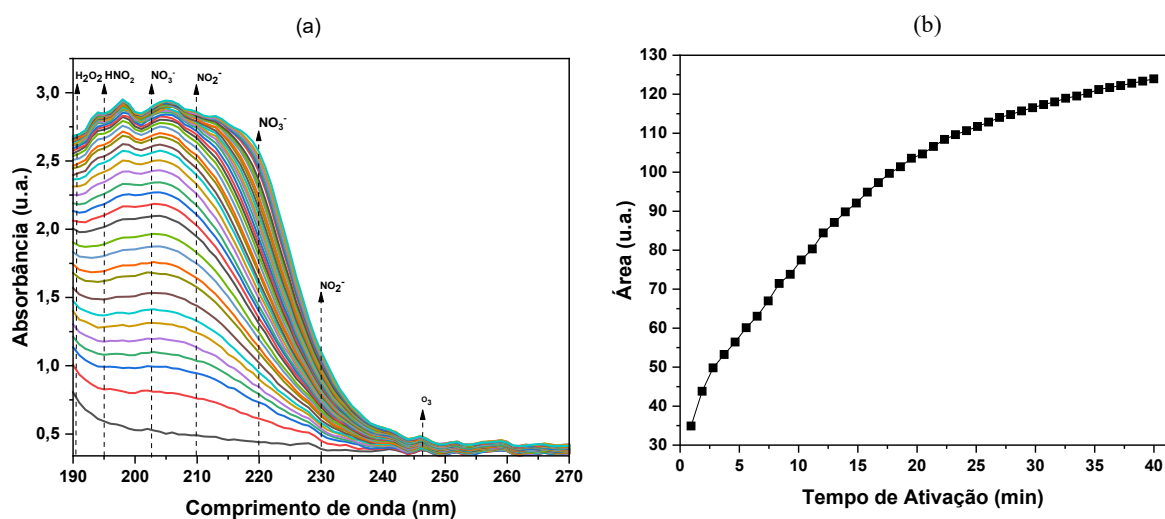


Figura 17: (a) Espectros de absorbância UV-Vis resolvidos no tempo (190–270 nm) de água deionizada ativada por plasma para tempos de ativação variados (até 40 minutos), destacando picos de absorção RONS característicos; (b) Área espectral integrada plotada em relação ao tempo de ativação, ilustrando o acúmulo progressivo de espécies reativas.

A **Figura 17a** mostra que, à medida que o tempo de ativação do plasma aumenta, a absorbância geral na faixa UV (190–270 nm) aumenta progressivamente. Picos distintos correspondentes a H_2O_2 , HNO_2 , NO_3^- , NO_2^- e O_3 tornam-se cada vez mais pronunciados, refletindo a formação contínua dessas moléculas ao longo do tratamento com plasma. Esse aumento constante na absorbância se alinha estreitamente com os dados colorimétricos (**Tabela 2**), confirmando que o plasma aumenta a geração de espécies reativas de nitrogênio e oxigênio na fase aquosa.

A **Figura 17b** complementa os dados espectrais plotando a área integrada sob a curva de absorvância em relação ao tempo de ativação. A tendência ascendente constante nessa área integrada ressalta o efeito cumulativo do tratamento prolongado com plasma, levando a concentrações mais altas de RONS. Notavelmente, a inclinação desse aumento começa a diminuir após aproximadamente 20 min, sugerindo que o sistema está se aproximando de um ponto de saturação ou equilíbrio dinâmico. Esta observação é paralela aos resultados colorimétricos, onde as concentrações de NO_3^- , NO_2^- e H_2O_2 começam a estabilizar em tempos de ativação mais longos.

A combinação de análises colorimétricas e espectrofotométricas UV-Vis oferece análises qualitativas e quantitativas sobre a geração de RONS em PAW. Coletivamente, os dados demonstram uma relação direta entre o tempo de exposição do plasma e a formação de nitrito, nitrato e peróxido de hidrogênio. Enquanto essas espécies se acumulam de forma constante nos primeiros 20 minutos de tratamento, o sistema começa a se estabilizar além de aproximadamente 20 minutos, indicando que a ativação contínua do plasma eventualmente atinge um estado de equilíbrio.

4.4.2 PAS

4.4.2.1 Ensaio Colorimétrico

Na solução menos concentrada (0,45% NaCl, **Tabela 3**), o nitrito permanece em níveis baixos (0–1 mg/L) durante os 2 minutos iniciais, enquanto o peróxido de hidrogênio aumenta para 5 mg/L dentro deste período. A formação de nitratos é observada somente após 3,5 minutos, atingindo 10–25 mg/L após 10 minutos. Uma tendência similar é observada na solução de NaCl a 0,9% (**Tabela 4**), embora a formação de H_2O_2 seja inicialmente mais lenta, permanecendo abaixo de 5 mg/L dentro dos primeiros 3 minutos. Entretanto, em 5 minutos, as concentrações de todas as espécies são comparáveis àquelas encontradas na solução a 0,45%.

Tabela 3: Concentrações de NO_2^- , NO_3^- e H_2O_2 gerados durante a ativação por plasma da solução salina a 0,45%.

Tempo de Ativação (min)	NO_3^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	H_2O_2 (mg/L)
0.5 – 2.0	0	0 - 1	0.5 - 5
2.5 – 3.0	0	1 - 5	2 - 5
3.5 – 5.0	0 - 10	1-5	5 - 10
10.0 – 40.0	10 - 25	5 - 10	10 - 25

Tabela 4: Concentrações de nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) gerados em diferentes tempos de ativação por plasma na solução salina a 0,9%.

Tempo de Ativação (min)	NO_3^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	H_2O_2 (mg/L)
0,5	0	0-1	0.5
1 – 1.5	0	1 - 5	0.5 - 2
2 – 3	0 - 10	1 - 5	2 - 5
3.5 - 5	0 - 10	1 - 5	5 - 10
10 – 40	10 - 25	5 - 10	10 - 25

Tabela 5: Concentrações de nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) gerados em diferentes tempos de ativação por plasma na solução salina a 3%.

Tempo de Ativação (min)	NO_3^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	H_2O_2 (mg/L)
0.5	0	1 - 5	0.5
1.0	0 - 10	1 - 5	0,5 - 2
1.5 – 5.0	10 - 25	1 - 5	2 - 5
10.0	10 - 25	5 - 10	5 - 10
15.0 – 40.0	25 - 50	10 - 20	10 - 25

Tabela 6: Concentrações de nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) geradas em função do tempo de ativação por plasma na solução salina a 7,5%.

Tempo de Ativação (s)	NO_3^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	H_2O_2 (mg/L)
0.5 – 2.5	0	0 - 1	0.5 - 2
3.0 – 4.0	0 - 10	0 - 1	0.5 - 2
4.5 – 5.0	0 - 10	1 - 5	0.5 - 2
10.0 – 20.00	10 - 25	5 - 10	2 - 5
25.0	10 - 25	5 - 10	5 - 10
30.0 – 40.0	25 - 50	10 - 20	5 - 10

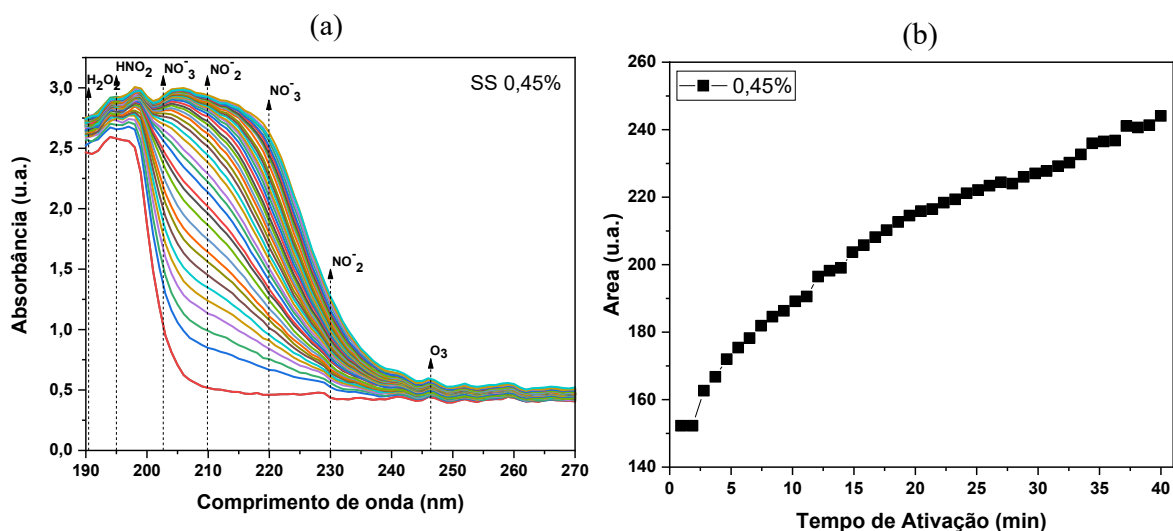
Um padrão distinto emerge na solução de NaCl a 3% mais concentrada (**Tabela 5**), onde a geração de RONS é retardada. As concentrações de NO_3^- atingem 10–25 mg/L após apenas 1,5 minutos, um início significativamente mais rápido do que nas soluções menos concentradas. Enquanto isso, NO_2^- e H_2O_2 permanecem relativamente baixos nos primeiros 5 minutos, indicando um efeito tampão devido à maior força iônica. Notavelmente, em tempos de ativação

mais longos (> 15 minutos), as concentrações de nitrato e peróxido de hidrogênio atingem 25–50 mg/L, superando os níveis observados nas soluções de menor salinidade.

Na solução de NaCl a 7,5% (**Tabela 6**), o acúmulo de RONS é ainda mais tardio. Nos primeiros 2,5 minutos, o nitrito permanece abaixo de 1 mg/L, e o peróxido de hidrogênio permanece abaixo de 2 mg/L. Um aumento mensurável em NO_3^- e NO_2^- é detectado somente após 4,5 minutos, atingindo concentrações mais altas (>25 mg/L NO_3^- e 10–20 mg/L NO_2^-) após 30 minutos. Este período prolongado de estabilização apoia ainda mais a hipótese de que o aumento da salinidade modula a cinética química da formação de RONS.

