



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS- DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBINETAL



Karoline Martins Teixeira

Avaliação da Variação Temporal do pH em Matriz Aquosa
Assistida por Plasma Não- Térmico

Ouro Preto
2026

Karoline Martins Teixeira

Avaliação da Variação Temporal do pH em Matriz Aquosa
Assistida por Plasma Não- Térmico

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental de Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Dra. Marina de Medeiros Machado

Coorientadora: Ma. Glívia Braga Faria

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T266a Teixeira, Karoline Martins.

Avaliação da variação temporal do ph em matriz aquosa assistida por plasma não-térmico. [manuscrito] / Karoline Martins Teixeira. - 2026.
48 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Marina Machado.

Coorientadora: Ma. Glívia Faria.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Recuperação e Remediação Ambiental. 2. Plasma - gases ionizados.
3. Água - Qualidade. I. Machado, Marina. II. Faria, Glívia. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 504:004

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - CRB6/2322



FOLHA DE APROVAÇÃO

Karoline Martins Teixeira

Avaliação da Variação Temporal do pH em Matriz Aquosa Assistida por Plasma Não- Térmico

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental

Aprovada em 02 de março de 2026

Membros da banca

Profa. Dra. Marina de Medeiros Machado - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Msc. Glívia Faria Braga - Coorientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Mateus de Souza Amaral - Universidade Federal de Ouro Preto
Msc. Yan Rocha Coêlho - Universidade Federal de Ouro Preto

Marina de Medeiros Machado, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 30/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Marina de Medeiros Machado, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/03/2026, às 17:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1083101** e o código CRC **ED62C73D**.

*Dedico este trabalho a todas as mulheres cientistas,
presentes e passadas. Que ousaram ocupar laboratórios e
transformaram a curiosidade em combustível
para mudar o mundo. Que possamos honrar seu legado e
pavimentar o caminho para as que virão.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e à Fundação Gorceix, pelo ensino público, gratuito e de qualidade, e por todas as oportunidades ao longo da minha formação acadêmica. Levo comigo não apenas o conhecimento técnico, mas experiências que vão muito além.

Aos meus amigos e professores do curso de Engenharia Ambiental, que compartilharam comigo conhecimentos, desafios e conquistas ao longo desses anos. Em especial, ao PET Ambiental, à Renovar Jr e ao Laboratório de Tecnologias Ambientais, espaços que foram fundamentais para minha trajetória na universidade. A troca de ideias, o trabalho em equipe e os desafios superados ficarão para sempre.

À professora Marina e à Glívia, minha gratidão especial pela orientação, paciência e por todo ensinamento transmitido ao longo deste trabalho. Agradeço por cada conversa, cada direcionamento e por acreditarem no meu potencial. Ao Yan, que contribuiu de forma importante para esta pesquisa, meu muito obrigada pelo apoio e disponibilidade.

Aos meus pais, por todo amor, apoio incondicional e por nunca medirem esforços para que eu pudesse realizar meus sonhos. A minha irmã e meu irmão, pelo companheirismo, torcida e por fazerem minha caminhada mais leve. Saber que tenho vocês ao meu lado faz toda a diferença.

À Eliza Maria, Larissa Magalhães, Carolina Moreira, Yasmin Martins e Caroline Oliveira, que de diferentes formas estiveram comigo, seja na parceria dos dias de graduação, nos estudos e desabafos, seja na torcida e apoio que vieram de perto ou de longe, minha gratidão por tornarem essa jornada inesquecível. A amizade de vocês foi essencial.

A todos que, de alguma forma contribuíram, seja com uma palavra de incentivo, um gesto de carinho ou um conhecimento compartilhado, meu muito obrigada!

RESUMO

A crescente demanda por água potável de qualidade e as limitações dos métodos convencionais de desinfecção, incluindo a formação de subprodutos potencialmente tóxicos, motivaram este estudo sobre tecnologias alternativas. O objetivo foi avaliar a variação temporal do pH de um meio aquoso submetido ao tratamento com plasma não-térmico (PNT), investigando a influência do tempo de exposição (5 e 10 minutos; ponto central em 7,5 minutos) e da tensão elétrica aplicada (8,5 e 17 kV; ponto central em 12,75 kV) sobre a magnitude da acidificação e sua estabilidade. Utilizou-se um delineamento fatorial completo 2^2 com pontos centrais, totalizando 21 ensaios com água destilada. O pH foi monitorado imediatamente após o tratamento, ao longo de 30 minutos e após 24 horas. Os resultados demonstraram que a acidificação ocorre majoritariamente de forma imediata, com a tensão elétrica sendo o fator estatisticamente significativo ($p < 0,05$) sobre a redução máxima de pH ($\Delta\text{pH}_{\text{max}}$), enquanto o tempo de exposição não apresentou efeito significativo na faixa avaliada. A maior redução foi observada condição de maior tensão, com ($\Delta\text{pH}_{\text{max}}$ de $4,05 \pm 0,78$) unidades de pH na (5 minutos e 100% tensão). O efeito mostrou-se estável, com retenção de 80-90% da acidificação após 24 horas na maioria das condições experimentais. Conclui-se que o PNT promove uma acidificação imediata e persistente, sendo o nível de tensão o principal parâmetro operacional para controle do pH, o que fornece subsídios para a aplicação da tecnologia em processos de tratamento e desinfecção de água.

Palavras-chaves: Espécies reativas, pH, Plasma não-térmico, Qualidade da água, Tratamento de água.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF pH TEMPORAL VARIATION IN NON-PLASMA ASSISTED AQUOSA MATRIX THERMAL

The growing demand for quality drinking water and the limitations of conventional disinfection methods, including the formation of potentially toxic by-products, motivated this study on alternative technologies. The objective was to evaluate the temporal pH variation of an aqueous medium submitted to treatment with non-thermal plasma (NTP), investigating the influence of exposure time (5 and 10 minutes; central point in 7.5 minutes) and electrical voltage applied (8.5 and 17 kV; central point in 12.75 kV) on the magnitude of acidification and its stability. A complete factorial design 2² with central points was used, totaling 21 tests with distilled water. The pH was monitored immediately after treatment, over 30 minutes and after 24 hours. The results showed that acidification occurs mostly immediately, with electrical voltage being the statistically significant factor ($p < 0.05$) on the maximum pH reduction ($\Delta\text{pH}_{\text{max}}$), while exposure time did not have a significant effect on the range evaluated. The greatest reduction was observed higher voltage condition, with ($\Delta\text{pH}_{\text{max}}$ of 4.05 ± 0.78) pH units at (5 minutes and 100% voltage). The effect was stable, with retention of 80-90% of acidification after 24 hours in most experimental conditions. It is concluded that the NTP promotes immediate and persistent acidification, and the stress level is the main operational parameter for pH control, which provides subsidies for the application of technology in water treatment and disinfection processes.

Keywords: Reactive species, pH, Non-thermal Plasma, Water Quality, Water Treatment.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Sistema de Plasma não-térmico	21
Figura 2 - Variação imediata do pH (Δ pH) após o tratamento por plasma atmosférico nas diferentes combinações de tempo e tensão elétrica	24
Figura 3 - Dinâmica temporal do Δ pH nos primeiros 30 minutos após o tratamento por plasma não térmico sob diferentes combinações de tempo e tensão (5 min–8,5 kV; 5 min–17 kV; 7,5 min–12,75 kV; 10 min–8,5 kV; 10 min–17 kV)	25
Figura 4 - Retenção relativa da acidificação ($\Delta\Delta$ pH) ao longo do tempo para as diferentes condições experimentais.....	27
Figura 5 - Efeitos principais dos fatores A e B sobre o Δ pHmax.....	29
Figura 6 - Interação entre os fatores A e B sobre o Δ pHmax, evidenciando variação não paralela das linhas e dependência entre os fatores no intervalo experimental avaliado.	30

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Média e Desvio Padrão do pH Inicial e Temperatura.	23
Tabela 2 - Parâmetros estimados do modelo de regressão linear para o $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$	31

LISTA DE SIGLAS

ANOVA - Análise de Variância

APPJ - Jatos de Plasma à Pressão Atmosférica

DBD - Descargas por Barreira Dielétrica

DDA - Doenças Diarreicas Agudas

DOE - Delineamento de Experimentos

DTHA - Doenças de Transmissão Hídrica e Alimentar

EEDF - Função de Distribuição de Energia Eletrônica

ETAs - Estações de Tratamento de Água

GLM - Modelo Linear Generalizado

ICP-MS - Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado

OMS - Organização Mundial da Saúde

ORP - Potencial de Oxirredução

PAW - Água Ativada por Plasma

PNT - Plasma Não-Térmico

POAs - Processos Oxidativos Avançados

RNS - Espécies Reativas de Nitrogênio

RONs - Espécies Reativas de Oxigênio e Nitrogênio

ROS - Espécies Reativas de Oxigênio

SAA - Sistemas de Abastecimento de Água

SPDs - Subprodutos da Desinfecção

UV - Radiação Ultravioleta

SUMÁRIO

1. ESTRUTURA DO DOCUMENTO	1
CAPÍTULO 1	2
2. INTRODUÇÃO	2
3. OBJETIVOS	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4.1. Qualidade da Água e Desafios no Tratamento	6
4.2. Métodos Tradicionais e Avançados	8
4.3. Parâmetros de Qualidade de água	10
4.4. Plasma não-térmico.....	12
4.4.1. Tratamento de Água por Plasma Não- Térmico.....	13
4.4.2. Mecanismos Físico-Químicos.....	15
4.5. Importância do pH como Parâmetro Físico-Químico	17
4.5.1. Efeito do Plasma no pH e nas Propriedades Físico-Químicas.....	18
CAPÍTULO 2	19
Variação temporal do pH na água sob aplicação do plasma não térmico Erro! Indicador não definido.	
Resumo.....	19
Keywords	19
1. INTRODUÇÃO.....	19
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
2.1. Delineamento experimental.....	20
2.2. Tratamento da água por plasma não térmico.....	21
2.2.1. Sistema de plasma.....	21
2.3. Matriz experimental.....	22
2.4. Medição de pH.....	22
2.5. Tratamento e análise dos dados.....	22
3. RESULTADOS.....	22
3.1. Condição inicial do sistema.....	22
3.2. Variação imediata do pH.....	23

3.3.Dinâmica temporal nos primeiros 30 minutos.....	25
3.4.Estabilidade após 24 horas.....	26
3.5.Influência dos fatores operacionais.....	28
3.5.1.Estimativa dos efeitos principais.....	28
3.5.2.Interação entre os fatores A e B sobre ΔpH_{max}.....	30
4.DISSCUSSÃO.....	32
5. CONCLUSÃO.....	33
REFERÊNCIAS	35
ANEXO.....	48

1. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O trabalho de conclusão de curso (TCC) é dividido em dois capítulos, sendo que o capítulo 2 é apresentado em forma de artigo científico.

▪ **CAPÍTULO 1**

Este capítulo descreve a estrutura do TCC; descreve os objetivos estabelecidos; apresenta a problemática, a justificativa, as premissas e as hipóteses do estudo.

▪ **CAPÍTULO 2- Comportamento temporal do pH durante o tratamento da água com plasma não-térmico.**

Este capítulo tem como objetivo avaliar a variação temporal do pH de um meio aquoso submetido ao plasma não-térmico, considerando diferentes tempos de exposição e tensões elétricas aplicadas. São apresentados os fundamentos teóricos, a seleção dos materiais, a metodologia experimental e os parâmetros avaliados. O texto encontra-se preparado para submissão, contudo, aguardamos as considerações da banca examinadora para realizar os ajustes finais necessários antes do envio.

CAPÍTULO 1

2. INTRODUÇÃO

O tratamento de água é essencial para proteger a saúde pública e o meio ambiente, especialmente diante do crescimento populacional e das crescentes pressões sobre os recursos hídricos. Para o abastecimento humano, produção de alimentos e várias atividades econômicas e industriais, é fundamental ter água de boa qualidade disponível. No entanto, o crescimento das cidades, o aumento das atividades agrícolas e industriais e a expansão das áreas urbanas têm contribuído para o aumento da quantidade de poluentes despejados nos corpos hídricos, o que compromete a qualidade das fontes de abastecimento (GOONETILLEKE & LAMPARD, 2019). Nesse cenário, os sistemas de tratamento de água são fundamentais para garantir a segurança sanitária, pois removem contaminantes físicos, químicos e biológicos antes que a água seja distribuída para consumo humano (MOUSSA *et al.*, 2023).

O tratamento de água é tradicionalmente realizado por meio de uma série de etapas consolidadas, incluindo coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. Esses processos têm se mostrado eficazes na eliminação de partículas suspensas, matéria orgânica natural e microrganismos patogênicos, sendo amplamente utilizados em estações de tratamento de água em todo o mundo (RAMTEKE; RATHOD, 2025). Entretanto, nas últimas décadas, alterações na composição das águas naturais têm exposto as limitações significativas desses métodos convencionais. Dentre os principais desafios, está a presença de contaminantes emergentes, como resíduos farmacêuticos, compostos industriais persistentes, pesticidas e produtos de higiene pessoal, que geralmente não são totalmente eliminados pelos métodos convencionais (REDDY *et al.*, 2017).

Ademais, certos métodos comumente empregados, especialmente os que se baseiam na desinfecção química, podem gerar subprodutos que são potencialmente tóxicos. A interação entre agentes desinfetantes e matéria orgânica dissolvida pode resultar na formação de compostos indesejáveis, como trihalometanos e ácidos haloacéticos, que estão ligados a riscos à saúde e a efeitos negativos no meio ambiente (VENKATAPATIA *et al.*, 2005). Com tais limitações, aumenta o interesse por tecnologias que podem complementar ou substituir etapas tradicionais do tratamento, proporcionando maior eficácia na remoção de contaminantes e aprimorando o controle dos parâmetros físico-químicos da água tratada. Nesse contexto, as

tecnologias de tratamento avançadas se sobressaem pela sua eficácia superior na eliminação de micropoluentes e patógenos, além de possibilitar um controle mais rigoroso dos parâmetros de qualidade. Esses aspectos são fundamentais para assegurar a segurança do abastecimento e o potencial de reuso da água em diversas aplicações (ÖZGÜR; KAPLAN-BEKAROGLU, 2022).

O plasma não térmico tem atraído cada vez mais interesse da comunidade científica, entre as tecnologias emergentes estudadas para o tratamento de água (MURUGESAN *et al.*, 2020). Também chamado de plasma frio, é um estado parcialmente ionizado da matéria, marcado pela presença de elétrons energéticos, íons, radicais livres e moléculas excitadas, que podem induzir várias reações químicas ao interagir com o meio aquoso (BARJASTEH *et al.*, 2021). Ao contrário dos plasmas térmicos, em que todas as espécies apresentam temperaturas elevadas semelhantes, no plasma não térmico a maior parte da energia está concentrada nos elétrons, enquanto as espécies pesadas têm temperaturas próximas à ambiente. Essa propriedade possibilita a realização de processos altamente reativos sem causar um aquecimento considerável da água tratada.

No tratamento de água, o plasma não térmico facilita a geração *in situ* de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), incluindo radicais hidroxila, peróxido de hidrogênio, ozônio, nitrito e nitrato (BARJASTEH *et al.*, 2021). Essas espécies possuem um alto potencial oxidante e estão ligadas à redução de contaminantes orgânicos resistentes, à inativação de microrganismos patogênicos e à modificação de compostos na água.

Além de contribuir para a degradação de contaminantes e desinfecção, a interação entre plasma e água também provoca mudanças nas características físico-químicas da solução (HAMMAD; G. JASIM, 2025). O pH é um dos parâmetros mais afetados por essas mudanças, e sua variação afeta a solubilidade de metais, a especiação química de compostos dissolvidos e a eficácia de vários processos de tratamento. No tratamento com plasma não térmico, a redução de espécies nitrogenadas reativas pode resultar na geração de ácidos inorgânicos, como ácido nítrico (HNO_3) e ácido nitroso (HNO_2), o que contribui para a acidificação da solução (KARIMIAN; SHARIAT; MASHAYEKHI, 2025). Essa mudança afeta o equilíbrio químico do sistema e pode ter impacto na estabilidade e na reatividade das espécies oxidantes presentes no ambiente.