4.4.2.2 Espectrofotometria UV-Vis

A **Figura 18 (a, c, e, f)** apresenta os espectros UV-Vis obtidos em tempo real para as soluções salinas (0,45%, 0,9%, 3% e 7,5%) ativadas por plasma, demonstrando um aumento progressivo na absorbância com o tempo de ativação. Esse comportamento é associado à formação de RONS, como H_2O_2 , NO_2^- e NO_3^- , cujas concentrações são detalhadas nas **Tabelas 3 a 6**. A evolução dessas espécies reflete a influência da salinidade na dinâmica de geração, acúmulo e estabilização das RONS durante a ativação por plasma.



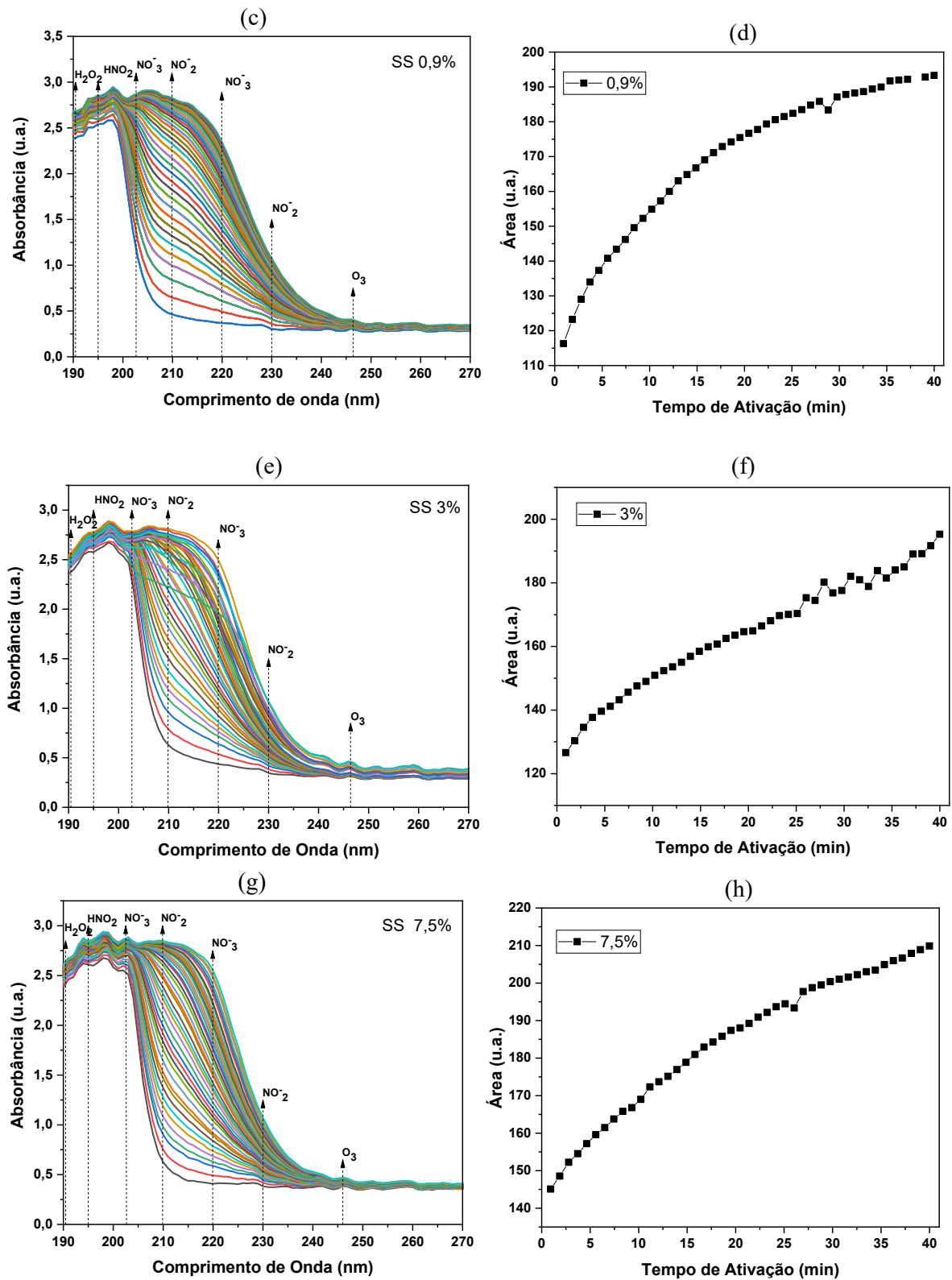


Figura 18: Espectros de absorbância UV-Vis obtidos em tempo real durante a ativação por plasma das soluções salinas: a) 0,45%; c) 0,9%; e) 3%; f) 7,5%. E as áreas integradas sob a curva de absorbância em relação ao tempo de ativação para as mesmas: b) 0,45%; d) 0,9%; f) 3%; g) 7,5%.

Soluções de menor salinidade (0,45% e 0,9%) mostram um aumento mais rápido na absorvância nos primeiros minutos de ativação, especialmente na região de 200–220 nm, sugerindo uma rápida formação de nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-). Em contraste, soluções de maior salinidade (3% e 7,5%) exibem um aumento mais gradual, indicando um acúmulo tardio de RONS devido à maior força iônica, que influencia a solubilidade e a cinética de reação de espécies geradas por plasma. Esse comportamento também pode ser visto nos primeiros minutos das **Figuras 18b, 18d**.

A absorvância em soluções de NaCl a 3% e 7,5% leva mais tempo para aumentar, como visto nas **Figuras 18e-18h**, correlacionando-se com a estabilização tardia de NO_3^- e NO_2^- observada na **Tabela 5** e **Tabela 6**. A presença de um pico de ozônio (O_3) mais pronunciado (~246 nm) sugere uma diferença na geração de espécies oxidativas em soluções de maior salinidade, possivelmente devido às interações entre O_3 e Cl^- .

A estabilização de NO_3^- em concentrações mais altas nas **Figuras 18e** e **18g** (3% e 7,5%) corresponde ao aumento posterior na absorvância além de 10 minutos de ativação por plasma. As tendências nos espectros UV-Vis confirmam o processo de oxidação progressiva que ocorre em soluções salinas tratadas com plasma, com a força iônica desempenhando um papel importante na modulação da cinética da formação de RONS.

Esses resultados, combinados com a análise das **Tabelas 3-6**, sugerem que a força iônica desempenha um papel fundamental no controle da geração de RONS durante a ativação do plasma. Enquanto soluções de menor salinidade exibem rápida formação e estabilização de espécies reativas, soluções de maior salinidade introduzem um efeito tampão que atrasa o acúmulo de RONS, mas, ao fim das ativações, permite concentrações finais semelhantes ou até maiores. Os resultados indicam que, embora todas as soluções eventualmente atinjam concentrações comparáveis de RONS, sua cinética de formação difere significativamente. Soluções de menor salinidade (0,45% e 0,9%) permitem rápido acúmulo de RONS, tornando-as adequadas para aplicações que exigem efeitos oxidativos imediatos. Em contraste, soluções mais concentradas (3% e 7,5%) atrasam a formação de RONS, o que pode ser vantajoso em aplicações que exigem estabilidade prolongada ou controle gradual de reatividade.

4.5 Análise dos Ensaio Microbiológicos

O estudo comparativo de líquidos ativados por plasma foi conduzido utilizando água deionizada (DI) e solução salina a 0,9% (PAS) para avaliar a eficácia de inativação microbiana

sob os mesmos parâmetros de ativação. A avaliação microbiológica abrangeu três microrganismos distintos: a bactéria gram-positiva *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538), a bactéria gram-negativa *Escherichia coli* (ATCC 10799) e o fungo *Candida albicans* (SC 5314). As **Figuras 19** e **20** sintetizam os resultados obtidos, com detalhes suplementares fornecidos nos **Apêndices A-F**.

4.5.1 Ensaio - PAW

Os resultados indicam que o tempo de contato desempenha um papel crucial na inibição microbiana. A PAW demonstrou maior eficácia em tempos prolongados de contato (30 min), conforme observado nas **Figuras 19b**, **19d** e **19f**. Além disso, os dados sugerem que as bactérias foram mais suscetíveis ao tratamento do que o fungo *C. albicans*. Entre as bactérias, a gram-positiva *S. aureus* mostrou uma inibição mais acentuada em comparação à gram-negativa *E. coli*, destacando a influência das diferenças estruturais na parede celular.

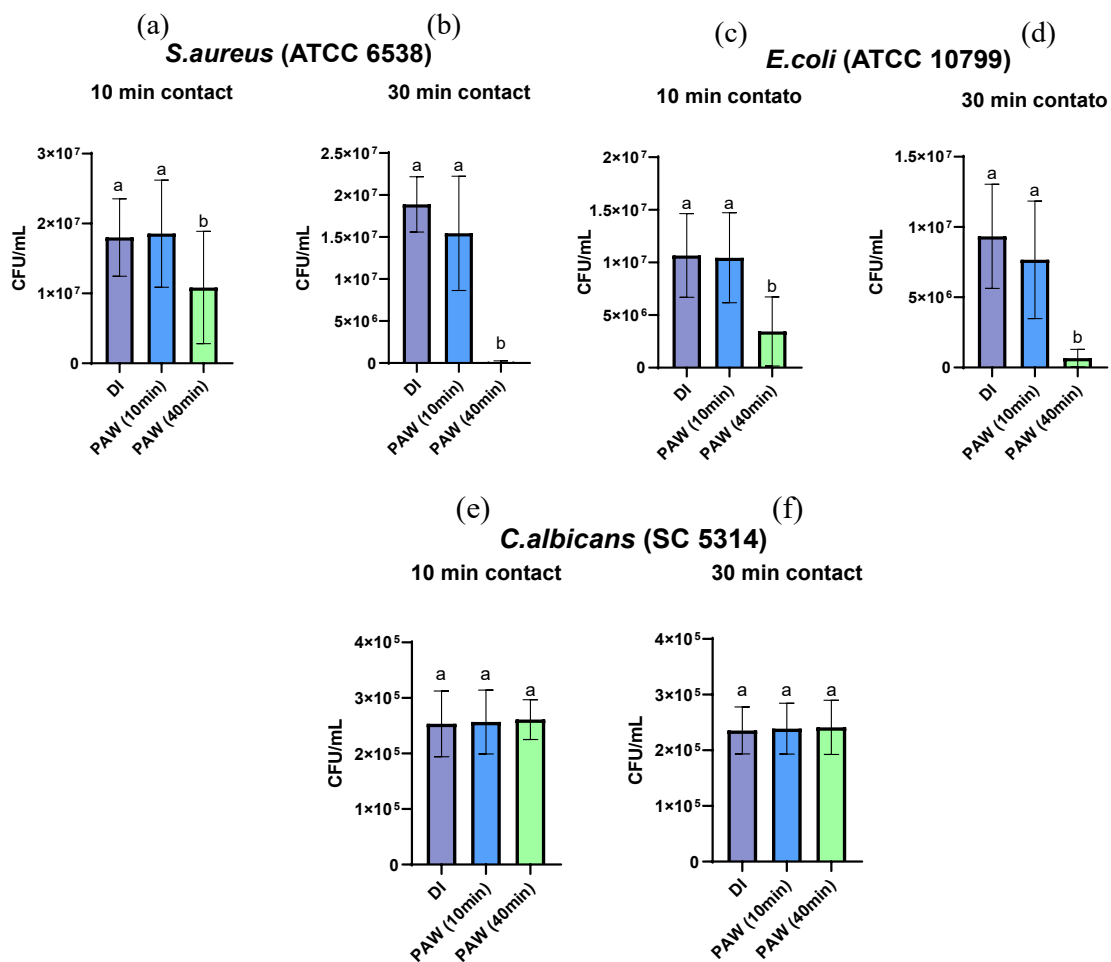


Figura 19: Contagem de unidades formadoras de colônias (CFU/mL) para os ensaios com *S. aureus* (ATCC 6538), *E. coli* (ATCC 10799) e *C. albicans* (SC 5314), utilizando água

deionizada (DI) como controle, e água ativada por plasma (PAW) por 10 min e 40 min. Resultados apresentados para *S. aureus*: (a) 10 min de contato e (b) 30 min de contato; *E. coli*: (c) 10 min de contato e (d) 30 min de contato; e *C. albicans*: (e) 10 min de contato e (f) 30 min de contato. Letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas (One-way ANOVA com post hoc de Tukey).

***Staphylococcus aureus* (ATCC 6538):** Com 10 min de contato (**Figura 19a**), não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre a DI e a PAW tratada por 10 min. Contudo, a PAW tratada por 40 min apresentou uma redução significativa no número de CFU/mL. Em 30 min de contato (**Figura 19b**), a PAW tratada por 40 min demonstrou uma inibição mais pronunciada, sendo estatisticamente diferente dos demais grupos.

***Escherichia coli* (ATCC 10799):** Para 10 min de contato (**Figura 19c**), apenas a PAW tratada por 40 min resultou em uma redução significativa, enquanto os demais grupos não apresentaram diferenças relevantes. Com 30 min de contato (**Figura 19d**), a PAW tratada por 40 min exibiu uma diminuição acentuada no número de CFU/mL, sendo estatisticamente distinta das demais condições.

***Candida albicans* (SC 5314):** Tanto com 10 min (**Figura 19e**) quanto com 30 min de contato (**Figura 19f**), não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre a DI e as PAWs tratadas por 10 e 40 min. Os valores de CFU/mL permaneceram similares em todas as condições.

Os resultados reforçam o potencial da PAW como uma ferramenta eficaz para inativação microbiana, especialmente contra bactérias. A estrutura das paredes celulares parece influenciar significativamente a suscetibilidade dos microrganismos, com *S. aureus* apresentando maior sensibilidade devido à sua parede celular gram-positiva mais simples. Por outro lado, a ausência de efeito significativo contra *C. albicans* sugere que os mecanismos de inativação do plasma podem ser menos eficazes contra fungos, possivelmente devido às diferenças na composição celular ou à resistência inerente das células fúngicas.

4.5.2 Ensaio - PAS

De forma similar aos resultados observados com a PAW, tempos de contato mais prolongados entre as soluções salinas ativadas por plasma (PAS) e os microrganismos resultaram em maior inibição, com destaque para os períodos de 30 minutos, conforme

mostrado nas Figuras 20b, 20d e 20f. Novamente, as bactérias se mostraram mais sensíveis ao tratamento em comparação ao fungo *C. albicans*.

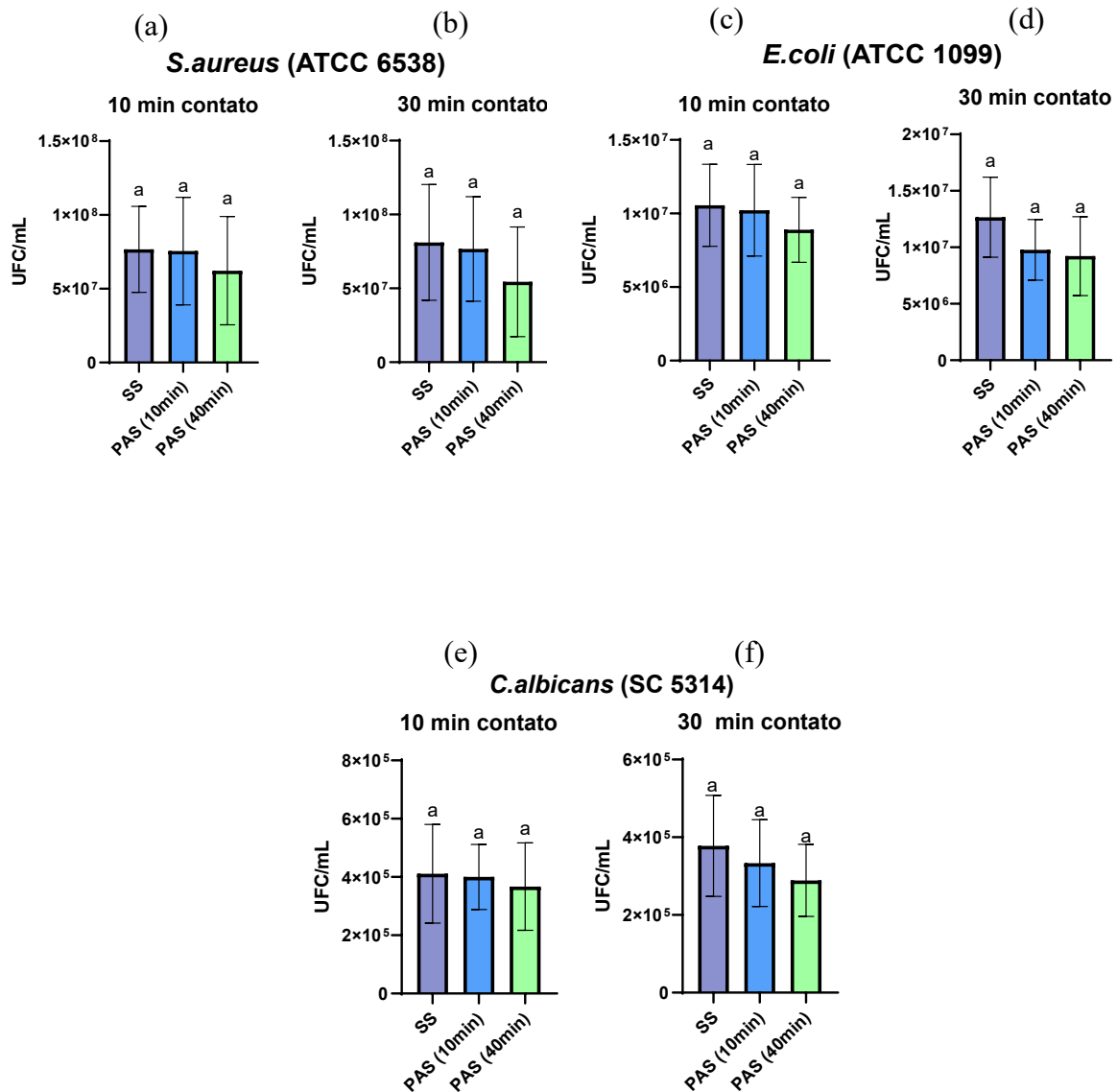


Figura 20: Contagem de unidades formadoras de colônias (UFC/mL) para ensaios com *S. aureus* (ATCC 6538), *E. coli* (ATCC 1099) e *C. albicans* (SC 5314), usando solução salina a 0,9% (SS) como controle e solução salina ativada por plasma (PAS) por 10 min e 40 min. Resultados apresentados para *S. aureus*: (a) 10 min de contato e (b) 30 min de contato; *E. coli*: (c) 10 min de contato e (d) 30 min de contato; e *C. albicans*: (e) 10 min de contato e (f) 30 min de contato. Letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas (ANOVA unidirecional com teste post hoc de Tukey).

***Staphylococcus aureus* (ATCC 6538):** Com 10 min de contato (**Figura 20a**), não foi observada diferença estatisticamente significativa entre a solução SS e a PAS tratada por 10 min. Entretanto, na **Figura 20b**, a PAS tratada por 40 min demonstrou certa redução, especialmente após 30 min de contato, quando a inibição mais pronunciada, porém, sem resultado estatístico significativo.

***Escherichia coli* (ATCC 1099):** A **Figura 20c** mostra que, para 10 min de contato, apenas a PAS tratada por 40 min apresentou uma redução em comparação aos demais grupos, porém, não de forma tão expressiva. Após 30 min de contato, como representado na **Figura 20d**, a PAS tratada por 40 min resultou em uma redução mais acentuada, porém o resultado não obteve efeito significativo.

***Candida albicans* (SC 5314):** No caso do fungo *C. albicans*, tanto com 10 min de contato (**Figura 20e**) quanto com 30 min de contato (**Figura 20f**), não foram detectadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos avaliados. Em todas as condições, os valores de UFC/mL permaneceram consistentes, refletindo uma menor eficácia do tratamento com PAS contra esse microrganismo.