Outro ponto importante é que as reações que se iniciam durante a exposição ao plasma podem persistir mesmo depois que a descarga elétrica termina (LIU *et al.*, 2018). As espécies

reativas geradas podem permanecer dissolvidas na água e envolver-se em reações secundárias ao longo do tempo, causando alterações adicionais nas características físico-químicas da solução (LIU *et al.*, 2018). Assim, entender o comportamento temporal do pH após o tratamento é crucial para analisar a estabilidade química do sistema e a duração dos efeitos causados pelo plasma (NAEIM; HUMUD, 2023).

Embora haja um aumento no número de pesquisas sobre plasma não térmico na purificação da água, ainda há lacunas na compreensão do comportamento temporal do pH após o tratamento (RAHMAN *et al.*, 2022). Embora muitos estudos se concentrem na eficácia do plasma na degradação de contaminantes ou inativação microbiana, a evolução do pH ao longo do tempo é um aspecto pouco investigado (RAHMAN *et al.*, 2022).

Diante desse contexto, torna-se relevante investigar de forma sistemática a variação do pH em meios aquosos submetidos ao tratamento por plasma não térmico, considerando diferentes condições operacionais e avaliando sua evolução ao longo do tempo.

3. OBJETIVOS

Avaliar a variação temporal do pH de um meio aquoso submetido ao tratamento com plasma não-térmico, analisando a influência do tempo de exposição e da tensão elétrica aplicada, bem como a estabilidade do sistema nas 24 horas subsequentes.

Capítulo 2

Premissa

Segundo Padureanu *et al.*, 2023 e Xiao *et al.*, 2023, o tratamento por plasma não-térmico promove a geração de espécies reativas no meio aquoso, capazes de alterar o equilíbrio químico da solução e influenciar o pH.

Hipótese

A aplicação do plasma não-térmico promove redução do pH do meio aquoso em função da formação de espécies reativas com caráter ácido, sendo essa variação dependente do tempo de exposição e da tensão elétrica aplicada, podendo persistir ou se modificar nas 24 horas subsequentes ao tratamento.

Objetivos Específicos

- Determinar a variação imediata do pH após o tratamento por plasma não térmico sob diferentes combinações de tempo de exposição e tensão elétrica.
- Avaliar o comportamento temporal do pH no pós-tratamento (0–30 min e 24 h), verificando a estabilidade/retenção do efeito de acidificação.
- Quantificar a influência do tempo e da tensão elétrica (e sua interação) sobre a variação máxima de pH e sobre a retenção do efeito após 24 horas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Qualidade da Água e Desafios no Tratamento

O tratamento de água consiste em um conjunto integrado de processos físicos, químicos e biológicos, desenvolvido para converter a água obtida de fontes superficiais ou subterrâneas em um produto seguro e adequado para o uso pretendido. Sua função primordial é proteger a saúde pública, garantindo a remoção ou neutralização de agentes patogênicos, contaminantes químicos e material particulado, de acordo com as normas de potabilidade em vigor, sendo a Portaria GM/MS nº888/2021 a mais recente (BRASIL, 2021).

Executado nas Estações de Tratamento de Água (ETAs), esse procedimento constitui o coração dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) (GARCEZ, 2016). Ele não só garante a segurança sanitária, mas também mantém os parâmetros organolépticos (cor, odor, sabor) e protege a rede de distribuição contra corrosão e acúmulo de incrustações (HUCK & SOZANSKI, 2011). A configuração tecnológica utilizada, que pode variar desde uma desinfecção pontual até um fluxograma completo de operações unitárias, é determinada pelas propriedades da água bruta e pelos padrões de qualidade exigidos para o efluente final.

A qualidade da água, nesse contexto, é um fator crucial para a saúde pública e um indicador sensível das pressões ambientais causadas pelo ser humano (FERNANDES, 2015). A fragilidade dos sistemas de saneamento está diretamente ligada à continuidade das Doenças de Transmissão Hídrica e Alimentar (DTHA), como as Doenças Diarreicas Agudas (DDA), que são uma das principais causas de mortalidade em áreas com infraestrutura insuficiente (MORAES, 2024).

Esse cenário é reforçado por estimativas da OMS, que indicam que cerca de 80% dessas doenças estão relacionadas ao consumo de água contaminada (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991 *apud* MORAES, 2024). A contaminação de solos e corpos hídricos devido ao descarte inadequado de resíduos transforma esses ambientes em possíveis transportadores de patógenos. O risco é monitorado por meio de bioindicadores microbiológicos, como *Escherichia coli* e coliformes termotolerantes. A presença desses organismos, quando quantificada, indica contaminação fecal e sinaliza o risco à saúde pública associado (FERNANDES, 2015).

Além dos abastecimentos públicos, a qualidade da água é essencial nos processos industriais, nos quais ela influencia diretamente a eficiência operacional, a segurança e a conformidade regulatória. Impurezas na água podem causar corrosão e incrustação em

equipamentos, comprometer a integridade de produtos finais, distorcer resultados analíticos e, em setores que exigem água de ultra pureza, afetar significativamente a transferência de massa, a eficácia de reações químicas e a operação de instrumentação sensível (AHUJA, 2021).

Nesse sentido, indústrias como a farmacêutica e a alimentícia exigem controle rigoroso da qualidade da água para evitar contaminações. De maneira ainda mais crítica, a indústria eletrônica e de semicondutores tem uma dependência significativa de água ultrapura, pois moléculas orgânicas de baixo peso molecular e íons metálicos em traços podem afetar tanto o desempenho do processo quanto a integridade dos dispositivos produzidos (QI & HE, 2025).

De forma semelhante, em investigações laboratoriais, a água empregada deve apresentar grau de pureza compatível com a sensibilidade dos métodos analíticos utilizados. Essa condição é fundamental para assegurar precisão e reprodutibilidade dos resultados. A presença de íons e metais em traços, por exemplo, afeta técnicas altamente sensíveis, como a espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), modificando o sinal de fundo, aumentando os limites de detecção e comprometendo a calibração, o que dificulta a comparabilidade entre experimentos (PADGETT et al., 2024).

Essas impurezas aumentam a variabilidade experimental e favorecem a ocorrência de contaminação cruzada entre recipientes, reagentes e padrões, sendo causa frequente de erros analíticos. Como resultado, o uso de água imprópria leva a resultados incorretos, exige retrabalho, gera tempo extra na investigação de inconsistências e pode resultar na invalidação de dados experimentais e publicações científicas (OKAZAKI et al., 2022; PADGETT et al., 2024).

Apesar da ampla aplicação dos métodos convencionais de tratamento (coagulação, sedimentação, filtração e cloração) sua eficácia é limitada frente a contaminantes emergentes, incluindo fármacos, produtos de cuidados pessoais, microplásticos, PFAS e disruptores endócrinos. Tais poluentes geralmente estão presentes em concentrações muito baixas e possuem propriedades físico-químicas variadas, que não são retidas pelos sistemas projetados para lidar com cargas contaminantes convencionais (MAHY et al., 2021).

Além disso, esses compostos podem persistir no ambiente, formar produtos de transformação e resistir à remoção por métodos tradicionais, tornando necessário reduzir as concentrações residuais com processos avançados. Portanto, estudos controlados com águas sintéticas e testes laboratoriais são fundamentais para analisar os mecanismos de remoção e

testar otimizações (como em processos de oxidação avançada) antes de sua aplicação em matrizes reais (MAHY et al., 2021; KUMAR et al., 2021).

4.2. Métodos Tradicionais e Avançados

A coagulação/floculação, a filtração e a desinfecção formam a base convencional do tratamento de águas superficiais, desempenhando um papel crucial na eliminação de partículas suspensas, na redução da turbidez e na remoção de matéria orgânica natural. O processo de coagulação desestabiliza partículas coloidais na água bruta ao diminuir a repulsão elétrica e adsorver produtos de hidrólise de coagulantes, como sais de alumínio e ferro, o que permite a agregação dessas partículas (FITZPATRICK; GREGORY, 2003); e em seguida, a floculação utiliza uma mistura controlada e de baixo cisalhamento para favorecer o crescimento de flocos maiores e mais densos, que podem ser eliminados por sedimentação ou retidos em filtros (FITZPATRICK; GREGORY, 2003).

A filtração, geralmente realizada por meio de filtros de areia rápida ou filtros de cascalho de fluxo ascendente, elimina as partículas remanescentes por meio de mecanismos de captura em profundidade, adsorção e retenção física. Quando integrada de forma adequada à etapa de coagulação, essa técnica atinge eficiências de remoção de turbidez superiores a 98,7% (CASTRO-JIMÉNEZ et al., 2022). Além de melhorar as características estéticas da água, esses métodos reduzem a formação de subprodutos da desinfecção ao remover precursores orgânicos e diminuir a presença de patógenos associados a partículas, protegendo as etapas posteriores de desinfecção e distribuição.

No que se refere à desinfecção, a cloração permanece como meio mais tradicional e difundido. O cloro é empregado devido à sua eficácia comprovada contra patógenos, custo acessível e capacidade de manter residual na rede de distribuição, assegurando proteção pós-tratamento (DU SHUANS-LEI, 2012). No entanto, seu uso, especialmente na forma gasosa, impõe desafios operacionais relacionados à alta toxicidade e à necessidade de manuseio seguro. Além disso, a reação do cloro com matéria orgânica natural gera subprodutos da desinfecção (SPDs), como trihalometanos e ácidos haloacéticos, associados a riscos à saúde e a alterações organolépticas. As modalidades operacionais, tais como a cloração simples, a cloração até o ponto de ruptura e a cloroaminação, são escolhidas conforme a qualidade da água, visando equilibrar eficiência microbiológica e minimizar a formação de subprodutos indesejáveis (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991; RICHTER, 2009; GHERNAOUT, *et al.*, 2020).

Diante das limitações dos métodos convencionais, tecnologias avançadas vêm sendo exploradas/ incorporadas aos sistemas de tratamento. Entre elas, destacam-se a ozonização e a radiação ultravioleta (UV), amplamente associadas aos Processos Oxidativos Avançados (POAs). A ozonização atua por meio da oxidação molecular direta, atacando seletivamente grupos funcionais ricos em elétrons, e pela decomposição do ozônio em radicais hidroxila ($\text{OH}\cdot$), que promovem a oxidação não seletiva e potente de compostos orgânicos refratários (ILYAS; MASHI; VAN DER HOEK, 2018).

A radiação UV, por sua vez, promove a inativação de microrganismos causando danos fotoquímicos ao DNA e RNA. Quando combinada com oxidantes como H_2O_2 ou O_3 , gera radicais hidroxila in situ, que amplificam significativamente a mineralização de micropoluentes (ILYAS; MASHI; VAN DER HOEK, 2018). Sistemas híbridos, especialmente O_3/UV , apresentam desempenho superior na degradação de compostos orgânicos e inativação de bactérias em relação a processos isolados, conseguindo remoções eficientes de precursores de subprodutos de desinfecção. No entanto, é necessário um controle operacional rigoroso para reduzir a formação de subprodutos indesejáveis, como bromato e compostos halogenados (AMIRSARDARI; YU; WILLIAMS, 2001).

Os POAs constituem, portanto, uma classe de tecnologias que ultrapassam as limitações dos tratamentos tradicionais por meio da geração in situ de radicais hidroxila ($\cdot\text{OH}$), agentes oxidantes altamente reativos e não seletivos. Esses radicais facilitam a degradação eficiente de poluentes orgânicos recalcitrantes, o que pode resultar em sua mineralização ou na conversão em subprodutos menos tóxicos e mais biodegradáveis (ARAÚJO et al., 2016; PIGNATELLO et al., 2006; NOGUEIRA et al., 2007).

A versatilidade dos POAs é demonstrada por suas várias categorias, como químicos (ex.: Fenton), fotoquímicos (ex.: $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, fotocatalise), eletroquímicos e sonoquímicos. Esses tipos combinam oxidantes, fontes de energia (luz, ultrassom) ou catalisadores para produzir radicais, muitas vezes com efeitos sinérgicos que aumentam a eficácia do tratamento (ARAÚJO et al., 2016; PIGNATELLO et al., 2006; NOGUEIRA et al., 2007).

Entre as tecnologias emergentes inseridas nesse contexto destaca-se o plasma não-térmico (PNT), cuja aplicação no tratamento de água baseia-se na geração de uma combinação complexa de elétrons energéticos, radiação UV, campos elétricos e espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS). Esses sistemas promovem a formação de radicais hidroxila

(•OH), ozônio e outras espécies oxidantes capazes de atacar e fragmentar moléculas orgânicas (YIN et al., 2023).

Estudos conduzidos em reatores do tipo descarga em barreira dielétrica (DBD) têm demonstrado a relevância do •OH e do O₃ na degradação e mineralização de contaminantes específicos, como o antibiótico sulfametoxazol (VANLALHMINGMAWIA; HA; YANG, 2025). As aplicações incluem a remoção de micropoluentes, corantes, antibióticos e cianotoxinas, além de apresentarem potencial para desinfecção e reuso. Por operar em temperatura ambiente e combinar múltiplos mecanismos de oxidação, o plasma não-térmico surge como alternativa promissora aos POAs convencionais, especialmente em cenários nos quais os métodos tradicionais se mostram insuficientes (YIN et al., 2023)

4.3. Parâmetros de Qualidade de água

Os parâmetros físico-químicos da água são medidas que definem o estado químico, a integridade física e a capacidade de suporte ecológico de um corpo hídrico (ATOBATELE; UGWUMBA, 2008). De acordo com os objetivos do monitoramento e as pressões ambientais locais, é possível acompanhar rotineiramente diversos parâmetros, como temperatura, oxigênio dissolvido, sólidos totais e dureza (ATOBATELE; UGWUMBA, 2008).

Entre os parâmetros essenciais para a avaliação da qualidade da água, destacam-se o pH, que indica o nível de acidez ou alcalinidade e afeta reações químicas e a toxicidade de contaminantes; a condutividade elétrica, que reflete a concentração de íons dissolvidos e serve como indicador de salinidade; o potencial de oxirredução (ORP), que expressa a tendência da água em aceitar ou doar elétrons, fornecendo informações sobre o estado redox e processos de oxidação; e a turbidez, que quantifica a presença de partículas em suspensão, afetando a clareza da água e indicando a presença de sedimentos ou material particulado (ADAMU et al., 2024; ATOBATELE; UGWUMBA, 2008), sendo esses parâmetros são frequentemente empregados em pesquisas de monitoramento ambiental e tratamento de água, pois oferecem dados complementares sobre diversos aspectos da qualidade da água (ADAMU et al., 2024).

A prática de monitorar continuamente o pH e a condutividade elétrica é fundamental para a gestão eficaz dos sistemas de tratamento de água. O monitoramento constante do pH possibilita a realização de ajustes imediatos na dosagem de reagentes e a otimização de processos essenciais, como coagulação, floculação e desinfecção. Isso ajuda a evitar problemas

operacionais, mantém as reações químicas dentro das faixas ideais de eficiência e reduz a formação de subprodutos que podem ser tóxicos (ALWAN, 2008).

De forma complementar, a medição da condutividade elétrica fornece um método rápido e econômico para avaliar a concentração de íons dissolvidos e a qualidade da água tratada. Isso possibilita a detecção de variações na carga poluente do influente e o monitoramento da eficiência na remoção de sólidos dissolvidos em processos como dessalinização e tratamento biológico. No entanto, sua interpretação requer compensação de temperatura e consideração da matriz iônica específica para decisões precisas de processo (YU et al., 2022).

O monitoramento da turbidez e do ORP também constitui um conjunto de ferramentas fundamentais. O ORP oferece um indicador em tempo real da capacidade oxidante do sistema, possibilitando o controle automatizado da dosagem de desinfetantes e a verificação da inativação microbiana. Pesquisas indicam que o controle baseado em ORP pode diminuir o uso de produtos químicos de cloração e descloração em até 47% e 62%, respectivamente, ao mesmo tempo em que mantém os padrões de qualidade microbiológica e os limites de descarga (KIM & HENSLEY, 1997).

A turbidez, por sua vez, constitui um indicador operacional primário da eficiência da remoção de partículas suspensas e da filtração. O espalhamento da luz está diretamente relacionado à concentração de sólidos em suspensão, sendo possível detectar rapidamente falhas nas etapas de coagulação, sedimentação ou filtração. Estudos conduzidos em estações de tratamento de água residuária demonstraram forte correlação entre turbidez do efluente e sólidos suspensos totais, validando seu uso como parâmetro de monitoramento contínuo (MUCHA & KULAKOWSK, 2016).