Esses resultados demonstram baixa eficácia da PAS, porém, demonstram certa redução em tempos de contato mais longos, especialmente contra bactérias gram-positivas e gram-negativas. A maior resistência do fungo *C. albicans*, assim como mencionado para a PAS, pode ser atribuída à sua estrutura celular, que inclui uma parede celular mais robusta e complexa, composta por quitina e outras proteínas, dificultando a ação direta das espécies reativas presentes no líquido ativado. Além disso, a composição salina 0,9% parece modular a geração e estabilidade das RONS, o que pode influenciar a efetividade geral do tratamento em diferentes tipos de microrganismos.

4.6 Mecanismos

4.6.1 Ensaio PAW

Os resultados mostram que o tratamento com PAW gerado pela ativação com o plasma de argônio SWD é altamente eficaz contra a bactéria gram-positiva *Staphylococcus aureus* e a bactéria gram-negativa *Escherichia coli*, particularmente com tempos de ativação e contato mais longos. No entanto, a eficácia limitada contra o fungo *Candida albicans* destaca a necessidade de otimizar os parâmetros físico-químicos do PAW ou combinar abordagens para aumentar sua ação contra microrganismos mais resistentes.

A eficácia antimicrobiana da PAW está diretamente relacionada aos parâmetros físico-químicos analisados previamente. A redução significativa no número de UFC/mL para *S. aureus* e *E. coli* (**Figura 19a–d**) pode ser atribuída à alta concentração de RONS geradas durante o tratamento com plasma. A acidificação da PAW, com redução do pH, compromete a estabilidade das membranas celulares, interferindo nos mecanismos homeostáticos das bactérias. Esse processo leva à desnaturalização de proteínas, peroxidação de lipídios e danos estruturais irreparáveis (41,97). A eficácia aumenta com tempos de ativação mais longos (40 min) e maior tempo de contato (30 min), potencializando o impacto das espécies reativas.

Além disso, o aumento do ORP (potencial de oxidação-redução) reflete o elevado poder oxidante da solução, causando danos às biomoléculas essenciais, como lipídios, proteínas e ácidos nucleicos (52,94). A elevação da condutividade elétrica (σ) e do TDS também contribui para o estresse osmótico nas bactérias, dificultando a adaptação celular ao ambiente reativo. Esses mecanismos explicam a maior vulnerabilidade de *S. aureus*, enquanto bactérias gram-negativas, como *E. coli*, apresentam maior resistência inicial devido à sua membrana externa que atua como barreira.

A ação diferencial de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS) em estruturas celulares explica as suscetibilidades variáveis de microrganismos à água ativada por plasma (PAW). Em bactérias gram-positivas, como *S. aureus*, os RONS podem penetrar facilmente na parede celular espessa do peptidoglicano e atingir componentes intracelulares, causando danos oxidativos a proteínas, lipídios e ácidos nucleicos (31,41,97). Esse dano intracelular extenso leva ao estresse celular irreversível e, finalmente, à morte celular (**Figura 20**).

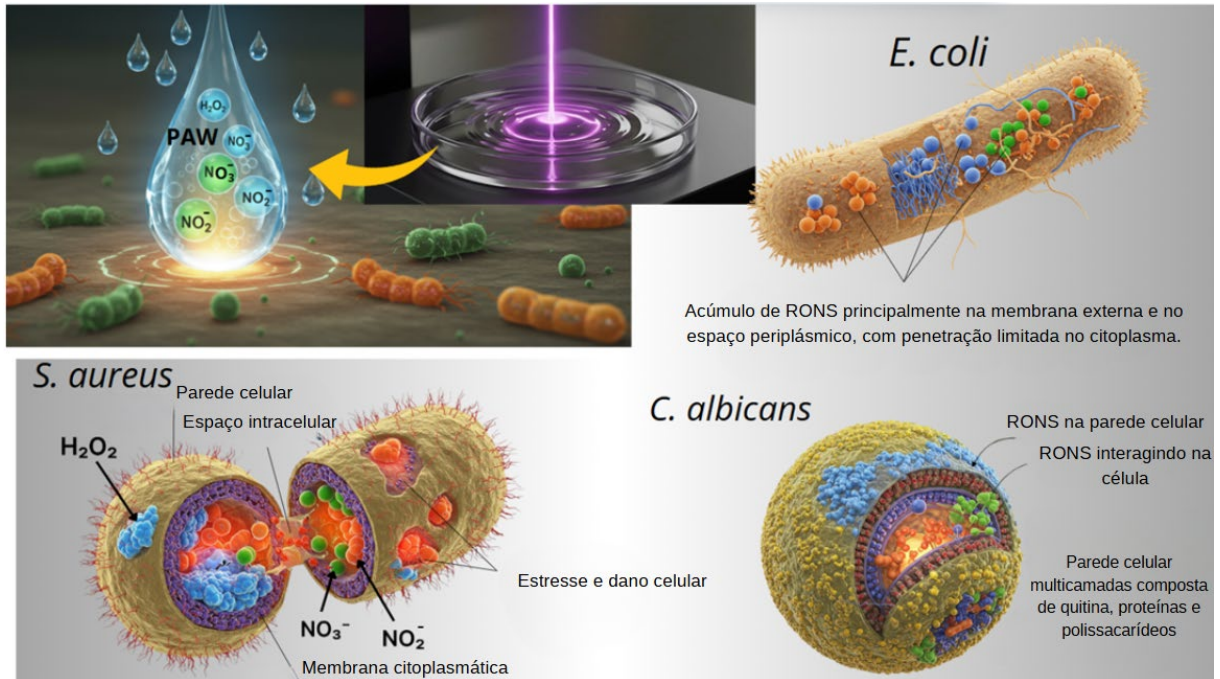


Figura 21: Ação diferencial de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS) em células microbianas expostas à água ativada por plasma (PAW). A ilustração destaca como as diferenças estruturais entre microrganismos afetam sua suscetibilidade a RONS. Em *S. aureus* (gram-positivo), RONS penetram na parede celular e atingem componentes intracelulares, causando danos extensos. Em *E. coli* (gram-negativo), RONS se acumulam na membrana externa e no espaço periplásmico, retardando seu efeito antimicrobiano. Em *C. albicans* (fungo), a parede celular complexa composta de quitina, glicoproteínas e β -glucanos limita a penetração de RONS, enquanto enzimas antioxidantes neutralizam ainda mais o estresse oxidativo.

Em contraste, bactérias gram-negativas, como *E. coli* (**Figura 19e-f**), possuem uma membrana externa que serve como uma barreira protetora adicional. Como resultado, os RONS tendem a se acumular principalmente na membrana externa e no espaço periplásmico, com penetração limitada no citoplasma. Essa difusão restrita atrasa o efeito antimicrobiano, permitindo que a *E. coli* mantenha a integridade celular por um período mais longo em comparação com bactérias gram-positivas (41,97).

Por outro lado, a eficácia limitada contra *C. albicans* pode ser atribuída às suas características estruturais únicas, como já mencionado na **Seção 2.3.1**. Ao contrário das bactérias, os fungos têm uma parede celular espessa e altamente complexa composta de quitina, glicoproteínas e β -glucanos. Essa estrutura multicamadas atua como uma barreira física e química, dificultando significativamente a penetração de RONS (**Figura 21**) (75,98).

Essas descobertas ressaltam que a eficácia do PAW depende não apenas de seus parâmetros físico-químicos, mas também das características estruturais e bioquímicas específicas dos microrganismos alvo. As diferenças entre células bacterianas e fúngicas, bem como as variações entre bactérias gram-positivas e gram-negativas, destacam a importância de adaptar estratégias antimicrobianas baseadas em plasma para abordar efetivamente microrganismos mais resistentes.

4.6.2 Ensaio PAS

Os resultados mostram que o tratamento com PAS gerado pela ativação com o plasma de argônio SWD apresenta baixa eficácia antimicrobiana contra as bactérias *S. aureus* e *E. coli*. A menor eficiência, principalmente quando comparada à PAW, pode ser atribuída às propriedades físico-químicas da solução salina ativada, que influenciam diretamente a geração e a estabilidade das espécies reativas produzidas pelo plasma.

A presença de íons Na^+ e Cl^- na PAS apresenta um comportamento tamponante que reduz a acidificação do meio, mantendo o pH em níveis mais elevados em comparação à PAW. Como consequência, o impacto sobre a estabilidade das membranas celulares microbianas é atenuado, dificultando a desestabilização homeostática das bactérias e retardando o efeito antimicrobiano (**Figuras 15 e 16a**).

Além disso, a menor eficiência antimicrobiana da PAS pode estar relacionada à influência da condutividade elétrica e do potencial de oxidação-redução (ORP). A alta condutividade da solução salina favorece interações entre os íons dissolvidos e as espécies reativas geradas pelo plasma, levando a uma menor disponibilidade de RONS livres no meio. Esse fenômeno resulta em um menor ORP da PAS em relação à PAW (**Figura 16b**), reduzindo o potencial oxidante da solução e, conseqüentemente, seu efeito sobre componentes celulares essenciais, como lipídios, proteínas e ácidos nucleicos.

A ação antimicrobiana da PAS também é modulada pela estabilidade osmótica conferida pelos íons dissolvidos. A elevada concentração de Na^+ e Cl^- cria um meio de maior osmolaridade, o que pode minimizar o estresse osmótico imposto às bactérias. Essa condição permite que microrganismos apresentem maior resistência inicial, pois possuem mecanismos eficientes para regular seu equilíbrio osmótico. Em contraste, a PAW, por ser um meio de menor concentração iônica, pode provocar um estresse osmótico mais significativo, tornando as células mais suscetíveis a danos estruturais (99).

Outro fator a considerar é a interação entre os íons Na^+ e Cl^- e as membranas celulares dos microrganismos-alvo. Como citado na **Seção 4.6.1**, a *S. aureus*, cuja parede celular espessa,

mas porosa, permite maior interação com as espécies reativas, o efeito antimicrobiano pode ser mais pronunciado. Por outro lado, a membrana externa de *E. coli* atua como uma barreira protetora, restringindo a penetração dos RONS e retardando os efeitos letais do plasma. No caso de *C. albicans*, sua parede celular robusta, composta por quitina, glicoproteínas e β -glucanos, dificulta a difusão dos RONS, aumentando sua resistência ao tratamento com PAS (**Figura 21**) (75,98).

Além da estabilização osmótica, as concentrações de NaCl influenciam a produção de RONS, afetando a reatividade e estabilidade das PAS. Durante a ativação, o íon cloreto (Cl^-) é oxidado por espécies reativas do plasma, gerando RCS (**Seção 2.2.3**), que interagem com os RONS e modulam seu equilíbrio químico. Essas interações aumentam a complexidade e a dinâmica das PAS em relação à PAW. Além disso, o aumento da força iônica devido ao Cl^- altera a solubilidade e difusão das espécies reativas, impactando a interação entre o plasma e o líquido. Essas alterações também podem impactar diretamente nos efeitos antimicrobianos (63,100,101).

Essas análises e hipóteses demonstram que os resultados quando ao baixo efeito antimicrobiano representado pela PAS está diretamente relacionada à sua composição iônica e às interações físico-químicas que ocorrem durante a ativação por plasma. A menor disponibilidade de RONS livres, a estabilidade do pH e o efeito osmótico da solução atuam como fatores que modulam sua eficiência antimicrobiana (99). Portanto, estratégias como o ajuste dos parâmetros de ativação do plasma ou a combinação da PAS com outros agentes antimicrobianos podem ser exploradas para aprimorar sua ação contra microrganismos mais resistentes.

5 Conclusão

Este trabalho investigou a interação do jato de plasma gerado pelo sistema Surfatron com diferentes líquidos-alvo, destacando as propriedades físico-químicas e antimicrobianas de água deionizada ativada por plasma (PAW) e soluções salinas em concentrações de 0,45%, 0,9%, 3% e 7,5% ativadas por plasma (PAS). Os resultados obtidos evidenciaram o impacto significativo do plasma na modificação química dos líquidos e no desenvolvimento de sua capacidade antimicrobiana, com importantes implicações para aplicações biomédicas, sanitárias e industriais.

A análise espectroscópica confirmou a formação de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), como radicais hidroxila (OH), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitrito (NO₂⁻) e nitrato (NO₃⁻), cujas concentrações foram diretamente influenciadas pela composição do líquido-alvo e pela salinidade. Soluções salinas com concentrações mais baixas, como 0,45% e 0,9%, apresentaram formação mais rápida e estabilização precoce de RONS, enquanto soluções mais concentradas, como 3% e 7,5%, mostraram maior resistência inicial devido ao efeito tamponante dos íons dissolvidos, mas eventualmente alcançaram concentrações de RONS semelhantes após tempos de ativação prolongados.

Os ensaios microbiológicos revelaram maior eficácia antimicrobiana da PAW em relação à PAS 0,9%, especialmente contra bactérias gram-positivas (*Staphylococcus aureus*) e gram-negativas (*Escherichia coli*). A PAW demonstrou inibição significativa do crescimento bacteriano com 30 minutos de contato, atribuída ao ambiente ácido gerado, aos altos valores de potencial de oxidação-redução (ORP) e à elevada concentração de RONS. Em contraste, a PAS, apresentou menor eficiência devido à presença de íons Na⁺ e Cl⁻, que amorteceram a acidificação e estabilizaram o ambiente químico, limitando o impacto oxidativo sobre os microrganismos.

Além disso, o estudo com diferentes concentrações de NaCl na solução salina permitiu observar o efeito da salinidade na dinâmica da geração e estabilização de RONS. As soluções menos concentradas (0,45% e 0,9%) apresentaram resposta mais rápida à ativação, enquanto as mais concentradas (3% e 7,5%) mostraram maior resistência inicial, mas com acúmulo de RONS em níveis comparáveis após tempos mais longos. Essa relação destaca o papel modulador da salinidade na química do plasma e na eficácia antimicrobiana, indicando a possibilidade de ajustar a composição iônica para atender a diferentes demandas aplicacionais.

A eficácia limitada do plasma contra o fungo *Candida albicans*, observada tanto na PAW quanto na PAS 0,9%, reflete a robustez estrutural da parede celular fúngica e seus

mecanismos avançados de defesa antioxidante. Esses resultados sugerem a necessidade de otimização dos parâmetros de ativação ou de estratégias combinadas para melhorar a ação contra microrganismos mais resistentes.

Conclui-se que o plasma é uma ferramenta poderosa para a geração de líquidos ativados com propriedades antimicrobianas, e a escolha do líquido-alvo e de suas condições de ativação desempenha um papel fundamental no resultado final obtido. A PAW se mostrou mais eficaz devido à simplicidade de sua composição química, enquanto a PAS destacou-se por sua estabilidade e potencial de aplicação em contextos que demandam maior controle químico. Estudos futuros devem explorar a otimização das condições de ativação para maximizar a produção de RONS e superar as limitações observadas em microrganismos mais resistentes, como fungos. Essas descobertas fornecem uma base sólida para o avanço das aplicações de líquidos ativados por plasma em áreas como saúde, indústria e agricultura.

6 Trabalhos Futuros

Com base nas observações realizadas e nos resultados obtidos nesta pesquisa, as seguintes direções são propostas para estudos futuros:

- **Aplicação direta do reator Surfatron em biofilmes:** Expandir as investigações para incluir a aplicação direta do jato de plasma gerado pelo reator Surfatron sobre microrganismos testados nesta pesquisa, como *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, focando especialmente na inativação de biofilmes. Essa abordagem permitirá avaliar a eficácia do plasma em estruturas microbianas mais resistentes e de relevância clínica.
- **Ensaio microbiológico usando PAS de diferentes concentrações salinas:** Realizar testes microbiológicos utilizando solução salina ativada por plasma (PAS) com concentrações de 0,45%, 3% e 7,5%, avaliando sua eficácia contra *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* e *Candida albicans*. A análise comparativa dos efeitos antimicrobianos dessas diferentes concentrações permitirá compreender melhor a influência da salinidade na atividade biocida da PAS, contribuindo para a otimização de suas aplicações em contextos biomédicos e industriais.
- **Estudos com diferentes espécies de fungos:** Ampliar as aplicações do reator Surfatron para outros fungos, além de *Candida albicans*, explorando espécies de relevância clínica e industrial. A comparação entre os resultados obtidos para *C. albicans* e outras espécies descritas na literatura permitirá uma avaliação mais abrangente da eficácia do plasma contra microrganismos com características estruturais diversas.
- **Estudos de modelagem teórica de transferência de calor:** Realizar estudos sobre a modelagem teórica de transferência de calor do plasma para o líquido em função dos parâmetros de processo e da natureza do fluido considerando variáveis como temperatura, tempo de exposição e tipo de fluido. A análise desses fatores permitirá uma melhor compreensão dos mecanismos térmicos envolvidos.

Referências

1. Sampaio A da G, Chiappim W, Milhan NVM, Botan Neto B, Pessoa R, Koga-Ito CY. Effect of the pH on the Antibacterial Potential and Cytotoxicity of Different Plasma-Activated Liquids. *Int J Mol Sci.* 2022 Nov 1;23(22).
2. Milhan NVM, Chiappim W, Sampaio A da G, da Cruz Vegian MR, Pessoa RS, Koga-ito CY. Applications of Plasma-Activated Water in Dentistry: A Review. Vol. 23, *International Journal of Molecular Sciences.* MDPI; 2022.
3. Guo D, Liu H, Zhou L, Xie J, He C. Plasma-activated water production and its application in agriculture. Vol. 101, *Journal of the Science of Food and Agriculture.* John Wiley and Sons Ltd; 2021. p. 4891–9.
4. Kooshki S, Pareek P, Mentheour R, Janda M, Machala Z. Efficient treatment of bio-contaminated wastewater using plasma technology for its reuse in sustainable agriculture. *Environ Technol Innov.* 2023 Nov 1;32.
5. Koga-Ito CY, Kostov KG, Miranda FS, Milhan NVM, Azevedo Neto NF, Nascimento F, et al. Cold Atmospheric Plasma as a Therapeutic Tool in Medicine and Dentistry. *Plasma Chemistry and Plasma Processing.* Springer; 2023.
6. Benova E, Marinova P, Atanasova M, Petrova T. Surface-wave-sustained argon plasma kinetics from intermediate to atmospheric pressure. *J Phys D Appl Phys.* 2018 Nov 28;51(47):474004.
7. Marinova P, Benova E, Topalova Y, Todorova Y, Bogdanov T, Zhekova M, et al. Effects of Surface-Wave-Sustained Argon Plasma Torch Interaction with Liquids. *Processes.* 2023 Dec 1;11(12).
8. Benova E, Marinova P, Tafradjiiska-hadjiolova R, Sabit Z, Bakalov D, Valchev N, et al. Characteristics of 2.45 GHz Surface-Wave-Sustained Argon Discharge for Bio-Medical Applications. *Applied Sciences (Switzerland).* 2022 Feb 1;12(3).
9. Tang Q, Hu Z, Cui X, Tao Z, Tang J. A Simple and Stable Atmospheric Pressure Electrodeless Water Vapor Microwave Plasma Torch. *Applied Sciences (Switzerland).* 2022 Jul 1;12(13).
10. Tsoukou E, Bourke P, Boehm D. Temperature stability and effectiveness of plasma-activated liquids over an 18 months period. *Water (Switzerland).* 2020 Nov 1;12(11):1–18.
11. Kim S, Kim CH. Applications of plasma-activated liquid in the medical field. Vol. 9, *Biomedicines.* MDPI; 2021.