No contexto do presente trabalho, o pH assume papel central como variável de análise após o tratamento em reator de PNT. A geração de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), como peróxido de hidrogênio, nitritos e nitratos, pode alterar significativamente o equilíbrio ácido-base da solução, promovendo variações expressivas no pH (MONTALBETTI et al., 2024).

Essas alterações influenciam diretamente os mecanismos de remoção de contaminantes, seja por precipitação de metais, degradação oxidativa de compostos orgânicos ou inativação microbiana. Jabłońska et al. (2022) demonstraram que o monitoramento do pH permite distinguir se a remoção de metais como Pb(II) e Cd(II) ocorre predominantemente por precipitação, favorecida pelo aumento do pH induzido pelo plasma, ou por oxidação direta.

Dessa forma, o pH configura-se como indicador fundamental tanto da eficiência quanto dos mecanismos predominantes no tratamento.

4.4. Plasma não-térmico

O plasma, muitas vezes referido como o quarto estado da matéria, tem atraído cada vez mais atenção científica e tecnológica, particularmente no âmbito do tratamento de águas e efluentes. O PNT é um gás parcialmente ionizado em que a energia de entrada é majoritariamente armazenada nos elétrons livres, ao passo que as espécies pesadas (íons e moléculas neutras) mantêm uma temperatura próxima à temperatura ambiente, resultando em um estado de não equilíbrio termodinâmico (AKPOR; AJINDE; DAYO-OLAGBENDE, 2024).

Nesse estado, a temperatura dos elétrons é geralmente muito superior à temperatura do gás ou dos íons, tornando inviável a caracterização do sistema por uma única temperatura (CHAVAN; SINGH; YADAV, 2024). Essa diferença entre elétrons energéticos (geralmente na faixa de 1-10 eV) e partículas pesadas frias possibilita que processos como excitação, ionização e formação de radicais ocorram de maneira eficaz, sem aumentar a temperatura do gás como um todo. Isso o distingue dos plasmas térmicos, nos quais todas as espécies compartilham temperaturas elevadas semelhantes (AKPOR; AJINDE; DAYO-OLAGBENDE, 2024; CHAVAN; SINGH; YADAV, 2024).

Também denominado plasma frio, o PNT apresenta baixo grau de ionização, sendo composto majoritariamente por espécies neutras, com uma fração minoritária de elétrons e íons energéticos. Sua geração pode ocorrer por diferentes configurações de descarga elétrica, entre as quais se destacam as descargas por barreira dielétrica (DBD), os jatos de plasma à pressão atmosférica (APPJ) e descargas pulsadas do tipo glow ou spark (BARJASTEH et al., 2021; FERRELL; GALOV, 2013). A escolha da configuração influencia diretamente a homogeneidade da descarga, o volume de interação plasma-líquido e a composição das espécies reativas produzidas.

Uma das principais características do PNT é a geração de uma mistura complexa de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), incluindo radicais como $O\cdot$ e $OH\cdot$, além de íons, elétrons, radiação ultravioleta e intensos campos elétricos localizados. A composição dessas espécies depende do gás de alimentação, da umidade e do modo de operação (KUMAR et al., 2021; CHEN et al., 2017). A formação dessas espécies ocorre principalmente por colisões

inelásticas entre elétrons energéticos e moléculas do gás, seguidas de reações secundárias na fase gasosa e na interface plasma-líquido.

A ação combinada de radicais livres, radiação UV e campos elétricos confere ao plasma não térmico elevada versatilidade para esterilização, modificação de superfícies e degradação de poluentes. No tratamento de água, essa combinação permite a oxidação de contaminantes orgânicos, a inativação microbiana e a transformação de espécies metálicas, sem aquecimento significativo do sistema líquido. Essa característica é particularmente relevante para o tratamento de efluentes sensíveis ao calor e para aplicações que exigem controle preciso das condições operacionais (BARJASTEH et al., 2021; KUMAR et al., 2021). E justifica o interesse crescente pela tecnologia em cenários de tratamento avançado.

A principal diferença entre plasmas térmicos e não térmicos reside no equilíbrio termodinâmico e na distribuição de energia entre as espécies constituintes. Plasmas térmicos operam em regime próximo ao equilíbrio, com temperaturas elevadas (frequentemente superiores a milhares de Kelvin) distribuídas de forma relativamente uniforme entre elétrons, íons e espécies neutras, sendo aplicados em processos de alta entalpia, como fusão e aspersão térmica. Em contraste, os plasmas não térmicos apresentam forte desequilíbrio energético, permitindo a geração seletiva de espécies reativas em condições próximas à temperatura ambiente (MEICHSNER, 2010; BARJASTEH et al., 2021).

Essa distinção fundamenta suas diferentes aplicações: enquanto os plasmas térmicos são adequados para processamento de materiais em altas temperaturas, os plasmas não térmicos são amplamente empregados em tratamentos de superfície, aplicações biomédicas, descontaminação e degradação de poluentes, especialmente quando o controle térmico e a química seletiva mediada por elétrons energéticos são essenciais. No contexto deste TCC, o PNT é apresentado como um processo de exposição aplicado ao meio aquoso, e o foco do estudo é analisar o comportamento do pH após a exposição, com ênfase na variação temporal de pH como eixo central da avaliação físico-química.

4.4.1. Tratamento de Água por Plasma Não-Térmico

O PNT tem se destacado como uma tecnologia associada aos Processos Oxidativos Avançados (POA) bastante promissora para o tratamento de água e efluentes, proporcionando uma abordagem inovadora que integra diversos mecanismos de ação simultaneamente em condições próximas à temperatura ambiente. Ao contrário dos métodos tradicionais de

tratamento, que geralmente requerem a adição de reagentes químicos, aquecimento intenso ou longos períodos de retenção, o plasma não térmico produz *in situ* uma variedade de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), radiação ultravioleta, campos elétricos pulsados e ondas de choque. Esses elementos atuam de forma sinérgica para degradar contaminantes orgânicos recalcitrantes, inativar microrganismos patogênicos e remover poluentes emergentes (JIANG et al., 2014). No presente TCC, contudo, o enfoque recai na análise da variação do pH após a água ser exposta ao PNT, sem inferir eficácia de remoção ou desempenho de tratamento.

A versatilidade dessa tecnologia é demonstrada por sua habilidade de lidar tanto com contaminantes como fármacos, pesticidas e corantes industriais, quanto com microrganismos que resistem a métodos convencionais de desinfecção, sem produzir subprodutos halogenados tóxicos frequentemente ligados à cloração (MAGUREANU et al., 2015). Ademais, o PNT oferece benefícios operacionais importantes, como modularidade, facilidade de integração com sistemas já existentes, operação sob demanda sem a necessidade de armazenar produtos químicos perigosos e eficiência energética em ascensão, acompanhando os avanços tecnológicos nas fontes de alimentação pulsada e nas configurações de reatores.

O processo fundamental para a transferência de espécies oxidantes da fase gasosa para a líquida é a interação entre a água e o plasma. Durante a exposição, espécies reativas como radicais $\bullet\text{OH}$ e $\text{O}\bullet$, ozônio (O_3), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x) produzidos na descarga são conduzidas até a água por meio da convecção provocada pelo jato de plasma, difusão na camada limite e solubilização interfacial (ROY et al., 2021). Na interface, ocorre uma conversão dinâmica dessas espécies, na qual radicais de vida curta se transformam em compostos mais estáveis, como H_2O_2 e íons nitrogenados ($\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$), que se difundem para o volume líquido e iniciam uma série complexa de reações redox (LIU et al., 2016).

A formação de espécies RONS ocorre por meio da excitação e dissociação das moléculas de N_2 e O_2 na descarga elétrica, resultando na geração de radicais de curta duração ($\text{OH}\bullet$, O , $\text{NO}\bullet$, $\text{NO}_2\bullet$) e espécies de vida mais longa (H_2O_2 , O_3 , HNO_2 , HNO_3 , NO_2^- , NO_3^-), que se acumulam na fase aquosa e provocam mudanças significativas nas propriedades físico-químicas da solução (MACHALA et al., 2013). As espécies reativas de oxigênio (ROS) elevam o ORP e a capacidade oxidativa do sistema, enquanto as espécies reativas de nitrogênio (RNS), resultantes da dissolução e hidrólise de NO e NO_2 , produzem ácido nitroso (HNO_2) e ácido nítrico (HNO_3), liberando prótons (H^+) e promovendo acidificação (JOSHI et al., 2018).

A interação sinérgica entre ROS e RNS é especialmente relevante, pois a reação entre H_2O_2 e HNO_2 em meio ácido gera peroxinitrito ($\text{ONOOH}/\text{ONOO}^-$), espécie altamente reativa que intensifica o poder oxidativo e antimicrobiano do meio aquoso exposto. Paralelamente, a oxidação progressiva das espécies nitrogenadas até nitrato (NO_3^-) contribui para o aumento da condutividade elétrica e para a manutenção de condições ácidas na solução (ERCAN et al., 2016).

A eficácia do processo e a distribuição espacial das espécies na água são definidas por parâmetros operacionais como distância eletrodo-líquido, velocidade do jato, turbulência induzida, tensão elétrica aplicada e tempo de exposição (ROY et al., 2021; LIU et al., 2016). Esses fatores determinam a profundidade de penetração das espécies ativas, o perfil de RONS gerado e o potencial oxidativo do sistema, sendo fundamentais para o dimensionamento e otimização de reatores. No escopo deste trabalho, tais parâmetros são relevantes na medida em que podem influenciar a magnitude e a persistência da variação de pH após a exposição ao PNT.

4.4.2. Mecanismos Físico-Químicos

A geração do plasma não-térmico inicia-se com a aplicação de um campo elétrico intenso entre dois eletrodos. Quando a intensidade do campo excede o limiar de ruptura dielétrica do gás, elétrons livres preexistentes, provenientes da ionização natural por radiação cósmica ou emissão termiônica, são acelerados e passam a adquirir energia cinética suficiente para provocar ionizações por impacto quando colidem com moléculas neutras. Esse processo desencadeia uma avalanche eletrônica, na qual cada elétron energizado produz múltiplos elétrons secundários por meio de colisões ionizantes sucessivas, resultando no crescimento exponencial da densidade de portadores de carga e no estabelecimento da descarga (ELIASSON et al., 2004).

Para que o sistema opere em regime não térmico, é fundamental controlar rigorosamente os parâmetros operacionais. A limitação da corrente elétrica é essencial para evitar a formação de canais condutivos de alta densidade de corrente que levariam ao aquecimento Joule excessivo e à transição para um arco térmico. Esse controle pode ser realizado por meio da inserção de barreiras dielétricas, que interrompem a condução de forma intermitente, ou pela aplicação de tensões pulsadas de curta duração, tipicamente na faixa de nanossegundos a microssegundos (OKUBO, 2023). Além disso, parâmetros como pressão do gás, distância entre

eletrodos e frequência de operação devem ser ajustados para favorecer a deposição de energia nos elétrons, preservando o estado de não equilíbrio termodinâmico característico do PNT.

Os elétrons energéticos desempenham papel central na dinâmica do plasma, atuando como principais transportadores de energia e agentes promotores das reações químicas. Devido à sua baixa massa, os elétrons são eficientemente acelerados pelo campo elétrico aplicado, alcançando energias significativamente superiores às das espécies pesadas. Isso resulta em uma função de distribuição de energia eletrônica (EEDF) tipicamente não-Maxwelliana. A forma da EEDF determina a eficiência dos processos colisionais inelásticos, como ionização, excitação eletrônica, dissociação molecular e formação de estados metaestáveis (CAPITELLI et al., 2012).

A preservação do estado de não equilíbrio térmico está associada à transferência seletiva de energia dos elétrons para os graus de liberdade internos das moléculas (eletrônico, vibracional e rotacional) por meio de colisões inelásticas. Em contraste, colisões elásticas entre elétrons e moléculas contribuem pouco para o aquecimento global do gás devido à significativa diferença de massa entre as partículas envolvidas. Esse mecanismo direciona a energia elétrica principalmente para a geração de radicais, íons e espécies excitadas, em vez de promover aquecimento volumétrico do meio (LAROUSSE et al., 2017). A população de elétrons de alta energia presente na cauda da EEDF é particularmente importante para processos que exigem limiares energéticos elevados, como ionização direta e dissociação de moléculas estáveis, garantindo a manutenção da descarga e a produção contínua de espécies reativas (BOGAERTS et al., 2021; ADAMOVICH et al., 2017).

As colisões inelásticas entre elétrons energéticos e moléculas do gás de trabalho resultam na formação de espécies excitadas e ionizadas. Essas interações podem promover transições para estados eletrônicos excitados, incluindo estados radiativos e metaestáveis, ou ainda provocar a ejeção de elétrons de valência, gerando íons positivos e elétrons secundários (BRUGGEMAN et al., 2016). Espécies como oxigênio no estado singlete, moléculas de nitrogênio excitadas e estados metaestáveis de gases nobres desempenham papel relevante na química subsequente do plasma.

Quando o plasma não-térmico interage com meios aquosos, as espécies reativas produzidas na fase gasosa, como radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), átomos de oxigênio (O), óxido nítrico (NO) e espécies ionizadas, difundem-se pela interface gás-líquido e desencadeiam reações secundárias no meio aquoso (LOCKE & SHIH, 2011). Essas reações resultam na

formação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ácido nítrico (HNO_3), ácido nitroso (HNO_2), peroxinitrito (ONOO^-) e outras espécies RONS. A presença desses compostos confere à água ativada por plasma propriedades oxidativas, antimicrobianas e acidificantes, fundamentais para aplicações em tratamento de água. NO contexto deste TCC, esses mecanismos são apresentados principalmente por sua relação com a variação do pH observada após a exposição do meio aquoso ao plasma não-térmico.

4.5. Importância do pH como Parâmetro Físico-Químico

Os parâmetros físico-químicos da água constituem medições padronizadas que refletem suas propriedades físicas e químicas, permitindo avaliar a qualidade da água e os processos biogeoquímicos em andamento (OMER, 2019). Entre esses parâmetros, o pH destaca-se como indicador essencial das reações químicas em sistemas aquáticos.

O pH influencia diretamente a solubilidade e a precipitação de compostos, a especiação química de metais e a eficácia de processos de tratamento (PARK et al., 2015). Em pH baixo, ocorre maior solubilização de hidróxidos metálicos; em pH elevado, favorece-se a precipitação de hidróxidos e carbonatos sólidos, reduzindo a concentração de metais na fase aquosa (PARK et al., 2015). Além disso, variações de pH modificam a distribuição entre espécies livres, complexos hidroxilares e carbonatos, afetando mobilidade, toxicidade e adsorção (QUITON; HUANG; LIU, 2022).

O pH também atua como indicador de estabilidade do sistema aquático, refletindo o equilíbrio entre espécies ácidas e básicas e funcionando como preditor de mudanças químicas e biológicas (OMER, 2019). Alterações significativas podem indicar contaminação, atividade biológica intensa ou influência de efluentes industriais e agrícolas (SINGH; SINGH, 2022).

No contexto do tratamento por plasma não térmico, o pH é um dos parâmetros mais sensíveis às condições de descarga, ao tipo de gás, potência aplicada e configuração do reator (JABŁOŃSKA et al., 2022). Seu monitoramento permite acompanhar transformações químicas induzidas pelo plasma, avaliar o comportamento do pH após a exposição ao pNT e subsidiar tanto a avaliação da eficácia da remoção de contaminantes quanto otimização de parâmetros operacionais em tempo real (LU et al., 2023).

4.5.1. Efeito do Plasma no pH e nas Propriedades Físico-Químicas

A interação entre PNT e água resulta na formação de espécies reativas que alteram significativamente os equilíbrios ácido-base e redox do sistema (BRISSET; PAWLAT, 2016; VOLKOV et al., 2021). Como consequência, formam-se produtos iônicos estáveis, como nitrito e nitrato, originando a chamada água ativada por plasma (PAW), que mantém caráter oxidante mesmo após a interrupção da descarga (ROYINTARAT et al., 2019).

Uma das alterações mais consistentes é a acidificação do meio. Esse fenômeno decorre principalmente da formação de ácidos nitrogenados, especialmente ácido nítrico (HNO_3), considerado o principal ácido estável produzido (BRISSET; PAWLAT, 2016; WANG et al., 2023). A dissolução e a hidrólise de NO_x levam à formação de HNO_3 e HNO_2 , liberando H^+ e reduzindo progressivamente o pH.