12. Miles AA, Misra SS, Irwin JO. The estimation of the bactericidal power of the blood. *J Hyg (Lond)* [Internet]. 1938 Nov;38(6):732–49. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20475467>
13. Zhao Y, Bhavya ML, Patange A, Sun DW, Tiwari BK. Plasma-activated liquids for mitigating biofilms on food and food contact surfaces. Vol. 22, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. John Wiley and Sons Inc; 2023. p. 1654–85.
14. Bogaerts A, Neyts E, Gijbels R, Van Der Mullen J. Gas discharge plasmas and their applications. Vol. 57, *Spectrochimica Acta Part B*. 2002.
15. Fridman AA, Kennedy LA. *Plasma physics and engineering*. Taylor & Francis; 2004. 853 p.
16. Fitzpatrick R. *Plasma Physics: An Introduction* [Internet]. CRC Press; 2022. Available from: <https://books.google.com.br/books?id=vS-XEAAAQBAJ>
17. Jiang B, Zheng J, Qiu S, Wu M, Zhang Q, Yan Z, et al. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. Vol. 236, *Chemical Engineering Journal*. 2014. p. 348–68.
18. Howden BP, Giulieri SG, Wong Fok Lung T, Baines SL, Sharkey LK, Lee JYH, et al. *Staphylococcus aureus* host interactions and adaptation. Vol. 21, *Nature Reviews Microbiology*. Nature Research; 2023. p. 380–95.
19. Rezaei F, Vanraes P, Nikiforov A, Morent R, De Geyter N. Applications of plasma-liquid systems: A review. Vol. 12, *Materials*. MDPI AG; 2019.
20. Conrads H, Schmidt M. *Plasma Sources Science and Technology Plasma generation and plasma sources* Related content Plasma generation and plasma sources. Vol. 9, *Plasma Sources Sci. Technol*. 2000.
21. Boulos MI, Fauchais P, Pfender E. *Thermal Plasmas: Fundamentals and applications*, Vol 1. 1994.
22. Nehra V, Kumar A, Dwivedi HK. *Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources* [Internet]. 2008 [cited 2025 Mar 25]. Available from: <https://www.cscjournals.org/library/manuscriptinfo.php?mc=IJE-12>
23. Mehmood F, Kamal T, Ashraf U. *Generation and Applications of Plasma (An Academic Review)*. 2018; Available from: www.preprints.org
24. Bruggeman PJ, Kushner MJ, Locke BR, Gardeniers JGE, Graham WG, Graves DB, et al. Plasma-liquid interactions: A review and roadmap. Vol. 25, *Plasma Sources Science and Technology*. Institute of Physics Publishing; 2016.

25. Misra NN, Schlüter O, Cullen PJ. Cold plasma in food and agriculture: Fundamentals and applications. 2016. 1–368 p.
26. Bradu C, Kutasi K, Magureanu M, Puač N, Živković S. Reactive nitrogen species in plasma-activated water: Generation, chemistry and application in agriculture. Vol. 53, *Journal of Physics D: Applied Physics*. Institute of Physics Publishing; 2020.
27. Nji E, Kazibwe J, Hambridge T, Joko CA, Larbi AA, Dampthey LAO, et al. High prevalence of antibiotic resistance in commensal *Escherichia coli* from healthy human sources in community settings. *Sci Rep*. 2021 Dec 1;11(1).
28. Bolouki N, Kuan WH, Huang YY, Hsieh JH. Characterizations of a plasma-water system generated by repetitive microsecond pulsed discharge with air, nitrogen, oxygen, and argon gases species. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021 Jul 1;11(13).
29. Miletić M, Mojsilović S, Okićorević I, Maletić D, Puač N, Lazović S, et al. Effects of non-thermal atmospheric plasma on human periodontal ligament mesenchymal stem cells. *J Phys D Appl Phys*. 2013 Aug 28;46(34).
30. Fridman A, Nester S, Kennedy LA, Saveliev A, Mutaf-Yardimci O. Gliding arc gas discharge. 1998.
31. Julák J, Hujacová A, Scholtz V, Khun J, Holada K. Contribution to the Chemistry of Plasma-Activated Water. *Plasma Physics Reports*. 2018 Jan 1;44(1):125–36.
32. Schütze A, Jeong JY, Babayan SE, Park J, Selwyn GS, Hicks RF. The Atmospheric-Pressure Plasma Jet: A Review and Comparison to Other Plasma Sources. Vol. 26, *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*. 1998.
33. Lie L. Characteristics of Gliding Arc Discharge Plasma Characteristics of Gliding Arc Discharge Plasma * [Internet]. 2006. Available from: <http://iopscience.iop.org/1009-0630/8/6/06>
34. Fridman A, Chirokov A, Gutsol A. Non-thermal atmospheric pressure discharges. In: *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005.
35. Zhou R, Zhou R, Prasad K, Fang Z, Speight R, Bazaka K, et al. Cold atmospheric plasma activated water as a prospective disinfectant: The crucial role of peroxyxynitrite. *Green Chemistry*. 2018;20(23):5276–84.
36. Moisan M, Nowakowska H. Contribution of surface-wave (SW) sustained plasma columns to the modeling of RF and microwave discharges with new insight into some of their features. A survey of other types of SW discharges. Vol. 27, *Plasma Sources Science and Technology*. Institute of Physics Publishing; 2018.

37. Bogdanov T, Tsonev I, Marinova P, Benova E, Rusanov K, Rusanova M, et al. Microwave plasma torch generated in argon for small berries surface treatment. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018 Oct 10;8(10).
38. Vasile C, Baican MC, Tibirna CM, Tuchilus C, Debarnot D, Pslaru E, et al. Microwave plasma activation of a polyvinylidene fluoride surface for protein immobilization. *J Phys D Appl Phys*. 2011 Nov 30;44(47).
39. Čechová L, Marinova P, Benova E, Topalova Y, Yotinov I, Todorova Y, et al. Plasma treatment of water and wastewater as a promising approach to promote plant growth. *J Phys D Appl Phys*. 2025 Mar 17;58(11).
40. Straňák V, Spatenka P, Tichý MT, Koller J, Kříha V, Scholtz V. Surfatron plasma-based sterilisation.
41. Miranda FS, Tavares VKF, Gomes MP, Neto NFA, Chiappim W, Petraconi G, et al. Physicochemical Characteristics and Antimicrobial Efficacy of Plasma-Activated Water Produced by an Air-Operated Coaxial Dielectric Barrier Discharge Plasma. *Water (Switzerland)*. 2023 Dec 1;15(23).
42. Wang JJ, Choi KS, Feng LH, Jukes TN, Whalley RD. Recent developments in DBD plasma flow control. Vol. 62, *Progress in Aerospace Sciences*. Elsevier Ltd; 2013. p. 52–78.
43. Kusano Y, Singh SV, Bardenshtein A, Krebs N, Rozlosnik N. Plasma surface modification of glass-fibre-reinforced polyester enhanced by ultrasonic irradiation. In: *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2010. p. 1831–9.
44. Miranda FS, Tavares VKF, Silva DM, Milhan NVM, Neto NFA, Gomes MP, et al. Influence of Gas Type on Reactive Species Formation, Antimicrobial Activity, and Cytotoxicity of Plasma-Activated Water Produced in a Coaxial DBD Reactor. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2024 Jul 1;44(4):1713–33.
45. Kostov KG, Rocha V, Koga-Ito CY, Matos BM, Algatti MA, Honda RY, et al. Bacterial sterilization by a dielectric barrier discharge (DBD) in air. *Surf Coat Technol*. 2010 Jun;204(18–19):2954–9.
46. Lima LG, Marcondes MS, Azevedo Neto NF, Queiroz RC, Tada DB, Junior CA, et al. Comparative effects of direct plasma treatment and plasma-activated media on B16F10 cancer cells using a multipoint surface dielectric barrier discharge system. *J Phys D Appl Phys*. 2025 Mar 31;58(13).
47. Czemichowski A. Gliding arc. Applications to engineering and environment control. Vol. 66, *Pure & Appl. Chern*. 1994.

48. Rabinovich A, Nirenberg G, Kocagoz S, Surace M, Sales C, Fridman A. Scaling Up of Non-Thermal Gliding Arc Plasma Systems for Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2022 Jan 1;42(1):35–50.
49. Dorosz A, Penconek A, Moskal A. Cold Plasma Gliding Arc Reactor System for Nanoparticles' Removal from Diesel Cars' Exhaust Gases. *Processes*. 2024 Aug 29;12(9):1841.
50. Zhu M, Wang Z, Chen J, Liu L, Xi W, Zhang F, et al. Gliding arc discharge used for water activation: the production mechanism of aqueous NO and its role in sterilization. *J Phys D Appl Phys*. 2022 Dec 29;56(3).
51. Chiappim W, de Paula Bernardes V, Almeida NA, Pereira VL, Bragotto APA, Cerqueira MBR, et al. Effect of Gliding Arc Plasma Jet on the Mycobiota and Deoxynivalenol Levels in Naturally Contaminated Barley Grains. *Int J Environ Res Public Health*. 2023 Mar 1;20(6).
52. Thirumdas R, Kothakota A, Annapure U, Siliveru K, Blundell R, Gatt R, et al. Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. Vol. 77, *Trends in Food Science and Technology*. Elsevier Ltd; 2018. p. 21–31.
53. Khlyustova A, Labay C, Machala Z, Ginebra MP, Canal C. Important parameters in plasma jets for the production of RONS in liquids for plasma medicine: A brief review. Vol. 13, *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. Higher Education Press; 2019. p. 238–52.
54. Tan J, Karwe M V. Inactivation and removal of *Enterobacter aerogenes* biofilm in a model piping system using plasma-activated water (PAW). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021 May 1;69.
55. Silsby JA, Simon S, Walsh JL, Hasan MI. The Influence of Gas–Liquid Interfacial Transport Theory on Numerical Modelling of Plasma Activation of Water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2021 Sep 1;41(5):1363–80.
56. Chen Z, Cheng X, Lin L, Keidar M. To cite this article: Zhitong Chen et al. Vol. 50, *J. Phys. D: Appl. Phys*. 2017.
57. Chiappim W, Sampaio A da G, Miranda F, Fraga M, Petraconi G, da Silva Sobrinho A, et al. Antimicrobial effect of plasma-activated tap water on *staphylococcus aureus*, *escherichia coli*, and *Candida albicans*. *Water (Switzerland)*. 2021 Jun 1;13(11).

58. Yang L, Niyazi G, Qi Y, Yao Z, Huang L, Wang Z, et al. Plasma-activated saline promotes antibiotic treatment of systemic methicillin-resistant staphylococcus aureus infection. *Antibiotics*. 2021;10(8).
59. Wang Z, Qi Y, Guo L, Huang L, Yao Z, Yang L, et al. The bactericidal effects of plasma-activated saline prepared by the combination of surface discharge plasma and plasma jet. *J Phys D Appl Phys*. 2021 Sep 1;54(38).
60. Tsoukou E, Bourke P, Boehm D. Efficacy of plasma activated saline in a co-culture infection control model. *Sci Rep*. 2022 Dec 1;12(1).
61. Mateu-Sanz M, Tornín J, Brulin B, Khlyustova A, Ginebra MP, Layrolle P, et al. Cold plasma-treated ringer's saline: A weapon to target osteosarcoma. *Cancers (Basel)*. 2020 Jan 1;12(1).
62. Qi M, Xu D, Wang S, Li B, Peng S, Li Q, et al. In Vivo Metabolic Analysis of the Anticancer Effects of Plasma-Activated Saline in Three Tumor Animal Models. *Biomedicines*. 2022 Mar 1;10(3).
63. Liu ZC, Guo L, Liu DX, Rong MZ, Chen HL, Kong MG. Chemical Kinetics and Reactive Species in Normal Saline Activated by a Surface Air Discharge. *Plasma Processes and Polymers*. 2017 Apr 1;14(4–5).
64. Tortora GJ, Funk BR, Case C. *Anatomia Funcional de Células Procarióticas e Eucarióticas*. 12th ed. 2017. 72–106 p.
65. Moreira JLB, Carvalho CBM de, Frota CC. *Visualização bacteriana e colorações*. Fortaleza; 2015.
66. Lakhundi S, Zhang K. Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus: Molecular Characterization, Evolution, and Epidemiology. Vol. 31, *Clinical microbiology reviews*. NLM (Medline); 2018.
67. Cheung GYC, Bae JS, Otto M. Pathogenicity and virulence of Staphylococcus aureus. Vol. 12, *Virulence*. Bellwether Publishing, Ltd.; 2021. p. 547–69.
68. Luis dos Santos A, Oliveira Santos D, Carlos de Freitas C, Leal Alves Ferreira B, Afonso IF, Rangel Rodrigues C, et al. Staphylococcus aureus: visitando uma cepa de importância hospitalar Staphylococcus aureus: visiting a strain of clinical importance.
69. Rita Costa A, Batistão DWF, Ribas RM, Sousa AM, Pereira MO, Botelho CM. *Staphylococcus aureus virulence factors and disease*. 2013.
70. Zecconi A, Scali F. Staphylococcus aureus virulence factors in evasion from innate immune defenses in human and animal diseases. Vol. 150, *Immunology Letters*. 2013. p. 12–22.

71. Bien J, Sokolova O, Bozko P. Characterization of Virulence Factors of *Staphylococcus aureus* : Novel Function of Known Virulence Factors That Are Implicated in Activation of Airway Epithelial Proinflammatory Response . *J Pathog*. 2011;2011:1–13.
72. Guo Y, Song G, Sun M, Wang J, Wang Y. Prevalence and Therapies of Antibiotic-Resistance in *Staphylococcus aureus*. Vol. 10, *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. Frontiers Media S.A.; 2020.
73. Luna CM, Rodríguez-Noriega E, Bavestrello L, Gotuzzo E. Treatment of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in Latin America. *Brazilian Journal of Infectious Diseases* [Internet]. 2010 Dec;14:119–27. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-86702010000800007&lng=en&nrm=iso&tlng=en
74. Clements A, Young JC, Constantinou N, Frankel G. Infection strategies of enteric pathogenic *Escherichia coli*. Vol. 3, *Gut Microbes*. 2012. p. 71–87.
75. Talapko J, Juzbašić M, Matijević T, Pustijanac E, Bekić S, Kotris I, et al. *Candida albicans*-the virulence factors and clinical manifestations of infection. *Journal of Fungi*. 2021 Feb 1;7(2):1–19.
76. Rodrigo L. E. *E. Coli* Infections: Importance of Early Diagnosis and Efficient Treatment [Internet]. IntechOpen; 2020. Available from: <https://books.google.com.br/books?id=VREKzgEACAAJ>
77. Dunne KA, Chaudhuri RR, Rossiter AE, Beriotto I, Browning DF, Squire D, et al. Sequencing a piece of history: complete genome sequence of the original *Escherichia coli* strain. 2017; Available from: <https://figshare.com/>
78. Nikaido H. Multidrug resistance in bacteria. Vol. 78, *Annual Review of Biochemistry*. 2009. p. 119–46.
79. Alves Junior C. Plasma frio atmosférico – novas oportunidades de pesquisa numa plataforma versátil e portadora de futuro. Vol. 25, *Revista Materia*. Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2020. p. 1–7.
80. Noble SM, Gianetti BA, Witchley JN. *Candida albicans* cell-type switching and functional plasticity in the mammalian host. Vol. 15, *Nature Reviews Microbiology*. Nature Publishing Group; 2017. p. 96–108.
81. Morad HOJ, Wild AM, Wiehr S, Davies G, Maurer A, Pichler BJ, et al. pre-clinical imaging of invasive candidiasis using immunoPET/MR. *Front Microbiol*. 2018 Aug 23;9(AUG).

82. Pohl CH. Recent Advances and Opportunities in the Study of *Candida albicans* Polymicrobial Biofilms. Vol. 12, *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. Frontiers Media S.A.; 2022.
83. Fisher MC, Denning DW. The WHO fungal priority pathogens list as a game-changer. Vol. 21, *Nature Reviews Microbiology*. Nature Research; 2023. p. 211–2.
84. Singh SD, Robbins N, Zaas AK, Schell WA, Perfect JR, Cowen LE. Hsp90 governs echinocandin resistance in the pathogenic yeast *Candida albicans* via calcineurin. *PLoS Pathog*. 2009 Jul;5(7).
85. Cha S, Park YS. Plasma in dentistry. *Clin Plasma Med*. 2014;2(1):4–10.
86. Silva WA, Araújo Costa DA. COMPARAÇÃO ENTRE SOLUÇÃO SALINA 0,9% E CRISTALOIDES BALANCEADOS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. *JOURNAL OF SURGICAL AND CLINICAL RESEARCH*. 2020 Dec 18;11(2):113–27.
87. Liu DT, Silverstein DC. Crystalloids, colloids, and hemoglobin-based oxygen-carrying solutions. In: *Small Animal Critical Care Medicine, Second Edition*. Elsevier Health Sciences; 2014. p. 311–6.
88. Velasco IT, Pontieri V, Rocha M, Silva E, Lopes U. Hyperosmotic NaCl and severe hemorrhagic shock [Internet]. 1980. Available from: www.physiology.org/journal/ajpheart
89. Rocha Silva M, to Luiz Poli de Figueiredo dedicated. Hypertonic saline for treatment of shock: have we looked for everything? 2014.
90. info, huksefluxcom. FHF03 foil heat flux sensor user manual [Internet]. Available from: www.hukseflux.com
91. Hnilica J, Kudrle V, Potocnakova L. Surface treatment by atmospheric-pressure surfatron jet. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2012;40(11 PART1):2925–30.
92. Alemayehu N. Assessment of Livestock Environment Interactions under crop-livestock production systems of Central Ethiopian Highlands. 2013; Available from: <https://www.researchgate.net/publication/301889391>
93. Wong KS, Chew NSL, Low M, Tan MK. Plasma-Activated Water: Physicochemical Properties, Generation Techniques, and Applications. Vol. 11, *Processes*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2023.
94. 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. *J Hazard Mater*. 2015 Dec;300:643–51.

95. Nowruzi B, Beiranvand H, Aghdam FM, Barandak R. The effect of plasma activated water on antimicrobial activity of silver nanoparticles biosynthesized by cyanobacterium *Alborzia kermanshahica*. *BMC Biotechnol.* 2024 Dec 1;24(1):75.
96. Taheri D, Hajisharifi K, Heydari E, MirzaHosseini FK, Mehdian H, Robert E. Realtime RONS monitoring of cold plasma-activated aqueous media based on time-resolved phosphorescence spectroscopy. *Sci Rep.* 2024 Dec 1;14(1):22403.
97. Zhao YM, Ojha S, Burgess CM, Sun DW, Tiwari BK. Inactivation efficacy of plasma-activated water: influence of plasma treatment time, exposure time and bacterial species. *Int J Food Sci Technol.* 2021 Feb 1;56(2):721–32.
98. Santiago PAL, Santiago SRS da S, Gomes AM dos S, Pereira KD do ES, Barroso J da C, Lima YVV, et al. AVALIAÇÃO ENZIMÁTICA E MORFOLÓGICA DE FUNGOS ASSOCIADOS A UM BASIDIOMICETO DA REGIÃO AMAZÔNICA / FUNGI'S ENZYMATIC AND MORPHORLOGICAL EVALUATION ASSOCIATED WITH A BASIDIOMYCETE FROM THE AMAZONIC REGION. *Brazilian Journal of Development.* 2021;7(1):9831–50.
99. Oehmigen K, Winter J, Hähnel M, Wilke C, Brandenburg R, Weltmann KD, et al. Estimation of possible mechanisms of *Escherichia coli* inactivation by plasma treated sodium chloride solution. *Plasma Processes and Polymers.* 2011 Oct 21;8(10):904–13.
100. Mahmoodi M, Pishbin E. Ozone-based advanced oxidation processes in water treatment: recent advances, challenges, and perspective. *Environmental Science and Pollution Research.* Springer; 2025.
101. Dai M, Niu Q, Wu S, Lin Y, Biswas JK, Yang C. Hydroxyl radicals in ozone-based advanced oxidation of organic contaminants: A review. *Environmental Chemistry Letters.* Springer Nature; 2024.