A acumulação de NO_2^- e NO_3^- contribui para o aumento da força iônica e da condutividade elétrica, além de consumir a alcalinidade natural da água, tornando a acidificação um processo cumulativo e proporcional à dose de plasma aplicada (AL-SHARIFY et al., 2020). O tempo de exposição e a tensão aplicada influenciam diretamente a produção e conversão de espécies transitórias em produtos ácidos estáveis (BRISSET; PAWLAT, 2016; ROYINTARAT et al., 2019). Entretanto, não existem leis universais de escalonamento, sendo necessária calibração específica para cada geometria de reator (VOLKOV et al., 2021).

Além da acidificação, observa-se aumento do ORP e da condutividade elétrica (WANG et al., 2023), enquanto a dinâmica do oxigênio dissolvido permanece menos conclusiva (BRISSET; PAWLAT, 2016). A elevada reatividade pode ainda favorecer reações de nitrosação e nitração em matrizes orgânicas (ROYINTARAT et al., 2019). Assim, a aplicação prática da água ativada por plasma requer ajuste fino dos parâmetros operacionais, monitoramento contínuo do pH e validação específica para cada uso, evitando acidificação excessiva e formação de subprodutos indesejados (AL-SHARIFY et al., 2020).

CAPÍTULO 2

Variação temporal do pH na água sob aplicação do plasma não térmico

Karoline Martins Teixeira, Marina de Medeiros Machado, Glívia Braga Faria, Eliza Maria da Silva.

Resumo

A crescente demanda por tecnologias alternativas para o tratamento de água tem impulsionado a investigação de métodos capazes de promover desinfecção e modificações físico-químicas sem gerar subprodutos indesejáveis. Entre essas abordagens, o plasma não-térmico (PNT) destaca-se por sua capacidade de formar espécies reativas com forte potencial de oxidação. Neste estudo, avaliou-se a variação temporal do pH de água destilada tratada por PNT, considerando diferentes tempos de exposição e tensões elétricas aplicadas. O pH foi monitorado imediatamente após o tratamento, durante os primeiros 30 minutos e após 24 horas, permitindo analisar a magnitude e a estabilidade da acidificação induzida. Observou-se redução imediata do pH em todas as condições, com ΔpH máximo de $4,05 \pm 0,78$ na maior tensão aplicada. A análise estatística indicou que a tensão elétrica exerceu influência significativa sobre $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$ ($R^2 = 0,389$; $p = 0,035$), enquanto o tempo de exposição não apresentou efeito significativo na faixa investigada. A maior parte da acidificação ocorreu imediatamente após o tratamento, com manutenção de aproximadamente 80–90% da redução após 24 horas. Conclui-se que a tensão elétrica é o principal parâmetro determinante da acidificação induzida por PNT, conferindo ao método potencial para aplicações em processos de tratamento hídrico que demandam modulação controlada do pH.

Keywords: Plasma não-térmico; Tratamento de água; pH; Qualidade da água; Espécies reativas.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água potável de qualidade configura um dos principais desafios ambientais contemporâneos. O consumo global de água doce aumentou aproximadamente seis vezes no último século, mantendo crescimento anual em torno de 1%, impulsionado pelo crescimento populacional, desenvolvimento econômico e mudanças nos padrões de consumo (ONU BRASIL, 2021). Paralelamente, observa-se deterioração

progressiva da qualidade dos recursos hídricos, intensificando o estresse hídrico e comprometendo a segurança sanitária. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), mais de 2 bilhões de pessoas consomem água contaminada por fezes, enquanto cerca de 2,4 bilhões não dispõem de saneamento adequado (ONU, 2020).

Além do comprometimento microbiológico, a contaminação hídrica altera parâmetros físico-químicos essenciais, entre eles o pH, que influencia processos de desinfecção, corrosividade e estabilidade química da água. No Brasil, a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde estabelece padrões rigorosos para controle da qualidade da água destinada ao consumo humano (BRASIL, 2021). Embora a cloração seja amplamente utilizada, a formação de subprodutos potencialmente tóxicos impulsiona a busca por tecnologias alternativas (PINTO; BALTAZAR, 2020).

Nesse contexto, o plasma não-térmico (PNT) destaca-se como tecnologia promissora para inativação microbiana sem adição direta de reagentes químicos convencionais (MURUGESAN et al., 2020). O PNT gera espécies reativas de oxigênio e nitrogênio que, ao interagirem com o meio aquoso, podem formar compostos ácidos e promover reações oxidativas intensas (FRIDMAN, 2008). Como consequência, observa-se frequentemente redução do pH, cuja magnitude depende das condições operacionais, como tempo de exposição e tensão aplicada.

Apesar dos avanços quanto à eficiência oxidativa (GUO et al., 2026) e à inativação microbiana (TAKAMATSU et al., 2015), ainda há lacunas na compreensão da dinâmica temporal das alterações físico-químicas após o tratamento. A formação, transformação ou degradação das espécies reativas dissolvidas pode provocar variações adicionais do pH nas horas subsequentes, levantando a seguinte questão: a alteração do pH induzida pelo PNT é transitória ou representa modificação persistente do equilíbrio químico do meio?

Assim, o presente estudo tem por objetivo avaliar a variação temporal do pH de água destilada tratada com plasma não-térmico, considerando diferentes tempos de exposição e tensões elétricas aplicadas. A análise do comportamento do pH nas 24 horas subsequentes busca determinar tendências de estabilização ou reequilíbrio químico, fornecendo subsídios para o uso seguro e eficaz da tecnologia em sistemas de tratamento hídrico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Delineamento experimental

Foi adotado um delineamento fatorial completo 2^2 (Design of Experiments- DOE), com repetições no ponto central, para avaliar simultaneamente os efeitos do tempo de tratamento (A) e da tensão elétrica aplicada (B) sobre as variáveis resposta relacionadas à variação do pH. Os fatores foram estudados em dois níveis codificados (-1 e +1), correspondentes a: Tempo: 5 e 10 minutos; e Tensão: 50% e 100% da tensão de referência (17 kV). O ponto central (0) correspondeu a 7,5 minutos e 75% da tensão de referência.

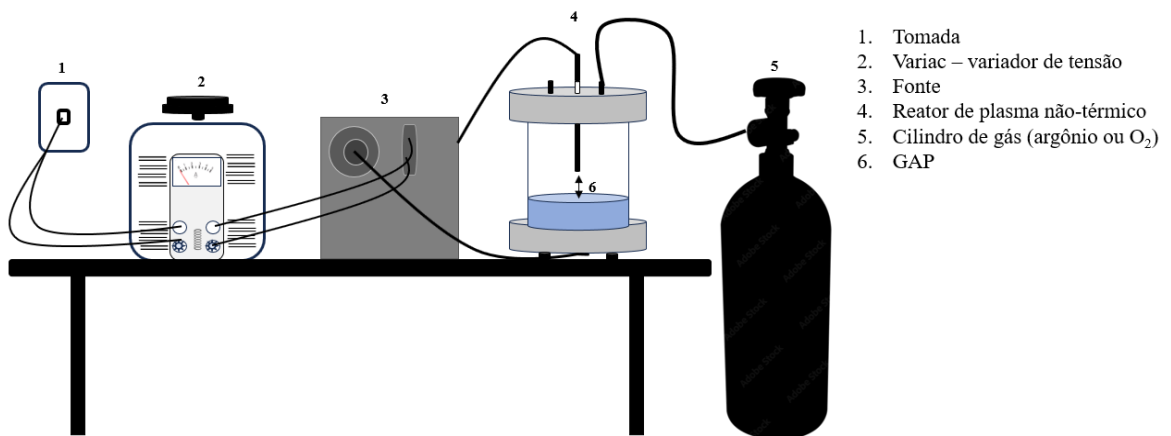
O delineamento resultou em 21 ensaios experimentais, incluindo as combinações fatoriais e as repetições no ponto central, permitindo a estimativa dos efeitos principais, da interação entre fatores, da curvatura do modelo e do erro experimental.

2.2. Tratamento da água por plasma não térmico

2.2.1 Sistema de plasma

O sistema de geração de PNT foi composto por: um *Variac* para regular a potência fornecida ao reator; uma fonte de alta tensão (17 kV, 60 Hz), responsável pela descarga; um cilindro de gás argônio; e o próprio reator de plasma do tipo ponta-plano, conforme representado na Figura 1. O equipamento possui um volume interno de 320 cm³, e a distância entre os eletrodos foi mantida em 8 mm para todos os testes realizados.

Figura 1: Sistema de Plasma não-térmico.



Fonte: Faria (2023).

2.3. Matriz experimental

Em todos os experimentos, usou-se água destilada como matriz aquosa padrão. O volume de trabalho estabelecido foi de 50 mL para cada unidade experimental, e esse valor foi mantido inalterado durante todas as fases do delineamento. Para definir o estado inicial do sistema e permitir a interpretação dos resultados, registrou-se o pH inicial de cada amostra.

2.4. Medição de pH

As medições de pH foram realizadas com um pHmetro digital (Instrutherm, modelo PH-5000), cuja sonda foi ajustada antes de cada série, empregando soluções tampão de pH 4, 7 e 10. As leituras foram realizadas logo após o tratamento (tempo zero) e, posteriormente, nos minutos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25 e 30, além de uma medição final após 24 horas.

2.5. Tratamento e análise dos dados

A variação imediata do pH foi calculada como:

$$\Delta\text{pH}_0 = \text{pH}_i - \text{pH}_0 \quad (1)$$

onde pH_0 corresponde ao valor medido imediatamente após o tratamento. Valores positivos indicam acidificação.

O comportamento temporal foi avaliado com base na evolução do ΔpH ao longo dos primeiros 30 minutos após o tratamento, utilizando o pH_i como referência fixa.

A estabilidade do efeito foi expressa como retenção percentual da variação de pH após 24 horas em relação ao valor observado aos 30 minutos:

$$\text{Retenção (\%)} = (\Delta\text{pH}_{24\text{h}} / \Delta\text{pH}_{30\text{min}}) \times 100 \quad (2)$$

Valores próximos de 100% indicam manutenção do efeito ao longo do tempo.

Na análise da influência dos fatores operacionais, foram consideradas três variáveis resposta: $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$; $\Delta\text{pH}_{30\text{min}}$; e $\Delta\text{pH}_{24\text{h}}$. A análise estatística foi conduzida por meio de modelo fatorial 2^2 , permitindo estimar efeitos principais (tempo e tensão) e efeito de interação (A×B). A significância dos efeitos foi avaliada por análise de variância (ANOVA), adotando nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Modelos de regressão foram ajustados quando aplicável, sendo analisados coeficientes, valores de p e coeficiente de determinação (R^2).

3. RESULTADOS

3.1. Condição inicial do Sistema

Antes da aplicação do plasma não-térmico, realizou-se a caracterização da condição inicial da água destilada utilizada como matriz experimental. O pH inicial (pHi) foi determinado em todas as execuções para verificar estabilidade e reprodutibilidade do sistema. Os valores médios obtidos estão apresentados na Tabela 1, enquanto a tabela completa contendo todos os valores individuais e seus desvios encontra-se disponível no Anexo A.

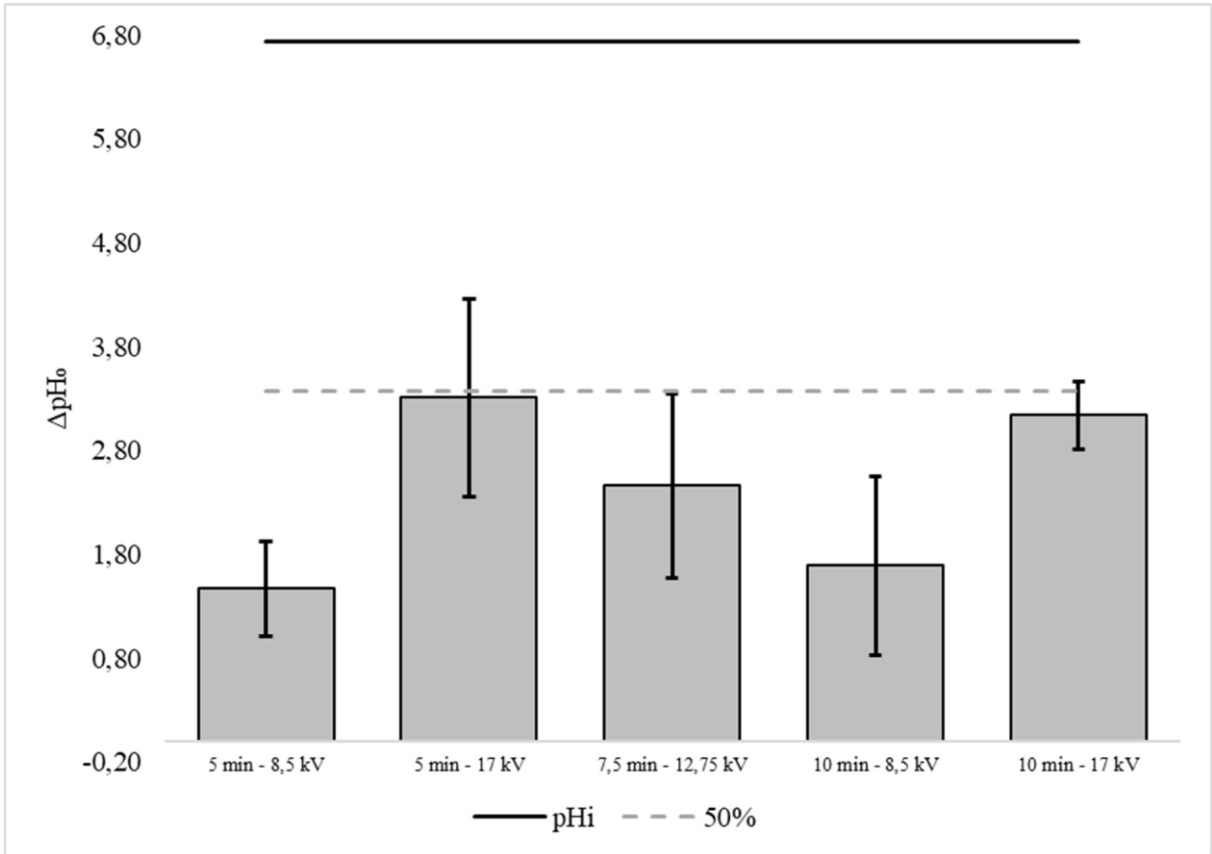
Tabela 1: Média e Desvio Padrão do pH Inicial e Temperatura.

Parâmetro	Média \pm Desvio Padrão
pH inicial	6,74 \pm 0,99
Temperatura ($^{\circ}$ C)	23,0 \pm 1,01

A água apresentou pH médio de $6,74 \pm 0,99$, próximo à neutralidade, com variabilidade moderada entre as amostras. A temperatura média registrada foi de $23,0 \pm 1,01$ $^{\circ}$ C. A relativa homogeneidade dos valores indica condições iniciais controladas do sistema experimental antes do tratamento, assegurando que as variações subsequentes sejam atribuídas majoritariamente à ação do plasma.

3.2. Variação imediata do pH (Δ pH₀) A variação imediata do pH (Δ pH) demonstrou dependência predominante da tensão elétrica aplicada, enquanto o tempo de exposição exerceu influência secundária (Figura 2).

Figura 2: Variação imediata do pH (ΔpH) após o tratamento por plasma não-térmico nas diferentes combinações de tempo e tensão elétrica. As barras representam os valores médios de ΔpH e as hastes indicam o desvio-padrão para cada condição experimental (5 min–50 V; 5 min–100 V; 7,5 min–75 V; 10 min–50 V; 10 min–100 V). Observa-se incremento do ΔpH em níveis mais elevados de tensão, independentemente do tempo de exposição.



Observou-se aumento consistente do ΔpH à medida que a tensão foi elevada de 8,5 kV para 17 kV, independentemente do tempo de exposição. Aos 5 minutos, o ΔpH médio passou de $1,47 \pm 0,46$ (8,5 kV) para $3,31 \pm 0,95$ (17 kV), enquanto aos 10 minutos variou de $1,69 \pm 0,86$ (8,5 kV) para $3,14 \pm 0,33$ (17 kV). Esses resultados evidenciam que a tensão exerce o efeito mais pronunciado sobre a alteração imediata do pH, configurando-se como o principal fator determinante da resposta.

O tempo de exposição, por sua vez, apresentou influência menos evidente. As variações observadas entre 5 e 10 minutos, dentro de uma mesma tensão, foram discretas e permaneceram dentro dos respectivos desvios-padrão, indicando ausência de um padrão claro associado ao tempo. No ponto central do delineamento (7,5 min – 12,75 kV), o ΔpH médio foi de $2,46 \pm 0,89$, situando-se entre os valores obtidos nos níveis extremos de tensão, o que reforça o comportamento tendencial dominado pelo fator tensão.

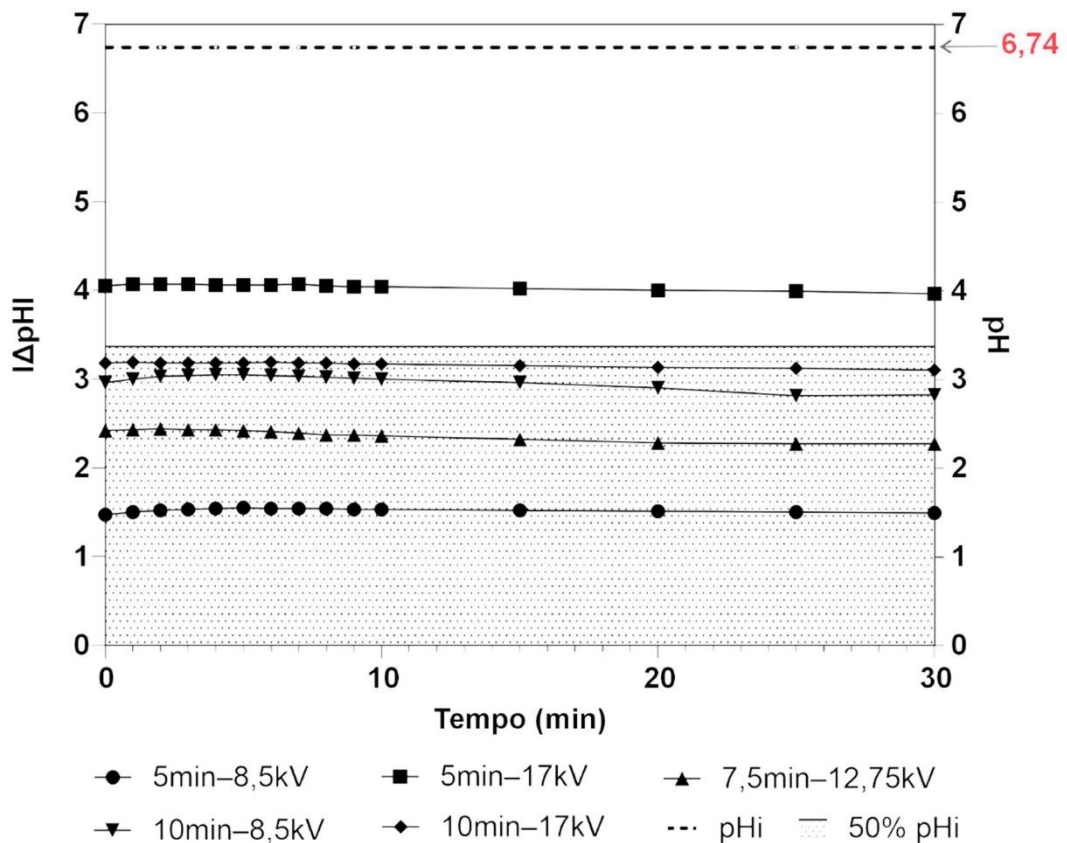
De modo geral, os resultados mostram que, nas condições estudadas, a resposta do pH ao tratamento por plasma é altamente sensível à intensidade da tensão elétrica, enquanto o tempo desempenha um papel secundário. A maior amplitude das alterações observadas em altos níveis de tensão sugere uma intensificação dos processos associados ao tratamento, possivelmente relacionada à maior geração de espécies reativas durante a descarga de plasma.

3.3. Dinâmica temporal nos primeiros 30 minutos

Neste estudo, o ΔpH foi calculado como a diferença entre o pH inicial (pH_i) e o pH imediatamente após o tratamento (pH_0). Dessa forma, valores positivos de ΔpH indicam redução do pH da amostra, ou seja, maior magnitude de acidificação. Assim, valores mais elevados de ΔpH correspondem a maior intensidade de queda do pH.

A dinâmica temporal do ΔpH após o tratamento por PNT revelou comportamento estável ao longo dos 30 minutos subsequentes ao desligamento, com variações discretas dentro de cada condição experimental (Figura 3).

Figura 3: Dinâmica temporal do ΔpH nos primeiros 30 minutos após o tratamento por plasma não térmico sob diferentes combinações de tempo e tensão (5 min–8,5 kV; 5 min–17 kV; 7,5 min–12,75 kV; 10 min–8,5 kV; 10 min–17 kV). O ΔpH foi calculado como a diferença entre o pH inicial ($\text{pH}_i = 6,74$) e o pH imediatamente após o tratamento. Valores mais altos de ΔpH correspondem a maior intensidade de acidificação. A linha pontilhada representa o valor equivalente a 50% do pH inicial (3,37).



As condições de maior tensão (17 kV) apresentaram a maior intensidade de acidificação, refletida pelos valores mais elevados de ΔpH . Tanto em 5 min–17 kV quanto em 10 min–17 kV, observou-se apenas um discreto aumento do pH ao longo do tempo, evidenciado pela leve redução do ΔpH . Sugere-se que a intensa acidificação inicial resulte da formação de espécies reativas durante o tratamento por plasma, responsáveis pela queda brusca do pH. A discreta diminuição de ΔpH nos minutos seguintes indica que parte dessas espécies permanece ativa ou em equilíbrio no meio, sustentando a acidificação ao longo do tempo.

Nas tensões intermediárias (7,5 min–12,75 kV), observou-se comportamento semelhante: uma queda inicial expressiva do pH, seguida de um leve aumento ao longo do tempo (com ΔpH passando de 2,42 para 2,27 entre 0 e 30 minutos). Isso indica que, embora a acidificação inicial também tenha sido significativa, houve uma pequena atenuação ao longo do período monitorado.

Já nas condições de baixa tensão (5 min–8,5 kV e 10 min–8,5 kV), o ΔpH apresentou apenas uma queda modesta imediatamente após o tratamento, com valores variando de 1,49 a 2,82 aos 30 minutos, refletindo menor produção de espécies reativas e, conseqüentemente, menor intensidade de acidificação.

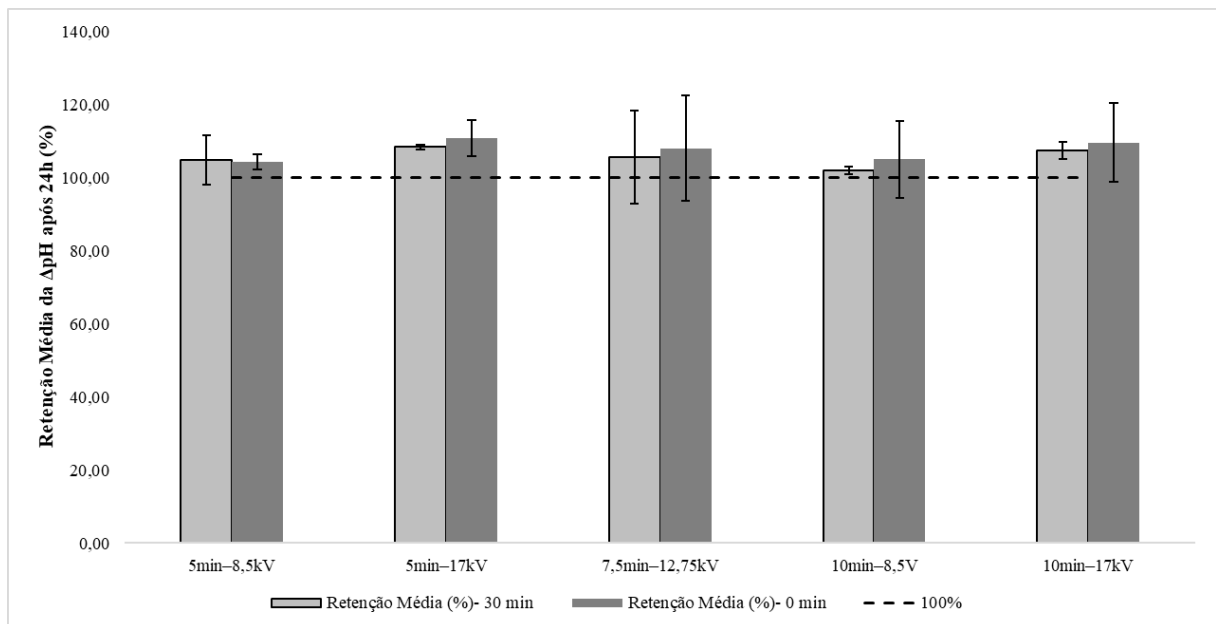
A análise dos valores de ΔpH imediatamente após o tratamento mostra que apenas a condição 5 min–17 kV ultrapassou claramente 50% da média do pH inicial ($\text{pH}_i = 6,74$), atingindo $\Delta\text{pH} = 4,05$ no tempo zero. Esse valor implica que o pH da amostra caiu para aproximadamente 2,72, refletindo uma acidificação bastante intensa logo após a exposição ao plasma. A condição 10 min–17 kV, embora não ultrapasse esse limiar, apresentou $\Delta\text{pH} = 3,18$, aproximando-se do patamar de referência e indicando um efeito acidificante expressivo, ainda que ligeiramente menos pronunciado. Todas as demais combinações de tempo e tensão ficaram substancialmente abaixo desse valor, demonstrando menor capacidade de alterar o pH de forma acentuada. Esses resultados reforçam que a tensão é o principal determinante da magnitude da acidificação ao longo do tempo, enquanto o aumento do tempo atua de forma secundária, ampliando o ΔpH , mas sem atingir a eficácia observada nas condições de maior tensão.

3.4. Estabilidade após 24 Horas

A estabilidade do efeito acidificante induzido pelo plasma foi avaliada por meio do cálculo da retenção (%), que expressa o quanto do ΔpH observado após o tratamento, considerando como referência o valor medido imediatamente (0 min) ou após 30 minutos, é

mantido após 24 horas. Para interpretação, valores de retenção próximos de 100% indicam manutenção da acidificação; valores inferiores a 100% refletem perda parcial do efeito ao longo do tempo (a solução tornou-se menos ácida); e valores superiores a 100% indicam intensificação tardia da acidificação, evidenciando que o meio ficou ainda mais ácido após 24 horas em comparação ao momento de referência. A Figura 4 apresenta a retenção percentual calculada em relação aos ΔpH de 0 min e 30 min, permitindo comparar a persistência do efeito induzido pelo plasma em dois momentos distintos do processo de estabilização pós-tratamento.

Figura 4: Retenção relativa da acidificação ($\Delta\Delta\text{pH}$) ao longo do tempo para as diferentes condições experimentais. Os valores foram normalizados em relação ao tempo inicial (0 min), definido como 100%. Valores de retenção próximos de 100% indicam manutenção da acidificação; valores inferiores a 100% refletem perda parcial do efeito ao longo do tempo; e valores superiores a 100% indicam intensificação tardia da acidificação. Cada grupo de barras representa uma combinação específica de tempo de tratamento e tensão aplicada no reator de plasma não-térmico.



A retenção do efeito acidificante induzido pelo plasma foi avaliada comparando-se o ΔpH observado após 24 horas em relação aos valores registrados imediatamente após o tratamento (0 min) e 30 minutos após o tratamento. Em ambas as abordagens, todas as condições testadas apresentaram retenção superior a 100%, indicando que o meio se tornou

ainda mais ácido ao longo do período de 24 horas, independentemente do tempo ou da tensão aplicada.

Quando a retenção foi calculada com base no ΔpH aos 30 minutos, observaram-se valores variando entre 101,90% e 108,31%. As condições 5 min–17 kV ($108,31\% \pm 0,65$) e 10 min–17 kV ($107,37\% \pm 2,29$) apresentaram as maiores retenções, sugerindo intensificação mais pronunciada da acidificação com o passar do tempo. Mesmo as condições com menor retenção relativas, como 10 min–8,5 kV ($101,90\% \pm 1,02$), permaneceram acima de 100%, demonstrando que a acidificação não apenas foi mantida, mas ampliada após 24 horas.

A análise baseada no ΔpH registrado imediatamente após o tratamento (0 min) revelou tendência semelhante. Os valores de retenção variaram entre 104,33% e 110,75%, destacando-se novamente a condição 5 min–17 kV, que atingiu $110,75\% \pm 4,97$, seguida de 10 min–17 kV ($109,52\% \pm 10,84$). Esses resultados reforçam que a intensificação da acidificação ocorre independentemente do tempo inicial de referência adotado.

Desta forma, os resultados demonstram que nenhuma das condições estudadas apresentou perda do efeito acidificante. Pelo contrário, todas mostraram evolução do processo, com maior acidificação após 24 horas. Esses achados sugerem que o sistema apresenta dinâmica reativa prolongada, na qual a atividade química iniciada pelo plasma continua se desenvolvendo mesmo após o término da descarga elétrica.

3.5. Influência dos fatores operacionais

3.5.1. Estimativa dos efeitos principais

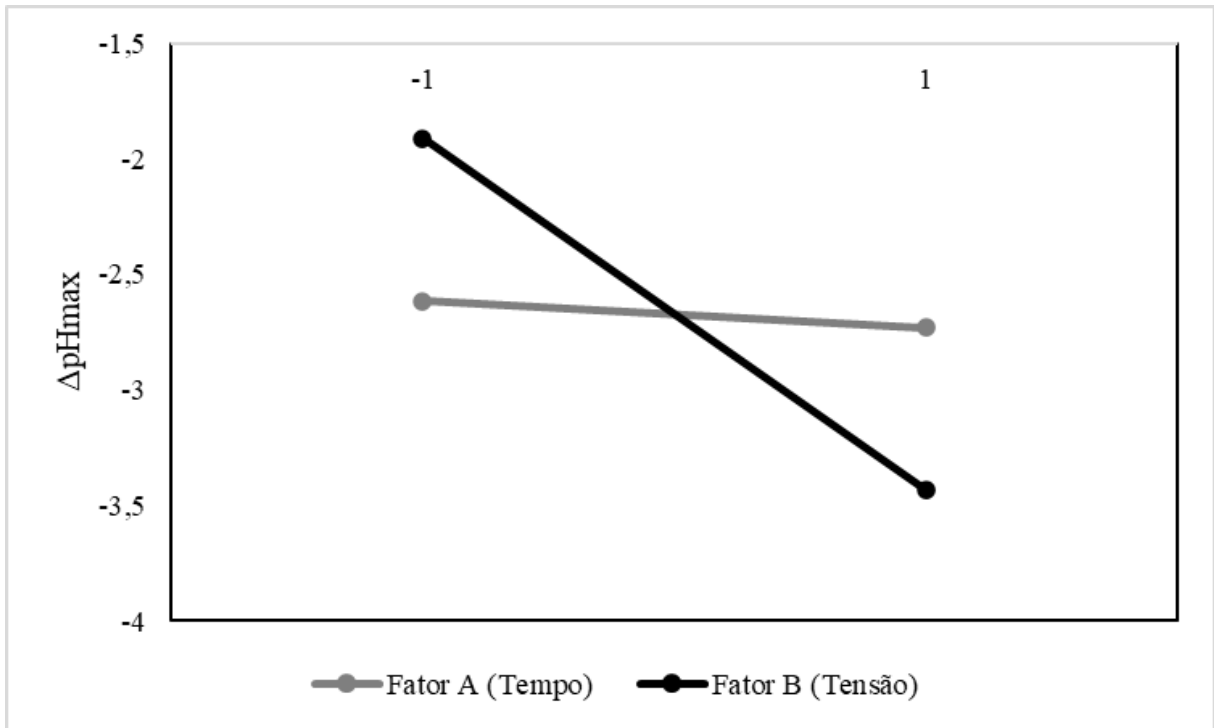
Os efeitos principais foram determinados a partir da diferença entre as médias da resposta nos níveis codificados +1 (nível alto) e -1 (nível baixo), conforme o delineamento fatorial completo 2^2 adotado, de acordo com a Equação (3):

$$E_i = Y_{(+1)} - Y_{(-1)} \quad (3)$$

em que E_i representa o efeito do fator i , e $Y_{(+1)}$ e $Y_{(-1)}$ correspondem às médias da resposta nos respectivos níveis codificados.

Os efeitos estimados foram: $E_{A=} = -0,115$ e $E_B = -1,525$, como apresentado na Figura 5.

Figura 5: Efeitos principais dos fatores A e B sobre o $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$.



Observa-se que o fator B apresentou efeito negativo de maior magnitude, indicando influência predominante no comportamento do $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$. Isso significa que o aumento da tensão reduz substancialmente a variação máxima do pH, evidenciando que a intensidade do campo elétrico é o principal parâmetro de controle do processo nas condições avaliadas.

Em contraste, o fator A (tempo) apresentou efeito negativo pouco expressivo, sugerindo que variações dentro da faixa estudada (5–10 minutos) não promovem alterações relevantes no $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$. Esse comportamento é consistente com os resultados temporais prévios, que mostraram estabilização da acidificação já nos minutos iniciais do tratamento.

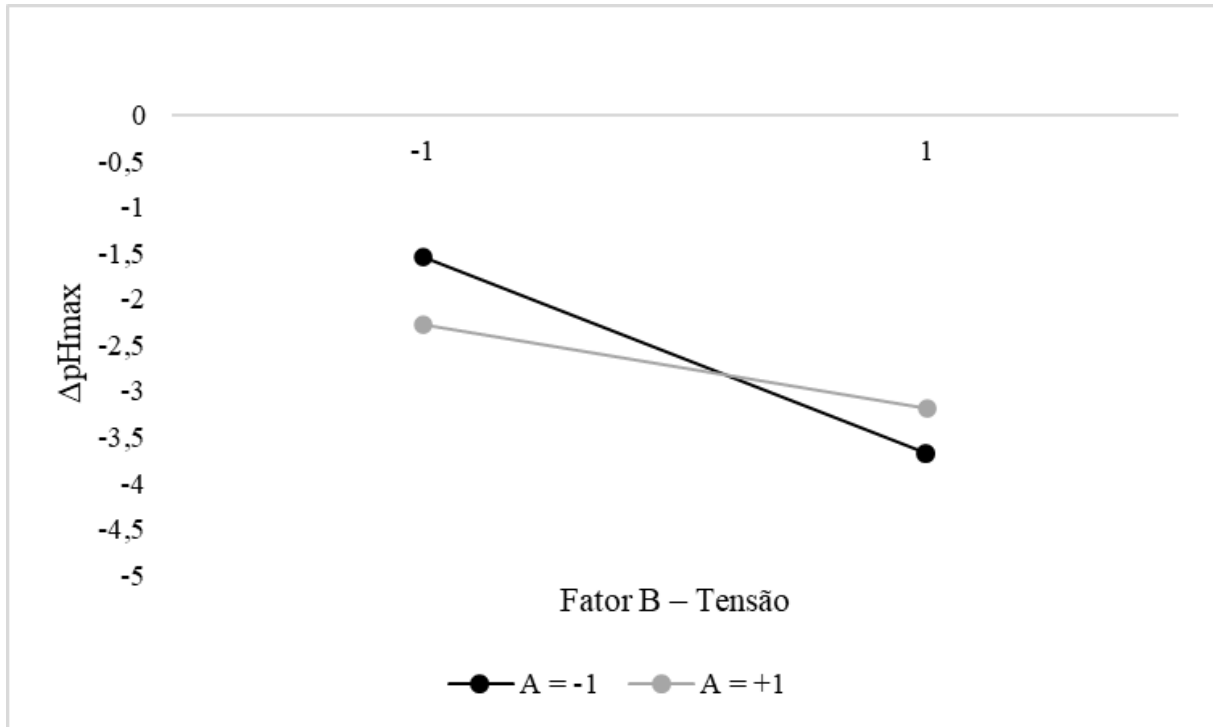
Além disso, a maior magnitude do efeito associado à tensão reforça que o sistema responde mais fortemente ao aumento da energia instantânea aplicada do que ao prolongamento do tempo de exposição, indicando que a formação das espécies reativas responsáveis pela acidificação é mais sensível ao regime elétrico do que à duração do tratamento.

Esses resultados, em conjunto, demonstram que a otimização do processo deve priorizar o ajuste da tensão aplicada, uma vez que esse fator é determinante para o controle e a eficiência do $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$, enquanto o tempo atua de forma secundária.

3.5.2. Interação entre os fatores A e B sobre o ΔpH_{max}

A Figura 6 apresenta o gráfico de interação entre os fatores A e B sobre o ΔpH_{max} .

Figura 6: Interação entre os fatores A e B sobre o ΔpH_{max} , evidenciando variação não paralela das linhas e dependência entre os fatores no intervalo experimental avaliado.



A análise do gráfico de interação revelou que o efeito do fator B (tensão) sobre o ΔpH_{max} depende claramente do nível do fator A (tempo de tratamento), indicando a presença de interação entre os fatores no delineamento fatorial 2².

Quando $A = -1$, o aumento do nível de B promoveu uma redução expressiva no ΔpH_{max} , passando de $-1,55$ para $-3,68$, o que representa intensificação marcante da acidificação sob maior tensão. Por outro lado, quando $A = +1$, a variação observada foi menos acentuada, com ΔpH_{max} passando de $-2,27$ para $-3,19$, indicando que, em tempos mais longos, a sensibilidade do sistema ao aumento da tensão é menor.

Essa diferença nas inclinações das linhas de A confirma a presença de interação, indicando que o efeito da tensão (B) é mais intenso nos tempos mais curtos e menos pronunciado nos tempos mais longos.

Embora não ocorra cruzamento das linhas, o que caracterizaria interação forte, a divergência clara entre suas inclinações evidencia uma interação moderada, coerente com o efeito de interação estimado no modelo.

Esse comportamento sugere que, em tempos curtos, a aplicação de maior tensão favorece a formação mais intensa de espécies reativas responsáveis pela acidificação; em tempos longos, parte dessas espécies já pode ter sido consumida ou estabilizada, reduzindo a diferença entre os níveis de tensão. Assim, a interação observada reflete não apenas uma relação estatística entre fatores, mas também um comportamento dinâmico do sistema de plasma, no qual a disponibilidade temporal das espécies reativas influencia a forma como a tensão afeta a acidificação.

A regressão do modelo fatorial 2^2 apresentou ajuste moderado ($R^2 = 0,36$; R^2 ajustado = $0,25$) e significância global ($p = 0,049$), indicando que os fatores explicam parte relevante da variação do $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$ (Tabela 2). Entre os termos avaliados, apenas o fator B (tensão) foi estatisticamente significativo ($p = 0,0108$), confirmando sua predominância na resposta. O fator A (tempo) e o termo de interação $A \times B$ não foram significativos ($p > 0,33$), demonstrando contribuição limitada. Esses resultados corroboram as análises anteriores, indicando que a tensão é o principal parâmetro responsável pela variação do $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$ nas condições estudadas.

Tabela 2: Parâmetros estimados do modelo de regressão linear para o $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$.

Coefficientes estimados para o modelo de regressão linear aplicado ao delineamento fatorial 2^2 , considerando os efeitos principais (A e B) e o termo de interação ($A \times B$) sobre o $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$. O fator B (tensão) apresentou o único efeito estatisticamente significativo ($p < 0,05$), indicando maior influência sobre a intensidade da acidificação. Os fatores A (tempo) e $A \times B$ não foram significativos no intervalo experimental avaliado.

Termo	Coefficiente	Erro Padrão	t	p- valor	IC 95% Inferior	IC 95% Superior
Intercepto	-2,6257	0,1705	-15,3959	$2,0 \times 10^{-11}$	-2,9855	-2,2659
Código A	-0,1508	0,2256	-0,6686	0,5128	-0,6268	0,3252
Código B	-0,6458	0,2256	-2,8626	0,0108	-1,1218	-0,1698
A x B	0,2242	0,2256	0,9936	0,3344	-0,2518	0,7002

4. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no presente estudo mostram que a tensão elétrica (fator B) foi o principal determinante do $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$, apresentando o único efeito estatisticamente significativo no modelo fatorial ($p = 0,0108$). Esse comportamento é consistente com estudos prévios que demonstram que tensões mais elevadas intensificam o campo elétrico, aumentam a densidade de descarga e elevam a concentração de espécies reativas formadas na interface plasma-líquido (Bruggeman & Leys, 2009; Weltmann et al., 2019). Assim, níveis mais altos de B favorecem a formação de ROS e RNS, tais como $\bullet\text{OH}$, O_3 , H_2O_2 , $\text{NO}\bullet$, NO_2^- e NO_3^- , que contribuem diretamente para a acidificação do meio.

A acidificação observada está de acordo com mecanismos amplamente descritos na literatura, nos quais a dissolução de espécies reativas gasosas e sua subsequente transformação química no líquido levam à formação de ácidos fortes e fracos (CUBAS et al., 2021). Por exemplo, NO e NO_2 gerados na descarga podem reagir com O_2 e H_2O formando nitrito e nitrato, que por sua vez contribuem para a produção de HNO_2 e HNO_3 , aumentando a concentração de H^+ (Lukes et al., 2014; Graves, 2014). De forma semelhante, a oxidação de água pela descarga pode produzir espécies como $\bullet\text{OH}$ e $\text{HO}_2\bullet$, que participam de cadeias reativas que também resultam na liberação de prótons (CUBAS et al., 2021). Esses processos explicam a queda significativa de pH observada especialmente nos níveis altos de B.

Por outro lado, o tempo de tratamento (fator A) apresentou efeito pequeno e não significativo. Esse comportamento sugere que a maior parte da produção de espécies reativas ocorre nos primeiros instantes da descarga, seguido por um regime de saturação em que o incremento temporal deixa de promover mudanças expressivas no ΔpH . Bruggeman et al. (2016) descrevem fenômeno similar em sistemas de plasma líquido, indicando que a taxa de geração de espécies reativas tende a se estabilizar à medida que o equilíbrio químico e físico do sistema é alcançado. Assim, dentro do intervalo estudado, aumentar o tempo de exposição não foi decisivo para intensificar a acidificação.

A análise de interação revelou inclinações distintas entre os níveis de A, indicando certo grau de dependência entre os fatores: o efeito da tensão é mais pronunciado em tempos curtos e ligeiramente reduzido em tempos maiores. Entretanto, a não significância estatística da interação na regressão sugere que essa modulação é limitada e não altera o padrão predominante. Esse resultado reforça que a tensão se comporta como o verdadeiro parâmetro

controlador do processo, sendo responsável pela maior parte da variabilidade observada no $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$.

Um achado relevante foi a tendência de retenção superior a 100% em várias condições, indicando intensificação tardia da acidificação após 24 horas. Esse fenômeno já foi descrito em literatura sobre química pós-descarga, sendo atribuído à continuidade das reações em solução mesmo após o término do tratamento (Lukes et al., 2014; Puač et al., 2018). Processos como a oxidação progressiva de nitrito a nitrato, a decomposição lenta de peróxidos ou a hidrólise de espécies nitrogenadas podem liberar H^+ ao longo do tempo, explicando a redução adicional do pH em algumas condições experimentais. Esse comportamento sugere que o meio tratado não atinge equilíbrio químico imediato e que espécies de meia-vida intermediária desempenham papel relevante na evolução temporal do sistema.

Do ponto de vista operacional, os resultados trazem implicações importantes para a otimização de reatores de plasma não-térmico. Como o fator B domina a resposta, ajustes na tensão aplicada são mais eficazes para modular a acidificação do meio do que mudanças no tempo de exposição. Esse comportamento favorece processos de tratamento mais rápidos e energeticamente eficientes, uma vez que a maior parte da resposta desejada é obtida nos instantes iniciais. Além disso, a presença de intensificação tardia indica que, para aplicações que demandam controle preciso do pH, como desinfecção, modificação química de efluentes ou geração de oxidantes, deve-se considerar não apenas o efeito imediato, mas também a evolução pós-tratamento.

Portanto, o conjunto dos resultados reforça que a acidificação induzida por plasma é fortemente dependente do regime elétrico, com participação secundária do tempo e influência limitada da interação entre os fatores. Esses achados estão alinhados com a literatura sobre plasma líquido e contribuem para a compreensão dos mecanismos de geração e persistência de espécies reativas no sistema, oferecendo subsídios para a operação otimizada de reatores visando controle químico eficiente do meio.

5. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que o plasma não-térmico é capaz de promover acidificação imediata e expressiva em água destilada, sendo a tensão elétrica aplicada o principal parâmetro responsável pela magnitude do efeito. A análise estatística confirmou a

predominância desse fator, enquanto o tempo de exposição exerceu influência secundária e a interação entre os fatores não se mostrou significativa no intervalo experimental adotado.

A dinâmica temporal evidenciou que a maior parte da redução de pH ocorre imediatamente após o tratamento, seguida de estabilização e elevada retenção ao longo das 24 horas subsequentes, indicando formação de espécies ácidas estáveis e persistentes na fase líquida. Os resultados também sugerem que, embora algumas condições apresentem reações pós-tratamento, a resposta geral é fortemente controlada pela densidade de espécies reativas geradas a partir da descarga elétrica.

De modo geral, os achados reforçam que o controle preciso da tensão elétrica deve ser priorizado em aplicações de plasma voltadas à modulação do pH, como processos de oxidação avançada, ativação de água, desinfecção e tratamento de efluentes contendo espécies recalcitrantes. Além disso, a compreensão dos mecanismos de formação e estabilização das espécies acidificantes é fundamental para o aperfeiçoamento de reatores e para o desenvolvimento de sistemas de plasma aplicados ao tratamento ambiental.

Futuras investigações podem explorar intervalos maiores de tensão e tempo, monitoramento direto de espécies nitrogenadas e oxidantes, bem como a aplicação do método em matrizes mais complexas, como águas reais de processo ou efluentes industriais, ampliando o potencial de uso tecnológico do plasma não-térmico.

REFERÊNCIAS

CAPÍTULO 1

ADAMOVICH, I. et al. The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology. **Journal of Physics D: Applied Physics**, [S. l.], v. 50, n. 32, p. 323001, jul. 2017. DOI: 10.1088/1361-6463/aa76f5. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa76f5>. Acesso em: 29 jan. 2026.

ADAMU, A. B. et al. Seasonal Variation of Physicochemical Properties in the Lower River Benue, Nigeria. **Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research**, [S. l.], v. 26, n. 11, p. 103-112, 2024. DOI: <https://doi.org/10.9734/ajfar/2024/v26i11839>. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/ajfar/2024/v26i11839>. Acesso em: 26 jan. 2026.

AHUJA, Satinder (Ed.). **Handbook of Water Purity and Quality**. 2. ed. San Diego, CA: Academic Press/Elsevier, 2021. E-book. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=67QjEAAAQBAJ>. Acesso em: 21 jan. 2026.

AKPOR, O. B.; AJINDE, A. O.; DAYO-OLAGBENDE, O. G. Non-Thermodynamic Equilibrium Plasma, an Oxidation Process for Environmental Protection: Principles, Mechanisms, and Prospects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE, ENGINEERING AND BUSINESS FOR DRIVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SEB4SDG), 2024. **Anais...** Ogbomoso: [s. n.], 2024. p. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/SEB4SDG60871.2024.10630325>. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SEB4SDG60871.2024.10630325>. Acesso em: 28 jan. 2026.

AL-SHARIFY, Zainab T. et al. **Estudo investigativo sobre a interação e aplicações da água ativada por plasma (PAW)**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND ADVANCED TECHNOLOGY (ICEAT), 2020, Assiut. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S. l.]: IOP Publishing, 2020. v. 870. p. 012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012042>. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012042>. Acesso em: 14 jan. 2026.

ALWAN, Ghanim. PH control problems of a wastewater treatment plant. **Al-Khwarizmi Engineering Journal**, [S. l.], v. 4, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320191097_PH_Control_Problems_of_a_Wastewater_Treatment_Plant. Acesso em: 26 jan. 2026.

AMIN, M. M. et al. A review on wastewater disinfection. **International Journal of Environmental Health Engineering**, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 22, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4103/2277-9183.113209>. Acesso em: 06 jan. 2026.

AMIRSARDARI, Y.; YU, Q.; WILLIAMS, P. Effect of ozonation and UV irradiation with direct filtration on disinfection and disinfection by-product precursors in drinking water treatment. **Environmental Technology**, [S. l.], v. 22, n. 9, p. 1015-1023, 2001. DOI: 10.1080/09593332208618219. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593332208618219>. Acesso em: 22 jan. 2026.

ANDRER, E. L. et al. Variability in the chemistry of private drinking water supplies and the impact of domestic treatment systems on water quality. **Environmental Geochemistry and**

Health, v. 38, n. 6, p. 1313-1332, dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9798-0>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5095163/>. Acesso em: 18 fev. 2026.

ARAÚJO, K. S.; ANTONELLI, R.; GAYDECZKA, B.; GRANATO, A. C.; MALPASS, G. R. P. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. **Ambiente & Água**, v. 11(2): 387-401, 2016.

ASGHAR, A. H.; AHMED, O. B.; GALALY, A. R. Inactivation of E. coli Using Atmospheric Pressure Plasma Jet with Dry and Wet Argon Discharges. **Membranes**, [S. l.], v. 11, n. 1, 46, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES11010046>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES11010046>. Acesso em: 28 jan. 2026.

ATOBATELE, O. E.; UGWUMBA, O. A. Seasonal variation in the physicochemistry of a small tropical reservoir (Aiba Reservoir, Iwo, Osun, Nigeria). **African Journal of Biotechnology**, [S. l.], v. 7, n. 12, p. 1962-1971, 2008. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJB2008.000-5043>. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/AJB2008.000-5043>. Acesso em: 26 jan. 2026.

BARJASTEH, A. et al. Recent Progress in Applications of Non-Thermal Plasma for Water Purification, Bio-Sterilization, and Decontamination. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 11, n. 8, 3372, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/APP11083372>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/APP11083372>. Acesso em: 28 jan. 2026.

BISCHOFF, A. *Desinfektion von behandeltem Abwasser - Vergleich verschiedener Desinfektionsverfahren*. 2015. Tese (Doutorado) – Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.0253/TUPRINTS-00004385>. Acesso em: 06 jan. 2026.

BOGAERTS, A. et al. The 2020 plasma catalysis roadmap. **Journal of Physics D: Applied Physics**, [S. l.], v. 53, 443001, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9048>. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9048>. Acesso em: 29 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 4 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 05 mar. 2025.

BRISSET, J. L.; PAWLAT, J. **Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water**. Plasma Chemistry and Plasma Processing, [S. l.], v. 36, p. 355-381, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-015-9653-6>. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11090-015-9653-6>. Acesso em: 14 jan. 2026.

BRUGGEMAN, P. J. et al. Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. **Plasma Sources Science and Technology**, [S. l.], v. 25, n. 5, p. 053002, set. 2016. DOI: 10.1088/0963-0252/25/5/053002. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>. Acesso em: 29 jan. 2026.

CARLSON, Mark A.; HARDY, Douglas. Operators can adjust pH, contact time, and chlorine dosage to promote disinfection while retarding formation of disinfection by-products.

In: **CONFERÊNCIA ANUAL DA AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION**, 1998. Anais eletrônicos 1998. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:24006373>. Acesso em: 18 fev. 2026.

CASTRO-JIMÉNEZ, Camilo C. et al. A coagulation process combined with a multi-stage filtration system for drinking water treatment: an alternative for small communities. **Water**, [S. l.], v. 14, n. 20, 3256, 2022. DOI: 10.3390/w14203256. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/20/3256>. Acesso em: 22 jan. 2026.

CAPITELLI, M. et al. Thermodynamics, Transport and Kinetics of Equilibrium and Non-Equilibrium Plasmas: A State-to-State Approach. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 427, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-011-9339-7>. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11090-011-9339-7>. Acesso em: 29 jan. 2026.

CHAVAN, P.; SINGH, G. P.; YADAV, R. Cold Plasma Processing for Fortification of Food. In: SINGH, G. P. et al. (Ed.). **Non-Thermal Food Processing Operations**. Boca Raton: CRC Press, 2024. p. 59-86. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003436560-4>. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781003436560-4>. Acesso em: 28 jan. 2026.

CHEN, J. et al. Efficient disinfection of combined sewer overflows by ultraviolet/peracetic acid through intracellular oxidation with preserving cell integrity. **Water Research**, [S. l.], v. 260, 121959, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121959>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121959>. Acesso em: 27 jan. 2026.

CHEN, X. et al. Characteristics and applications of plasma assisted chemical processes and reactors. **Current Opinion in Chemical Engineering**, [S. l.], v. 17, p. 68-77, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2017.07.001>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2017.07.001>. Acesso em: 28 jan. 2026.

CUBAS, A. et al. Effect of chemical species generated by different geometries of air and argon non-thermal plasma reactors on bacteria inactivation in water. **Separation and Purification Technology**, v. 222, p. 68-74, 2019.

DUARTE, A. de S. **Reuso de água residuária tratada na irrigação da cultura do pimentão (*Capsicum annun L.*)**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.11.2007.tde-01102007-115214>. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.11.2007.tde-01102007-115214>. Acesso em: 28 jan. 2026.

DU SHUANG-LEI. Aplicação da desinfecção com cloro na água potável e seus problemas. In: **CONGRESSO (ou SIMPÓSIO, ou CONFERÊNCIA)**, 2012, Local. **Anais...** Local: Editora, 2012. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:100419661>. Acesso em: 10 mar. 2026.

ELIASSON, B. et al. Methane conversion to C2 hydrocarbons and hydrogen in atmospheric non-thermal plasmas generated by different electric discharge techniques. **Catalysis Today**, [S. l.], v. 98, n. 1-2, p. 287-294, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2004.09.048>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2004.09.048>. Acesso em: 29 jan. 2026.

ERCAN, U. K. et al. Chemical changes in nonthermal plasma-treated N-acetylcysteine (NAC) solution and their contribution to bacterial inactivation. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 6, 20365, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep20365>. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep20365>. Acesso em: 29 jan. 2026.

FERNANDES, Kayo Cesar Bianco *et al.* **Detecção e quantificação de contaminação fecal hospedeiro-específico em águas destinadas ao abastecimento público.** Tese de Doutorado. 2015.

FERRELL, J. R.; GALOV, R. S. Characterization, Properties and Applications of Nonthermal Plasma: A Novel Pulsed-Based Option. **Journal of Biotechnology & Biomaterials**, [S. l.], v. 3, n. 3, 155, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4172/2155-952X.1000155>. Disponível em: <https://doi.org/10.4172/2155-952X.1000155>. Acesso em: 28 jan. 2026.

FITZPATRICK, Caroline S.; GREGORY, John. Coagulation and filtration. In: MARA, Duncan; HORAN, Nigel (Org.). **Handbook of water and wastewater microbiology**. [S. l.]: Academic Press, 2003. p. 633-655. ISBN 9780124701007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-012470100-7/50039-X>. Acesso em: 22 jan. 2026.

FRIDMAN, A. *Plasma Chemistry*. New York: Cambridge University Press, 2008. 1022 p.

GAO, S.-H. **Bacteriostatic and bactericidal effects of free nitrous acid on model microbes in wastewater treatment.** 2017. Tese (Doutorado em Engenharia) – The University of Queensland, Brisbane, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.14264/UQL.2017.332>. Acesso em: 27 jan. 2026.

GARCEZ, Gilner Augusto Salgueiro. Padrão de potabilidade, controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano. **Caderno Saúde e Desenvolvimento**, São Paulo, v. 8, n. 5, p. 31-49, jan./jun. 2016.

GERBA, C. P. Chapter 29 – **Disinfection**. In: PEPPER, I. L.; GERBA, C. P.; GENTRY, T. J. (Ed.). *Environmental Microbiology*. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 645-662. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394626-3.00029-6>. Acesso em: 29 dez. 2025.

GE, Y. et al. Kinetics and Mechanisms of Virus Inactivation by Chlorine Dioxide in Water Treatment: A Review. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, [S. l.], v. 106, n. 4, p. 560–567, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03137-3>. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03137-3>. Acesso em: 27 jan. 2026.

GHERNAOUT, D.; ELBOUGHDIRI, N. Is not it time to stop using chlorine for treating water? **Open Access Library Journal**, [S. l.], v. 7, e6007, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4236/oalib.1106007>. Disponível em: <https://www.oalib.com/articles/6007>. Acesso em: 10 mar. 2026.

GOONETILLEKE, A.; LAMPARD, J.-L. Stormwater Quality, Pollutant Sources, Processes, and Treatment Options. In: **Approaches to Water Sensitive Urban Design**. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 49-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812843-5.00003-4>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128128435000034>. Acesso em: 12 mar. 2026.

GUO, He et al. Review on application of non-thermal plasma for disinfection: Direct plasma and indirect plasma-activated water. **Chinese Chemical Letters**, v. 37, n. 2, p. 111275, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2025.111275>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001841725004607>. Acesso em: 18 fev. 2026.

HAMMAD, R.; G. JASIM, M. Impact of plasma-activated water on breast cancer cell viability. **Karbala International Journal of Modern Science**, [S. l.], v. 11, n. 3, 2025.

- DOI: <https://doi.org/10.33640/2405-609X.3426>. Disponível em: <https://www.kijoms.com/journal/vol11/iss3/>. Acesso em: 12 mar. 2026.
- HIJNEN, W. A. M.; MEDEMA, G. J. *Elimination of micro-organisms by water treatment processes: a review*. Utrecht: [s.n.], 2007. 138 p. Disponível em: <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/35224>.
- HUCK, P. M.; SOZAŃSKI, M. Chemical Basis for Water Technology. In: WILDERRER, P. (Ed.). **Treatise on Water Science**. [S. l.]: Elsevier, 2011. v. 3, p. 429-469. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00069-5>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00069-5>. Acesso em: 21 jan. 2026.
- ILYAS, Huma; MASHI, Ilyas; VAN DER HOEK, Jan Peter. Disinfection methods for swimming pool water: byproduct formation and control. **Water**, [S. l.], v. 10, n. 6, 797, 2018. DOI: [10.3390/w10060797](https://doi.org/10.3390/w10060797). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/6/797>. Acesso em: 22 jan. 2026.
- JABŁOŃSKA, B. et al. Removal of Pb(II), Cd(II) and Ni(II) Ions from Groundwater by Nonthermal Plasma. **Materials**, [S. l.], v. 15, n. 15, 5426, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15155426>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15155426>. Acesso em: 26 jan. 2026.
- JIANG, Bo et al. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. **Chemical Engineering Journal**, [S. l.], v. 236, p. 348-368, 2014. DOI: [10.1016/j.cej.2013.09.090](https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894713012941>. Acesso em: 29 jan. 2026.
- JOSHI, I. et al. Characterization of microbial inactivation using plasma-activated water and plasma-activated acidified buffer. **Journal of Food Protection**, [S. l.], v. 81, n. 9, p. 1472-1480, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-17-487>. Disponível em: <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-17-487>. Acesso em: 29 jan. 2026.
- KARIMIAN, S.; SHARIAT, M.; MASHAYEKHI, H. Compreensão aprofundada da descoloração do azul de metileno usando plasma pulsado não térmico: abordagens experimentais e de modelagem. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 15, 32989, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16554-9>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-16554-9>. Acesso em: 12 mar. 2026.
- KIM, Y. H.; HENSLEY, R. Effective control of chlorination and dechlorination at wastewater treatment plants using redox potential. **Water Environment Research**, [S. l.], v. 69, n. 5, p. 1008-1014, 1997. DOI: <https://doi.org/10.2175/106143097X125704>. Disponível em: <https://doi.org/10.2175/106143097X125704>. Acesso em: 26 jan. 2026.
- KUMAR, A. et al. Cold atmospheric plasma technology for removal of organic micropollutants from wastewater—a review. **European Physical Journal D**, [S. l.], v. 75, 283, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00283-5>. Disponível em: <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00283-5>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- LAROUSSE, M.; LU, X.; KEIDAR, M. Perspective: The physics, diagnostics, and applications of atmospheric pressure low temperature plasma sources used in plasma medicine. **Journal of Applied Physics**, [S. l.], v. 122, n. 2, p. 020901, 2017. DOI: [10.1063/1.4993710](https://doi.org/10.1063/1.4993710). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4993710>. Acesso em: 29 jan. 2026.

LECHEVALLIER, M. W.; AU, K.-K. *Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking-Water*. London: IWA Publishing, 2004. E-book. Disponível em: <https://iwaponline.com/ebooks/book/608/Water-Treatment-and-Pathogen-Control-Process>. Acesso em: 06 jan. 2026.

LIU, D. et al. Aqueous reactive species induced by a surface air discharge: Heterogeneous mass transfer and liquid chemistry pathways. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 6, 23737, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep23737>. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep23737>. Acesso em: 29 jan. 2026.

LIU, Z. et al. Post-discharge evolution of reactive species in the water activated by a surface air plasma: a modeling study. **Journal of Physics D: Applied Physics**, [S. l.], v. 51, n. 20, 205201, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aab635>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/aab635>. Acesso em: 12 mar. 2026.

LOCKE, Bruce R.; SHIH, Kai-Yuan. Review of the methods to form hydrogen peroxide in electrical discharge plasma with liquid water. **Plasma Sources Science and Technology**, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 034006, 2011. DOI: 10.1088/0963-0252/20/3/034006. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0963-0252/20/3/034006>. Acesso em: 29 jan. 2026.

LU, F. et al. Monitoring the dynamic process of non-thermal plasma decontaminated water with Raman spectroscopy real-time analysis system. **Journal of Water Process Engineering**, [S. l.], v. 56, 104387, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104387>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104387>. Acesso em: 02 fev. 2026.

MACHALA, Z. et al. Formation of ROS and RNS in water electro-sprayed through transient spark discharge in air and their bactericidal effects. **Plasma Processes and Polymers**, [S. l.], v. 10, n. 7, p. 649-659, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppap.201200113>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppap.201200113>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MURUGESAN, P. et al. Water decontamination using non-thermal plasma: concepts, applications, and prospects. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S. l.], v. 8, n. 5, 104377, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104377>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343720307260>. Acesso em: 12 mar. 2026.

MAGUREANU, M.; MANDACHE, N. B.; PARVULESCU, V. I. Degradation of pharmaceutical compounds in water by non-thermal plasma treatment. **Water Research**, [S. l.], v. 81, p. 124-136, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.037>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.037>. Acesso em: 29 jan. 2026.

MAHY, J. G. et al. Advanced oxidation processes for waste water treatment: from laboratory-scale model water to on-site real waste water. **Environmental Technology**, [S. l.], v. 42, n. 25, p. 3974–3986, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1797894>. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1797894>. Acesso em: 21 jan. 2026.

MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, S. et al. Resistance and Inactivation Kinetics of Bacterial Strains Isolated from the Non-Chlorinated and Chlorinated Effluents of a WWTP. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [S. l.], v. 10, n. 8, p. 3363–3383, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph10083363>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph10083363>. Acesso em: 27 jan. 2026.

MEICHSNER, J. Nonthermal Reactive Plasmas. In: HIPPLER, R. et al. (Ed.). **Low Temperature Plasmas: Fundamentals, Technologies and Techniques**. Berlin: Springer, 2010. p. 211-240. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-10592-0_11. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-10592-0_11. Acesso em: 28 jan. 2026.

METCALF & EDDY (2014). **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. 5ª ed. McGraw-Hill Education.

MONTALBETTI, R. et al. Production and Chemical Composition of Plasma Activated Water: A Systematic Review and Meta-Analysis. **Plasma Processes and Polymers**, [S. l.], 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppap.202400249>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppap.202400249>. Acesso em: 19 fev 2026.

MORAES, N. C. de. **Os impactos de fontes de água inseguras e saneamento inseguro na saúde pública brasileira: uma análise da situação atual frente aos sistemas de saneamento implantados no Brasil**. Revista Latino-americana de Ambiente Construído & Sustentabilidade, São Cristóvão, v. 5, n. 23, p. 324-334, 2024.

MOUSSA, A. S. et al. Fate of Cryptosporidium and Giardia through conventional and compact drinking water treatment plants. **Parasitology Research**, [S. l.], v. 122, n. 11, p. 2491-2501, nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00436-023-07947-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00436-023-07947-8>. Acesso em: 12 mar. 2026.

MUCHA, Z.; KUŁAKOWSKI, P. Turbidity measurements as a tool of monitoring and control of the SBR effluent at the small wastewater treatment plant – preliminary study. **Archives of Environmental Protection**, [S. l.], v. 42, n. 3, p. 61-69, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1515/AEP-2016-0030>. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/AEP-2016-0030>. Acesso em: 26 jan. 2026.

MURUGESAN, P. et al. Water decontamination using non-thermal plasma: Concepts, applications, and prospects. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 104377, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104377>. Acesso em: 05 mar. 2025.

NAEIM, F. A.; HUMUD, H. R. The effect of gas flow rate, exposure times and ageing on the physicochemical properties of water activated by glow discharge plasma jet. **East European Journal of Physics**, [S. l.], n. 2, p. 370-377, 2023. DOI: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-2-43>. Disponível em: <https://periodicals.karazin.ua/eejp/article/view/21982>. Acesso em: 12 mar. 2026.

NGUYEN TAN, T.; TA, A. T.; CHI, N. D. T. Closing the circle: advancements in water reuse and integrated wastewater management for sustainable urban environments. In: CHOUDHURY, M. et al. (Ed.). **Smart Wastewater Systems and Climate Change: Innovations Through Spatial Intelligence**. London: Royal Society of Chemistry, [2025?]. p. 257-268. (Chemistry in the Environment series, ISSN 2516-2624). ISBN (ePUB): 978-1-83767-691-0.

NOGUEIRA, R. F. P.; TROVÓ, A. G.; SILVA, M. R. A. Da; VILLA, R. D. **fundamentos e aplicações ambientais dos processos fenton e foto-fenton**. Química Nova, v.30, n.2, p.400-408, 2007.

OEHMIGEN, K. et al. The role of acidification for antimicrobial activity of atmospheric pressure plasma in liquids. **Plasma Processes and Polymers**, [S. l.], v. 7, n. 3-4, p. 250-257,

2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppap.200900077>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppap.200900077>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- OKAZAKI, Y. et al. Electrodialytic Enrichment and Matrix Conversion for the Determination of Trace Metals in Ultra-Pure Water. **ACS Omega**, [S. l.], v. 7, n. 16, p. 14082–14088, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00648>. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00648>. Acesso em: 21 jan. 2026.
- OKUBO, M. Fundamentals of Nonthermal Plasma Technologies. In: OKUBO, M. (Ed.). **Nonthermal Plasma Surface Modification of Materials**. Singapore: Springer, 2023. p. 1-26. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4506-1_1. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4506-1_1. Acesso em: 29 jan. 2026.
- OMER, N. H. Water Quality Parameters. In: KEVIN, M. (Ed.). **Water Quality - Science, Assessments and Policy**. [S. l.]: IntechOpen, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.89657>. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.89657>. Acesso em: 02 fev. 2026.
- OMS**. *World health statistics: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*. Geneva: World Health Organization, 2020. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/332070/9789240005105-eng.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2025.
- ONU**. *World health statistics: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*. Geneva: World Health Organization, 2020.
- ONU BRASIL**. Agências da ONU lançam relatório mundial sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos. **ONU Brasil**, [S. l.], 22 mar. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/123077-ag%C3%A2ncias-da-onu-lan%C3%A7am-relat%C3%B3rio-mundial-sobre-o-desenvolvimento-dos-recursos-h%C3%ADricos>. Acesso em: 05 mar. 2025.
- OWOSENI, M. C.; OLANIRAN, A. O.; OKOH, A. I. Chlorine Tolerance and Inactivation of *Escherichia coli* recovered from Wastewater Treatment Plants in the Eastern Cape, South Africa. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 7, n. 8, p. 810, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/APP7080810>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/APP7080810>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- PADGETT, E. et al. Performance Losses and Current-Driven Recovery from Cation Contaminants in PEM Water Electrolysis. **Journal of The Electrochemical Society**, [S. l.], v. 171, n. 6, p. 064510, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad576b>. Disponível em: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad576b>. Acesso em: 21 jan. 2025.
- PARK, S.-M. et al. Selective recovery of dissolved Fe, Al, Cu, and Zn in acid mine drainage based on modeling to predict precipitation pH. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 22, n. 5, p. 3013-3022, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3536-x>. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3536-x>. Acesso em: 02 jan. 2026.
- PINTO, M. L.; BALTAZAR, A. L**. Presença de trihalometanos na água: potenciais riscos. **Associação Portuguesa de Nutrição**, v. 21, p. 27-37, 2020
- QI, Y.; HE, K. Science and Technology for Water Purification: Achievements and Strategies. **Water**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 91, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17010091>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w17010091>. Acesso em: 21 jan. 2026.

- QUITON, K. G.; HUANG, Y. H.; LIU, M. Recovery of cobalt and copper from single- and co-contaminated simulated electroplating wastewater via carbonate and hydroxide precipitation. **Sustainable Environment Research**, [S. l.], v. 32, 23, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42834-022-00140-z>. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s42834-022-00140-z>. Acesso em: 02 jan. 2026.
- RABONI, M.; GAVASCI, R.; TORRETTA, V. Assessment of the fate of escherichia coli in different stages of wastewater treatment plants. **Water Air and Soil Pollution**, [S. l.], v. 227, n. 12, p. 1–12, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3157-8>. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3157-8>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- RAGNI, L. et al.** Influence of the electrode material on the decontamination efficacy of dielectric barrier discharge gas plasma treatments towards *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli*. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 37, p. 170-176, 2016.
- RAHMAN, M. et al. Plasma-activated water for food safety and quality: a review of recent developments. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [S. l.], v. 19, n. 11, 6630, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19116630>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/11/6630>. Acesso em: 12 mar. 2026.
- RAMTEKE, P. K.; RATHOD, A. P. Desafios da purificação de água e do tratamento de águas residuais. In: NAMDETI, R.; JOAQUIN, A. A. (Ed.). **Aprendizado de máquina no tratamento de água**. [S. l.]: Wiley, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781394303526.ch4>. Acesso em: 12 mar. 2026.
- REDDY, A. V. B. et al. Simulation of a conventional water treatment plant for the minimization of new emerging pollutants in drinking water sources: process optimization using response surface methodology. **RSC Advances**, [S. l.], v. 7, n. 19, p. 11550-11560, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6RA27733K>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/ra/c6ra27733k>. Acesso em: 12 mar. 2026.
- RODRÍGUEZ-CHUECA, J. et al. Inactivation of pathogenic microorganisms in freshwater using HSO₅⁻/UV-A LED and HSO₅⁻/Mn⁺/UV-A LED oxidation processes. **Water Research**, [S. l.], v. 123, p. 113–123, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.021>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.021>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- ROY, N. C. et al. NO_x synthesis by atmospheric-pressure N₂/O₂ filamentary DBD plasma over water: Physicochemical mechanisms of plasma–liquid interactions. **Plasma Processes and Polymers**, [S. l.], v. 18, n. 3, e2000087, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppap.202000087>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppap.202000087>. Acesso em: 29 jan. 2026.
- RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. de. **Tratamento de água**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1991. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 28 nov 2025.
- SINGH, R. K.; PHILIP, L.; RAMANUJAM, S. Disinfection of water by pulsed power technique: A mechanistic perspective. **RSC Advances**, [S. l.], v. 6, n. 24, p. 1-14, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5RA26941E>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ra/c5ra26941e>. Acesso em: 24 fev. 2026.

SINGH, R.; SINGH, A. P. A Comprehensive Review of Water Quality Assessment Through Physical and Chemical Parameters. **Journal of Advances and Scholarly Research in Allied Education**, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 56-62, 2022. DOI: <https://doi.org/10.29070/7z856p17>. Disponível em: <https://doi.org/10.29070/7z856p17>. Acesso em: 02 fev. 2026.

SOBSEY, M. D. Inactivation of health-related microorganisms in water by disinfection processes. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 179–195, 1989. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1989.0098>. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.1989.0098>. Acesso em: 27 jan. 2026.

TAKAMATSU, T. et al. Microbial Inactivation in the Liquid Phase Induced by Multigas Plasma Jet. **PLoS One**, v. 10, n. 7, e0132381, jul. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132381>. Errata in: **PLoS One**, v. 10, n. 8, e0135546, ago. 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4501802/>. Acesso em: 18 fev. 2026.

TRIANAPHYLLIDOU, I.; AGGELOPOULOS, C. A. Insights on bacteria inactivation in water by cold plasma: Effect of water matrix and pulsed plasmas waveform on physicochemical water properties, species formation and inactivation efficiency of *Escherichia coli*. **Environmental Research**, [S. l.], 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120467>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120467>. Acesso em: 28 jan. 2026.

VOLKOV, Alexander G. et al. **Mechanisms of multielectron reactions at the plasma/water interface: Interfacial catalysis, RONS, nitrogen fixation, and plasma activated water.** **Electrochimica Acta**, [S. l.], v. 385, p. 138441, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138441>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468621007313>. Acesso em: 14 jan. 2026.

WANG, Hexiang et al. **Evaluation of plasma-activated water: Efficacy, stability, physicochemical properties, and mechanism of inactivation against *Escherichia coli*.** **LWT**, [S. l.], v. 184, p. 114969, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114969>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643823005480>. Acesso em: 14 jan. 2026.

WANG, Lei et al. Control of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water by Ferrous Iron-Hydrogen Peroxide Oxidation. **Environmental Engineering Science**, v. 39, n. 2, p. 105-113, 2021. DOI: [10.1089/ees.2020.0481](https://doi.org/10.1089/ees.2020.0481). Acesso em: 18 fev. 2026.

YIN, Y. et al. Recent Progress in Applications of Atmospheric Pressure Plasma for Water Organic Contaminants' Degradation. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 13, n. 23, 12631, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132312631>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app132312631>. Acesso em: 19 fev 2026.

YU, Q. et al. Influent pollutant monitoring in decentralised treatment facilities using electrical conductivity sensors: experimental and modelling insights. **Environmental Sciences: Water Research & Technology**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 738-750, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1039/d1ew00887k>. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d1ew00887k>. Acesso em: 26 jan. 2026.

ZHANG, X. et al. Acidic Electrolyzed Water Inhibits the Viability of Gardnerella spp. via Oxidative Stress Response. **Frontiers in Medicine**, [S. l.], v. 9, 817957, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.817957>. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.817957>. Acesso em: 27 jan. 2026.

CAPÍTULO 2

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 4 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 18 fev. 2026.

BRISSET, J.-L.; PAWLAT, J. Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, [S. l.], v. 36, n. 2, p. 355-381, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-015-9653-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11090-015-9653-6>. Acesso em: 19 fev. 2026.

BRUGGEMAN, P.; LEYS, C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. **Journal of Physics D: Applied Physics**, [S. l.], v. 42, n. 5, 053001, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/5/053001>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/42/5/053001>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BRUGGEMAN, P. et al. Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. **Plasma Sources Science and Technology**, [S. l.], v. 25, n. 5, 053002, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0963-0252/25/5/053002>. Acesso em: 25 fev. 2026.

CUBAS, A. L. V. et al. Influence of non-thermal plasma reactor geometry and plasma gas on the inactivation of Escherichia coli in water. **Chemosphere**, [S. l.], v. 277, 130255, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130255>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521007244>. Acesso em: 25 fev. 2026.

FARIA, G. B. **Tratamento de água por plasma não-térmico para inativação de Escherichia coli**. 2023. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/18106>. Acesso em: 19 fev 2026.

FAJAR, F. M. et al. Influence of the High-Voltage of Non-Thermal Plasma on the pH of Aqueous Solution for Bacteria Inactivation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 2018, Depok. **Proceedings...** Depok: Universitas Indonesia, 2018. p. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5096671>. Acesso em: 19 fev. 2026.

FRIDMAN, A. **Plasma Chemistry**. New York: Cambridge University Press, 2008. 1022 p.

GANESH SUBRAMANIAN, P. S. et al. Characterization of Plasma Activated Water for Medical Applications. **Advanced Materials Letters**, [S. l.], v. 10, n. 12, p. 919-923, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5185/amlett.2019.0041>. Disponível em: <https://www.vbripress.com/aml/articles/2019/0041>. Acesso em: 19 fev. 2026.

GAO, S.-H. **Bacteriostatic and bactericidal effects of free nitrous acid on model microbes in wastewater treatment**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia) – The University of Queensland, Brisbane, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.14264/UQL.2017.332>. Acesso em: 18 fev. 2026.

GUO, He et al. **Review on application of non-thermal plasma for disinfection: Direct plasma and indirect plasma-activated water**. *Chinese Chemical Letters*, v. 37, n. 2, p. 111275, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2025.111275>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001841725004607>. Acesso em: 18 fev. 2026.

LIU, K.; LIU, S.; RAN, C. The Effect of Air-Water-Plasma-Jet-Activated Water on Penicillium: The Reaction Mechanisms of ONOOH and Its Synergistic Partners. **Frontiers in Physics**, [S. l.], v. 8, p. 1-12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.548530>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2020.548530/full>. Acesso em: 19 fev. 2026.

MURUGESAN, P. et al. Water decontamination using non-thermal plasma: Concepts, applications, and prospects. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 104377, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104377>. Acesso em: 18 fev. 2026.

OMS. **World health statistics: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals**. Geneva: World Health Organization, 2020. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/332070/9789240005105-eng.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2026.

ONU. **World health statistics: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals**. Geneva: World Health Organization, 2020.

ONU BRASIL. Agências da ONU lançam relatório mundial sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos. **ONU Brasil**, [S. l.], 22 mar. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/123077-ag%C3%A0ncias-da-onu-lan%C3%A7am-relat%C3%B3rio-mundial-sobre-o-desenvolvimento-dos-recursos-h%C3%A0dricos>. Acesso em: 18 fev. 2026.

PADUREANU, S. et al. Non-Thermal Plasma-Activated Water: A Cytogenotoxic Potential on *Triticum aestivum*. **Agronomy**, [S. l.], v. 13, n. 2, 459, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13020459>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/2/459>. Acesso em: 20 fev. 2026.

PINTO, M. L.; BALTAZAR, A. L. **Presença de trihalometanos na água: potenciais riscos**. *Associação Portuguesa de Nutrição*, v. 21, p. 27-37, 2020.

TAKAMATSU, T. et al. Microbial Inactivation in the Liquid Phase Induced by Multigas Plasma Jet. **PLoS One**, v. 10, n. 7, e0132381, jul. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132381>. Errata in: **PLoS One**, v. 10, n. 8, e0135546, ago. 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4501802/>. Acesso em: 18 fev. 2026.

VLAD, I.-E.; ANGHEL, S. D. Time stability of water activated by different on-liquid atmospheric pressure plasmas. **Journal of Electrostatics**, [S. l.], v. 87, p. 284-292, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.06.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388617300662>. Acesso em: 19 fev. 2026.

WELTMANN, K. D.; VON WOEDTKE, T.; MASUR, K. Cold atmospheric plasma: applications in biomedicine. **Chemical Reviews**, [S. l.], v. 119, n. 19, p. 12547-12583, 2019.

XIAO, A. et al. Plasma-Activated Tap Water Production and Its Application in Disinfection. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 13, n. 5, 3015, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13053015>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/5/3015>. Acesso em: 20 fev. 2026.

ZHANG, M. et al. Generation of atmospheric pressure air diffuse discharge plasma in oxygen enriched working gas with floating electrode. **Plasma Science and Technology**, [S. l.], v. 25, n. 4, 045405, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aca5f3>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-6272/aca5f3>. Acesso em: 20 fev. 2026.

ANEXO

ANEXO A: Valores individuais de pH inicial (pH₀) obtidos em cada execução experimental.

Execução	Tempo (min)	Tensão (kV)	pHi	Temperatura (°C) _i
			+/- Desvio Padrão	+/- Desvio Padrão
1	5	50	6,09 +/- 0,50	23,1 +/- 1,21
2	5	100	8,05 +/- 1,36	23,0 +/- 0,95
3	7,5	75	6,73 +/- 0,94	22,7 +/- 0,40
4	10	50	7,56 +/- 1,18	22,4 +/- 0,42
5	7,5	75	6,29 +/- 0,48	22,4 +/- 1,01
6	10	100	7,17 +/- 1,09	23,2 +/- 1,73
7	7,5	75	6,74 +/- 1,40	23,4 +/- 1,76

ANEXO B: Resultados do modelo linear generalizado (GLM) das variáveis preditivas na concentração de Al, Fe e Mn nos wetlands construídos avaliados.

Response variable	Predictor variable	d.f.	Deviance	P-value
Al concentration	FWS - Macrophytes	4	32.070	7.270e-08
	FWS - HRT	1	27.207	9.168e-09
	HSSF - Macrophytes	4	163.489	2.2e-16
	HSSF - HRT	1	76.114	2.2e-16
	HSSF - Support media	2	45.670	2.333e-11