Apêndice A – Dados Resultantes dos Experimentos Envolvendo *Candida albicans* com PAW

Teste suspensão com <i>Candida albicans</i> (SC 5314)					
teste	Grupos testados	Leitura/diluição	contagem de colônias		
			placa 1	placa 2	placa 3
1	DI 10min	10 ²	22	23	38
	DI 30min	10 ²	26	19	20
	DI/A 10min/10min	10 ²	15	27	26
	DI/A 10min/30min	10 ²	21	26	30
	DI/A 40min/10min	10 ²	23	27	31
	DI/A 40min/30min	10 ²	28	16	27
2	DI 10min	10 ²	30	26	26
	DI 30min	10 ²	26	25	19
	DI/A 10min/10min	10 ²	24	37	26
	DI/A 10min/30min	10 ²	16	22	29
	DI/A 40min/10min	10 ²	28	21	24
	DI/A 40min/30min	10 ²	27	23	25
3	DI 10min	10 ²	19	19	25
	DI 30min	10 ²	26	20	31
	DI/A 10min/10min	10 ²	28	26	22
	DI/A 10min/30min	10 ²	24	20	27
	DI/A 40min/10min	10 ²	24	25	24
	DI/A 40min/30min	10 ²	15	12	22

**Apêndice B- Dados Resultantes dos Experimentos Envolvendo
Staphylococcus aureus com PAW**

Teste suspensão com <i>S.aureus</i>					
Teste	Grupos testados	Leitura/diluição	contagem de colônias		
			placa 1	placa 2	placa 3
1	DI 10min	10^4	20	10	16
	DI 30min	10^4	18	24	19
	DI/A 10min/10min	10^4	21	31	27
	DI/A 10min/30min	10^4	11	12	18
	DI/A 40min/10min	10^4	13	21	25
	DI/A 40min/30min	10^2	5	2	1
2	DI 10min	10^4	13	18	18
	DI 30min	10^4	18	16	24
	DI/A 10min/10min	10^4	11	15	20
	DI/A 10min/30min	10^4	28	5	14
	DI/A 40min/10min	10^4	7	11	12
	DI/A 40min/30min	10^2	2	1	0
3	DI 10min	10^4	17	20	30
	DI 30min	10^4	18	14	19
	DI/A 10min/10min	10^4	16	20	6
	DI/A 10min/30min	10^4	23	13	15
	DI/A 40min/10min	10^3	26	22	38
	DI/A 40min/30min	10^3	2	3	4

Apêndice C- Dados Resultantes dos Experimentos Envolvendo *Escherichia coli* com PAW

Teste suspensão com <i>E.coli</i>					
Teste	Grupos testados	Leitura/diluição	contagem de colônias		
			placa 1	placa 2	placa 3
1	DI 10min	10^4	10	19	7
	DI 30min	10^4	7	6	17
	DI/A 10min/10min	10^4	11	14	13
	DI/A 10min/30min	10^4	14	6	2
	DI/A 40min/10min	10^4	1	2	7
	DI/A 40min/30min	10^3	1	4	4
2	DI 10min	10^4	7	15	11
	DI 30min	10^4	11	13	6
	DI/A 10min/10min	10^4	18	6	11
	DI/A 10min/30min	10^4	7	13	10
	DI/A 40min/10min	10^4	2	7	9
	DI/A 40min/30min	10^3	2	2	6
3	DI 10min	10^4	9	10	8
	DI 30min	10^4	8	7	9
	DI/A 10min/10min	10^4	6	5	10
	DI/A 10min/30min	10^4	5	9	3
	DI/A 40min/10min	10^4	0	1	2
	DI/A 40min/30min	10^3	7	15	19

Apêndice D - Dados Resultantes dos Experimentos Envolvendo *Candida albicans* com PAS

Teste suspensão com <i>Candida albicans</i> (SC 5314)					
teste	Grupos testados	Leitura/diluição	contagem de colônias		
			placa 1	placa 2	placa 3
1	Controle SA 10 min	10^3	2	4	4
	Controle SA 30 min	10^3	3	6	2
	S/A 10min/10min	10^3	3	2	4
	S/A 10min/30min	10^3	3	3	2
	S/A 40min/10min	10^3	4	4	2
	S/A 40min/30min	10^3	1	5	2
2	Controle SA 10 min	10^3	3	7	4
	Controle SA 30 min	10^3	2	5	3
	S/A 10min/10min	10^3	3	4	3
	S/A 10min/30min	10^3	3	1	7
	S/A 40min/10min	10^3	4	5	6
	S/A 40min/30min	10^3	3	2	4
3	Controle SA 10 min	10^3	2	5	6
	Controle SA 30 min	10^3	2	3	5
	S/A 10min/10min	10^3	2	5	3
	S/A 10min/30min	10^3	5	2	1
	S/A 40min/10min	10^3	3	1	4
	S/A 40min/30min	10^3	2	3	2

**Apêndice E - Dados Resultantes dos Experimentos Envolvendo
Staphylococcus aureus com PAS**

Teste suspensão com <i>S.aureus</i>					
Data do teste	Grupos testados	Leitura/diluição	contagem de colônias		
			placa 1	placa 2	placa 3
1	Controle SA 10 min	10^5	6	9	5
	Controle SA 30 min	10^5	8	2	4
	S/A 10min/10min	10^5	4	10	6
	S/A 10min/30min	10^5	9	4	10
	S/A 40min/10min	10^5	4	1	8
	S/A 40min/30min	10^5	3	4	1
2	Controle SA 10 min	10^5	3	8	13
	Controle SA 30 min	10^5	8	9	9
	S/A 10min/10min	10^5	10	7	13
	S/A 10min/30min	10^5	11	12	9
	S/A 40min/10min	10^5	3	7	8
	S/A 40min/30min	10^5	7	12	9
3	Controle SA 10 min	10^5	10	8	7
	Controle SA 30 min	10^5	10	7	16
	S/A 10min/10min	10^5	11	5	2
	S/A 10min/30min	10^5	6	1	7
	S/A 40min/10min	10^5	3	12	10
	S/A 40min/30min	10^5	3	8	2

Apêndice F - Dados Resultantes dos Experimentos Envolvendo *Escherichia coli* com PAS

Teste suspensão com <i>E.coli</i>					
Teste	Grupos testados	Leitura/diluição	contagem de colônias		
			placa 1	placa 2	placa 3
1	Controle SA 10 min	10 ⁴	14	9	9
	Controle SA 30 min	10 ⁴	15	16	11
	S/A 10min/10min	10 ⁴	13	16	8
	S/A 10min/30min	10 ⁴	12	8	13
	S/A 40min/10min	10 ⁴	10	9	11
	S/A 40min/30min	10 ⁴	7	12	11
2	Controle SA 10 min	10 ⁴	11	14	13
	Controle SA 30 min	10 ⁴	10	16	17
	S/A 10min/10min	10 ⁴	10	7	12
	S/A 10min/30min	10 ⁴	8	14	9
	S/A 40min/10min	10 ⁴	10	13	11
	S/A 40min/30min	10 ⁴	4	10	11
3	Controle SA 10 min	10 ⁴	11	6	4
	Controle SA 30 min	10 ⁴	13	8	8
	S/A 10min/10min	10 ⁴	10	6	10
	S/A 10min/30min	10 ⁴	10	8	6
	S/A 40min/10min	10 ⁴	9	9	9
	S/A 40min/30min	10 ⁴	6	12	6

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO DM	2. DATA 31 de março de 2025	3. REGISTRO Nº DCTA/ITA/DM-014/2025	4. Nº DE PÁGINAS 100
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Caracterização de Líquidos Ativados por Plasma Gerado pelo Reator Surfatron: Avaliação Físico-Química e Aplicações Antimicrobianas.			
6. AUTOR(ES): Michaela Shiotani Marcondes			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Água Ativada por Plasma 2. Solução Salina Ativada por Plasma. 3. Plasma frio atmosférico (CAP)			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Plamas (Física); Plasmas frios; Processamento de materiais a plasma; Reatores; Plasma de oxigênio; Pressão atmosférica; Física de plasmas; Físico-Química; Física.			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Física. Área de Física de Plasmas. Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sávio Pessoa; coorientador: Prof. Dr. Felipe de Souza Miranda. Defesa em 24/03/2025. Publicada em 2025.			
11. RESUMO: Este estudo aborda sobre a produção e aplicação de Líquidos Ativados por Plasma (PALs) para inativação microbiana, destacando a utilização de plasma frio como uma tecnologia emergente na desinfecção e modificação de superfícies. A natureza não térmica do plasma e a ausência de agentes químicos agressivos ao meio ambiente o posicionam como uma alternativa ecologicamente viável. A investigação foca na caracterização de um sistema de micro-ondas para a geração de um jato de plasma não térmico à pressão atmosférica, bem como no tratamento de diferentes líquidos, como água deionizada e solução salina, com o objetivo de produzir PALs. O estudo avalia a atividade antimicrobiana dos PALs contra bactérias como <i>Staphylococcus aureus</i> e <i>Escherichia coli</i> , e o fungo <i>Candida albicans</i> . Os resultados indicaram que a ativação por plasma provoca alterações significativas nos parâmetros físico-químicos dos líquidos tratados, incluindo redução no pH e aumento na condutividade, devido à formação acentuada de espécies reativas de oxigênio nitrogênio. Essas mudanças conferem aos PALs uma composição química distinta, potencializando sua ação antimicrobiana. Notavelmente, o tratamento com plasma resulta na acidificação dos líquidos, bem como um aumento no Total de Sólidos Dissolvidas (TDS) e na salinidade, indicando a formação de novos sais e compostos. As análises incluem medições dos parâmetros físico-químicos, análises químicas por espectrofotometria UV-Vis. A caracterização do plasma foi realizada por meio de espectroscopia óptica de emissão. A variação da temperatura dos líquidos, em resposta ao tratamento com plasma, evidenciou um processo exotérmico, sugerindo que a absorção de energia térmica do plasma pode contribuir para alterações na composição dos PALs. Os ensaios microbiológicos revelaram uma atividade antimicrobiana significativa dos PALs, com eficácia aumentada para tempos de ativação mais longos. Os resultados mostram que a água deionizada ativada mostrou-se mais eficaz do que a solução salina, sugerindo que a composição inicial do líquido influencia a eficácia antimicrobiana dos PALs. O presente estudo destaca o potencial dos PALs como agentes antimicrobianos eficazes, abrindo novas perspectivas para aplicações práticas em desinfecção e esterilização, bem como contribui para o entendimento dos mecanismos de ativação de líquidos por plasmas e de sua influência nas propriedades de inativação de microrganismos.			
12. GRAU DE SIGILO: <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO			