UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

FRANCIELE MENDONÇA FERREIRA

COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE PLASMA NÃO TÉRMICO E ULTRAVIOLETA PARA A DESINFECÇÃO DA ÁGUA

Palhoça

2021

FRANCIELE MENDONÇA FERREIRA

COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE PLASMA NÃO TÉRMICO E ULTRAVIOLETA PARA A DESINFECÇÃO DA ÁGUA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Orientadora: Prof. Dr. Anelise Leal Viera Cubas.

Palhoça

2021

FRANCIELE MENDONÇA FERREIRA

COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE PLASMA NÃO TÉRMICO E ULTRAVIOLETA PARA A DESINFECÇÃO DA ÁGUA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 16 de junho de 2021.

Prof.ª e orientadora Anelise Leal Vieira Cubas, Drª.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof.ª Elisa Helena Siegel Moecke, Drª.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Engenheira Ambiental Marília de Medeiros Machado, Esp.
MPB Engenharia Ltda

À minha mãe Ordaliria Mendonça e à minha tia Malvina Mendonça.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe pela educação, amor e por demonstrar que com força e dedicação posso alcançar todos os meus sonhos.

Agradeço aos meus primos e minhas tias, pelo amor e parceria.

À minha orientadora, por todo o conhecimento que me transmitiu, pela paciência e confiança.

Ao corpo docente do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Unisul, pelas valiosas aulas.

Ao CNPQ/PIBIC pelo incentivo às pesquisas que desenvolvi.

Aos meus amigos, vocês foram essenciais nessa trajetória.

E aos meus colegas e amigos da Engenharia, vocês são especiais!

RESUMO

O saneamento básico é essencial para a manutenção da saúde pública e a falta de investimentos, estrutura adequada e projetos inovadores comprometem a qualidade do mesmo. Assegurar a população mundial o acesso à água potável é um dos desafios do milênio, pois apesar de nosso planeta ser formado por 70% água, a má distribuição e a qualidade de água são problemas que preocupam lideranças mundiais, estando entre os objetivos do desenvolvimento sustentável da agenda 2030 estabelecidos pela Organização das Nações Unidas - ONU. O cloro é o agente químico mais utilizado para a desinfecção da água, porém há uma grande preocupação quanto ao potencial de formação de subprodutos, como o trihalometano, um composto muito perigoso à saúde humana por apresentar riscos tóxicos cancerígenos. Os métodos mais avançados de desinfecção da água estão relacionados aos processos de oxidação com a cloração, ozonização, processos fotolíticos ou eletrolíticos. Entretanto, esses processos de oxidação requerem grandes quantidades de energia, oferecerem riscos à saúde humana e muitas vezes não são ecologicamente corretos devido à formação de compostos indesejáveis. O plasma não térmico (PNT), além de ter um baixo gasto energético, apresenta um alto poder de desinfecção e esterilização, demonstrando ser uma alternativa bastante eficaz e aplicável. Considerando a viabilidade ambiental, neste trabalho foi realizada uma comparação entre dois métodos para o tratamento de água, com intuito de encontrar a técnica com melhor desempenho. O presente estudo teve como objetivo a comparação da eficiência da tecnologia de plasma não térmico (PNT) e da tecnologia de ultravioleta (UV) para desinfecção da água. Foram analisadas as condições físico-químicas e microbiológicas da água coletada no Córrego dos Pombos, localizado no bairro Pedra Branca, antes e após o tratamento com PNT e radiação UV. As análises microbiológicas foram realizadas em duplicata e o tempo de tratamento (tanto com o PNT quanto com a UV) foi de 10 min. Os resultados demonstraram que dentre os métodos de desinfecção da água analisados, a tecnologia de plasma não térmico é o método mais eficiente para eliminação dos microrganismos, devido à formação de espécies reativas e as condições físico-químicas. Além disso, o PNT é uma alternativa ambientalmente favorável que pode ser aplicada no tratamento de água voltada ao abastecimento público.

Palavras-chave: Tratamento de água. Plasma não térmico. Ultravioleta.

ABSTRACT

Basic sanitation is essential to maintain public health, but the lack of investments, appropriate structure, and new projects have affected its quality. To ensure the population of the world access to potable water is one of the millennial challenges. Although our planet is made of 70% of water, poor quality and water distribution are significant issues that concern world leaders and put them among the 2030 United Nations' sustainable development goals. Chlorine is the chemical component most used for water disinfection despite the great concern about its potential to create subproducts as trihalomethane, a very dangerous compost to human health due to its carcinogenic and toxic risks. The most advanced methods to disinfect water are related to processes with chlorination, ozonation, photolytic or electrolytic processes. These oxidation processes require considerable amounts of energy, offer risks to human health, and are often not environmentally friendly due to the formation of adverse components. Besides a lower energy requirement, the non-thermal plasma (NTP) provides high power of sterilization and disinfection, which makes its applicability an effective alternative. Considering the environmental feasibility, in this work a comparison between two methods for water treatment was carried out in order to find the technique with the best performance. The present study has aimed to compare the non-thermal plasma (NTP) and ultraviolet (UV) technologies for water disinfection. Water samples were collected from Pombo's Creek, located at Pedra Branca neighborhood, and their physical-chemical and microbiological conditions were analyzed before and after NTP and UV radiation treatments. The microbiological analyses were made in duplicate, and the treatment time (with the NTP as the UV) was 10 minutes. The results have shown that among the water disinfection methods analyzed, the non-thermal plasma technology is the most effective to eliminate microorganisms due to the formation of reactive species and its physical-chemical conditions. In addition, the NTP is a environmentally favorable alternative that can be used for the public water system supply.

Keywords: Water treatment. Non-thermal plasma. Ultraviolet.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 15
Figura 2. Etapas de tratamento da água: 1 – captação da água do manancial; 2 – mistura rápida (entrada de clarificante, solução para regular o pH e em alguns casos pré-cloração); 3 e 4 – tanques de floculação; 5 – decantação; 6 – filtração; 7 – adição de cloro, flúor e acerto de pH (em alguns casos); 8 – reservatório de água tratada pronto para distribuição. 16
Figura 3. Geração do PNT. 20
Figura 4. Reatores de plasma, com barreira dielétrica (reator de forma esférica de vidro de descarga de barreira dielétrica (R1-GSDBD) e reator de forma tubular de quartzo de descarga de barreira dielétrica (R2-QTDBD); sem barreira dielétrica (reator de eletrodos de placa de ponta de vidro (R3-GTPE) e reator de eletrodos paralelos de vidro (R5-GPE); (E1 = eletrodo 1 e E2 = eletrodo 2). 22
Figura 5. Ozonização no tratamento da água. 24
Figura 6. Diagrama de níveis de energia mostrando os processos físicos que podem ocorrer após cada molécula absorver um fóton no ultravioleta ou visível. 25
Figura 7. Formação e recombinação de radicais (H2O, N2, CO2, O2). 25
Figura 8. Localização do Ponto de Coleta da Amostra. 28
Figura 9. Córrego dos Pombos. 29
Figura 10. Reator de ponta-plano de plasma não térmico. 30
Figura 11. Reator UV. 31
Figura 12. Ação do ozônio (oxidação) no microrganismo. 33
Figura 13. Desenho esquemático da ação do PNT e comportamento das condições físico-químicas e microbiológicas. 34
Figura 14. Composição do ar atmosférico. 34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos e microbiológicos da amostra de água bruta e da água tratada com PNT. 32
Tabela 2. Índices de nitrito e nitrato obtidos. 35
Tabela 3. Parâmetros físico-químicos e microbiológicos da amostra de água bruta e da água tratada com radiação UV. 36
Tabela 4. Índices de nitrito e nitrato obtidos. 37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **11**
2 OBJETIVOS **13**
2.1 OBJETIVO GERAL 13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 13
3 REFERENCIAL TEÓRICO **14**
3.1 SANEAMENTO BÁSICO 14
3.2 METODOLOGIAS DE DESINFECÇÃO DA ÁGUA 15
3.2.1 Cloro **16**
3.2.2 Radiação ultravioleta **17**
3.2.3 Ozônio **18**
3.2.4 Combinação de diferentes métodos de desinfecção **18**
3.2.5 Plasma não térmico **19**
3.2.5.1 Reatores de plasma 22
3.3 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS APRESENTADAS 23
3.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA 26
4 MATERIAIS E MÉTODOS **28**
4.1 ÁREA DE ESTUDO 28
4.2 AMOSTRAGEM 29
4.3 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS 29
4.4 TRATAMENTO COM PNT 30
4.5 TRATAMENTO COM UV 30
4.6 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS 31
4.7 INÓCULO E ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS 31
5 RESULTADOS **32**
5.1 ÁGUA BRUTA 32
5.1.1 Turbidez **32**
5.2 PLASMA NÃO TÉRMICO 32
5.3 RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA 36
5.4 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE DESINFECÇÃO DA ÁGUA 38
6 CONCLUSÃO **39**
7 TRABALHOS FUTUROS **40**
8 REFERÊNCIAS **41**

1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico é essencial para a manutenção da saúde pública e a falta de investimentos, estrutura adequada e projetos inovadores comprometem a qualidade do mesmo. Outro fator relevante é aumento da demanda desse serviço devido ao crescimento populacional desenfreado (TEIXEIRA, 2018).

De acordo com a Portaria n° 2.914/2011, que estabelece os procedimentos relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, a qualidade da água está relacionada aos fatores físicos, químicos, microbiológicos e radioativos, de acordo com o padrão de potabilidade. Os indicadores microbiológicos, conforme a portaria citada, são essenciais para a detecção de contaminantes patogênicos (bactérias do grupo coliforme) (BRASIL, 2011).

A *Escherichia coli* (*E.coli*), a principal representante de contaminação fecal, é uma bactéria gram-negativa que reside no trato gastrointestinal dos organismos de sangue quente (GOMES et al., 2016). A maioria das cepas de *E.coli* não são prejudiciais à saúde, mas alguns sorotipos podem causar diversas infecções no ser humano (COURA et al., 2014).

Existem diferentes técnicas para o tratamento da água e as mais avançadas estão relacionadas aos processos de oxidação (AOPs), como a cloração para o tratamento de água e esgoto residual, ozônio (O3), processos fotolíticos (UV) ou eletroquímicos para tratamentos avançados, que requerem um alto nível de desinfecção (GRAUMANS et al., 2019; KIEFER et al., 2020). A alta concentração de espécies energéticas e quimicamente ativas permitem a intensificação significativa de processos químicos tradicionais, essencialmente o aumento da eficiência e da estimulação de reações químicas difíceis de ocorrer em processos químicos convencionais (FRIDMAN, 2008; TAO, 2008).

Diferentes AOPs podem ser aplicados na remoção de poluentes orgânicos, pois evitam a liberação de possíveis resíduos tóxicos na água. Estes processos são baseados na ação de radicais hidroxila (•OH) ou outros oxidantes fortes e são capazes de reduzir efetivamente a cor do efluente, nitrogênio total, carbono orgânico total e demais efeitos crônicos (ZHANG et al., 2020; M’ARIMI et al., 2020).

Os processos de oxidação (AOPs) convencionais têm sido considerados opções potenciais de tratamento para remoção dos poluentes da água (CHEN et al., 2020; ZHANG et al., 2020; HODGES et al., 2018; RADJENOVIC & SEDLAK, 2015; VON GUNTEN, 2018). Porém, muitos desses processos de oxidação requerem grandes quantidades de energia, podendo oferecer riscos à saúde humana e muitas vezes não são ecologicamente corretos devido

à formação de compostos indesejáveis, como ácidos alifáticos, formaldeído entre outros (RAVINDRAN & JAISWAL, 2016; PEREIRA et al., 2021).

Este trabalho compara a eficiência da tecnologia de plasma não térmico (PNT) com a tecnologia de ultravioleta (UV) para desinfecção da água, integrando as áreas de microbiologia, tecnologia e engenharia ambiental.

O estudo da tecnologia do plasma não térmico (PNT) permite identificar a formação de elétrons, íons, moléculas excitadas e neutras, espécies radicalares e fótons na amostra. O plasma não térmico (PNT) tem se apresentado como um excelente método para desinfecção de água devido à formação de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), incluindo óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO2), ácido nitroso (HNO2), ácido nítrico (HNO3), ácido peroxinitroso (ONOOH) e peroxinitrico ácido (S2 NOOH) (GRAUMANS et al., 2019), considerado uma tecnologia segura do ponto de vista sanitário, eficiente e ambientalmente correta, devido à ausência de subprodutos, seu uso pode substituir agentes químicos como o cloro.

Com o objetivo de apresentar a tecnologia de plasma não térmico (PNT) e de ultravioleta para o tratamento de água, foi analisado o crescimento das bactérias antes e após o tratamento com PNT, a temperatura, condutividade, pH e os índices de nitrito e nitrato.

De modo geral, trata-se de um trabalho classificado como descritivo e interdisciplinar, já que a partir das análises, registros e observações, foi explicitada a eficiência das metodologias adotadas para o tratamento da água.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Comparar a eficiência da tecnologia de plasma não térmico (PNT) com a tecnologia de ultravioleta (UV) para desinfecção da água.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a eficiência de um reator de PNT na desinfecção de água, através de análises microbiológicas da água contaminada com microrganismos patogênicos antes e após o tratamento;
- Analisar as alterações nos parâmetros físico-químicos das amostras antes e após o tratamento com PNT;
- Avaliar a eficiência de uma lâmpada de UV na desinfecção de água, através de análises microbiológicas da água contaminada com microrganismos patogênicos antes e após o tratamento;
- Analisar as alterações nos parâmetros físico-químicos das amostras antes e após o tratamento com UV;
- Comparar os resultados obtidos da desinfecção da água com PNT e UV em relação a inativação bacteriana, com vistas a definir a melhor tecnologia de desinfecção de água.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 SANEAMENTO BÁSICO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, a população total do Brasil tende a crescer aproximadamente 6,7 % até 2060 (IBGE, 2021). O rápido crescimento da população intensifica os problemas ambientais e relaciona-se com a escassez dos recursos naturais e falta de tecnologia adequada e acessível. Um dos recursos mais importantes para a vida é a água e a sociedade enfrenta vários problemas devido à falta de saneamento básico. Além dos inúmeros casos de contaminação proveniente principalmente das atividades antrópicas.

O saneamento básico é essencial para o desenvolvimento humano, porém enfrenta diversos desafios. A busca pelo aprimoramento desse serviço é constante e tem como objetivo a garantia da qualidade de vida.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS, 74,9% da população, nos municípios com abastecimento de água, é atendida com água potável (SNIS, 2019). O Sul, Centro-Oeste e Sudeste são as regiões com a maior cobertura de abastecimento, sendo 99% da população atendida, enquanto as regiões Norte e Nordeste atingiram cerca de 92% da população. Apesar dos percentuais serem bastante positivos, uma parte significativa da população compra água para beber ou usa purificador (TRATA BRASIL, 2021).

Assegurar a população mundial o acesso a água potável é um dos desafios do milênio, pois apesar de nosso planeta ser formado por 70% água, a má distribuição e a qualidade de água são problemas que preocupam lideranças mundiais, estando entre os objetivos do desenvolvimento sustentável (Figura 1), mais precisamente o objetivo 6, que prevê assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos, sendo uma das metas da ONU (Agenda 2030):

> Melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas, e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente.

A falta de qualidade da água ainda se relaciona com problemas de doenças de veiculação hídrica e doenças de origem hídrica, tendo também relação com os objetivos do desenvolvimento sustentável da Agenda 2030, mais precisamente o objetivo 3: assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades que tem como uma das

metas até 2030, reduzir substancialmente o número de mortes e doenças por produtos químicos perigosos e por contaminação e poluição do ar, da água e do solo (AGENDA 2030).

Figura 1. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Fonte: Agenda 2030, 2021.

O cloro é o agente químico mais utilizado para inativação de microrganismos, pois é capaz de oxidar vários contaminantes, porém há uma grande preocupação quanto ao potencial de formação de subprodutos de desinfecção, como os trihalometanos, um composto muito perigoso a saúde humana por apresentar riscos tóxicos cancerígenos, originado pela reação do cloro com matéria orgânica (ALSHEYAB & MUÑOZ, 2007).

Portanto, existe uma necessidade crucial de desenvolver novos métodos de alta eficiência e ecologicamente corretos para tratar águas contaminadas e reduzir ou remover completamente os poluentes (OUTRAN, 2014), pois utilizar tecnologias promissoras que não promovam efeitos nocivos ao meio ambiente e à saúde humana é uma medida necessária para garantir a qualidade de vida e o equilíbrio ambiental.

3.2 METODOLOGIAS DE DESINFECÇÃO DA ÁGUA

A desinfecção da água nas Estações de Tratamento de Água (ETA's) é um processo para eliminação de organismos patogênicos e demais organismos prejudiciais à saúde e pode ser realizada a partir de diferentes tecnologias e/ou processos (BARROS, 2018).

As técnicas que envolvem os processos de oxidação (cloração, radiação ultravioleta, ozonização) são as mais eficientes para o tratamento de água e o avanço da tecnologia nos permite aprimorar e criar novas técnicas a fim de facilitar o processo e torná-lo mais acessível (LIMA & ROLLEMBERG, 2020).

O cloro é o produto químico mais utilizado para a desinfecção da água potável, devido ao seu baixo custo e potencial oxidante. Já os métodos de oxidação através da radiação ultravioleta e da ozonização, normalmente são utilizados apenas no tratamento de efluente

industriais, devido as elevadas concentrações de poluentes (matéria orgânica) em água e ao custo do processo (TORRES, 2019).

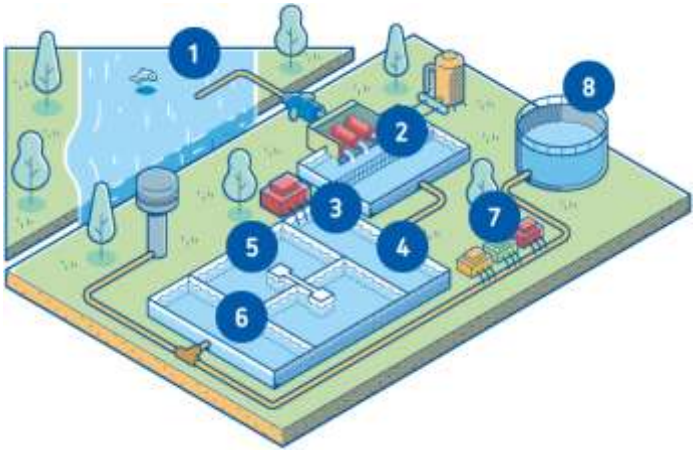
A radiação ultravioleta em contato com os microrganismos, provoca reações no DNA (ácido desoxirribonucleico) e RNA (ácido ribonucleico) (SILVA, 2018). O ozônio promove a formação de radicais livres, responsáveis pelo elevado poder germicida na inativação dos organismos patogênicos (SILVA, 2015).

Vários estudos veem demonstrando que o plasma não térmico (PNT) é um método vantajoso para desinfecção de água. O plasma possui alto poder oxidativo, uma tecnologia eficiente, segura, além de poder ser utilizada na ausência de agentes químicos, como o cloro (MOREAU et. al, 2008).

3.2.1 Cloro

O tratamento da água em uma estação de água convencional é dividido em diferentes etapas: captação; adução; coagulação; floculação; decantação; filtragem; pós-alcalinização, desinfecção e fluoretação e reservação (Figura 2). A cloração promove a oxidação do material celular com o objetivo de eliminar as bactérias, danificando o material genético e provocando a inibição enzimática, etapa essa que ocorre no final do tratamento da água, onde corrige-se também o pH e aplica-se o flúor (ANTÔNIO, 2011).

Figura 2. Etapas de tratamento da água: 1 – captação da água do manancial; 2 – mistura rápida (entrada de clarificante, solução para regular o pH e em alguns casos pré-cloração); 3 e 4 – tanques de floculação; 5 – decantação; 6 – filtração; 7 – adição de cloro, flúor e acerto de pH (em alguns casos); 8 – reservatório de água tratada pronto para distribuição.



Fonte: BRK Ambiental, 2021

A adição do cloro em água promove a formação de moléculas de hidrogênio (H), cloro residual (Cl) e ácido hipocloroso que age como desinfetante. A dissociação em moléculas individuais promove o equilíbrio entre o ácido hipocloroso e hidrogênio, o que contribui com a eliminação dos microrganismos (equação 1) (MEYER, 1994).

$$Cl + H2O \rightarrow HOCl + H+ + Cl– \quad (1)$$

Entre suas desvantagens em ambientes aquáticos o cloro tem capacidade de reagir com matéria orgânica natural (NOM) podendo facilmente formar subprodutos de desinfecção (DBPs, especialmente tri- halometanos (THMs) e ácidos haloacéticos (HAAs)), que resultam negativamente na saúde humana (Perrucci et al. 2017). E os produtos mais utilizados são o cloro gasoso ou seus derivados (hipoclorito de sódio ou hipoclorito de cálcio) (PASCHOALATO, 2005).

3.2.2 Radiação ultravioleta

A tecnologia de radiação ultravioleta (UV) é capaz de degradar compostos orgânicos sem a utilização de produtos químicos e com baixa formação de subprodutos orgânicos halogenados (SONG et al., 2016; NIHEMAITI et al., 2018; BARARPOUR et al., 2018; RAEISZADEH & TAGHIPOUR, 2019). As lâmpadas UV possuem a capacidade de irradiar em diferentes comprimentos de onda variando também a frequência da pulsação, característica que a torna eficaz na desinfecção (RAEISZADEH & TAGHIPOUR. 2019). A radiação ultravioleta é capaz de provocar alterações estruturais no material genético das células de alguns germicidas como o protozoário Cryptosporidium, as Streptococcus faecalis e *Escherichia coli* entre outros (BILOTTA & DANIEL, 2012; CASAS-MONROY et al. 2018; WEF, 1996).

A inativação microbiana ocorre pela absorção da luz que promove uma reação fotoquímica capaz de alterar componentes moleculares essenciais para as funções celulares, causando danos nos ácidos nucléicos (DNA e RNA) dos microrganismos inativando-os (CASAS-MONROY et al. 2018; USEPA, 1999). A análise da eficiência da tecnologia aplicada no tratamento da água é de fundamental importância, assim como os impactos provocados pela mesma e algumas lâmpada UV apresentam a desvantagem de possuir mercúrio em sua composição, um material perigoso após a vida útil da lâmpada (PIRNIE et al., 2006). Outros desafios associados as lâmpadas de mercúrio é seu longo tempo de aquecimento, distorção do filamento, e restrições geométricas para o projeto do reator (AUTIN et al., 2013; CHEVREMONT et al., 2013). A tecnologia de diodo (UV-LED) é uma ótima alternativa para sistemas de purificação de água no ponto de uso a serem implementados áreas remotas,

com baixo consumo de energia, compacidade e hora de aquecimento (TAGHIPOUR, 2013; MATAFONOVA & BATOEV, 2018 ; SONG et al., 2019).

Outra desvantagem da lâmpada de radiação UV é o poder radiante relativamente baixo das UV-LEDs que impedem sua aplicação em grande escala (RAEISZADEH & TAGHIPOUR, 2019). Apesar da simplicidade operacional da tecnologia UV, baixo custo (em comparação à cloração) e pouca exigência de operação e manutenção (DIRISU et al. 2019; USEPA, 1999), a radiação UV não é uma tecnologia eficiente para diminuir a energia de todos micropoluentes presentes na água (BARAZESH et al. 2015; MIKLOS et al., 2018).

3.2.3 Ozônio

O ozônio é um gás instável parcialmente solúvel em água, com potencial redox de alto padrão capaz de oxidar diversos produtos inorgânicos e substâncias orgânicas (HOIGNÉ, 1998; CHEN & WANG, 2019). A ozonização pode ocorrer através da reação direta da molécula de O3 ou pela oxidação indireta por •OH (VON SONNTAG & VON GUNTEN, 2012). A ozonização é capaz de reduzir teores de ferro e manganês, aumentar a eficiência dos processos de coagulação e floculação, remover determinadas substâncias orgânicas não biodegradáveis.

É mais eficiente e solúvel em água que o cloro, letal as bactérias e microrganismos, não produz subprodutos, não requer manuseio, estoque e transporte, pois pode ser gerado no local de utilização, pode ajudar em outras etapas do processo de tratamento, como a coagulação e floculação da água e quando não consumido, decompõe-se naturalmente em oxigênio (BRAGA, et al. 2007; CASTRO, 2003; GOTTSCHALK et al., 2009).

O processo de ozonização apresenta a desvantagem de não pode ser utilizado como desinfetante residual, apenas como pré-tratamento, pois durante o processo pode ocorrer a formação do bromato, conhecido como carcinógeno (VON GUNTEN & HOIGNE, 1994; HAAG & HOIGNE, 1983). A etapa de pré-oxidação só levará ao consumo desnecessário de produtos químicos se apresentar uma quantidade considerável de compostos biodegradáveis. Diante disto, um pré-tratamento biológico seguido de ozonização pode ser uma tecnologia mais apropriada (OLLER et al., 2011; CHEN & WANG, 2019).

3.2.4 Combinação de diferentes métodos de desinfecção

O tratamento da água também pode ser realizado através da combinação dos processos de UV, ozonização, dosagem de cloro e dosagem de peróxido de hidrogênio. O método UV/Cl_2 visa a remoção de micro poluentes através do meio AOP, onde acontece a formação de radicais

hidroxila e espécies reativas de cloro (GUO et al. 2018, REMUCAL & MANLEY, 2016; WANG et al. 2019). A irradiação com UV/Cl_2 é capaz de estimular oxigênio molecular (O_2) para singleto oxigênio ($1O_2$) e desintegrar o oxigênio molecular e a água em espécies reativas de oxigênio, como ozônio (O_3) ou radicais hidroxila (GRAUMANS et al., 2019).

No processo UV/O_3, a fotólise do ozônio provoca a excitação dos átomos de oxigênio e a reação entre o ozônio e o íon hidroxila (•OH) promove a formação do ânion radical superóxido (O_2-) e do radical hidroperoxila (HO_2) (VON SONNTAG, 2008; VON SONNTAG & VON GUNTEN, 2012; MAHMOUD & FREIRE, 2007). Esse processo requer um alto consumo de energia e a decomposição do anion radical ozonóide possui um rendimento quântico de radicais hidroxila relativamente baixo (REISZ et al., 2003; MIKLOS et al., 2018; CHEN & WANG, 2019).

Um estudo realizado por Alvim et al. (2020) comparou os processos de UV/H_2O_2 e ozonização para a remoção de compostos farmaceuticamente ativos (PHACs), devido a formação de espécies altamente reativa a UV/H_2O_2 foi capaz de remover de 30,8 a 60,8% dos compostos PHACs, enquanto a ozonização remove apenas entre 13,6 e 31,4%, pois embora o O_3 seja considerado um oxidante eficaz para ligações duplas carbono-carbono e anéis aromáticos, sua forma molecular reage lentamente com outros subprodutos o que resulta na menor remoção de carbono orgânico total (MOREIRA et al., 2015; ALVIM et al., 2020).

Após comparar diversos métodos de tratamento à base de ozônio, a ozonização catalítica pode reduzir o custo operacional, pois não é necessário o uso de outro custo de energia (como UV) ou custo para ajuste de pH, devido à sua eficácia em uma ampla faixa de valores de pH (MOHAMADI et al. 2020; CHEN & WANG, 2019). Para o tratamento de água os sistemas de ozonização catalítica têm mostrado bom desempenho, apresentando diversas vantagens em comparação com o uso de apenas a ozonização. Na maioria dos casos, o processo de ozonização catalítica atingiu um maior mineralização de vários compostos orgânicos do que sistema de ozonização único (CHEN & WANG, 2019; WANG et al., 2019; WANG et al., 2016; YANG et al., 2010; FARIA et al., 2009; YANG et al., 2009; HU et al., 2008; CHEN & WANG, 2019).

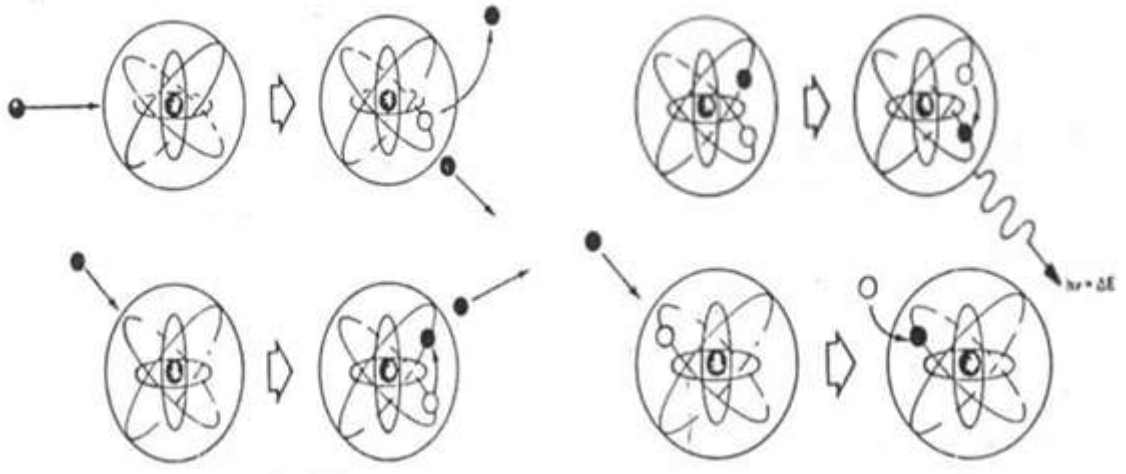
3.2.5 Plasma não térmico

O plasma não térmico é um gás parcialmente ionizado, constituído de elétrons, íons, moléculas excitadas e neutras, espécies radicalares e fótons (gerados através de reações de oxidação) e produzido a partir de uma descarga elétrica de alta voltagem que ocasiona na formação e propagação de um aglomerado de espécies ativas, campo elétrico, luz UV e ozônio (O_3) (GEORGE et al, 2020; PÉREZ-PIZÁ et al., 2019).

As espécies formadas reagem com estruturas químicas de diversos materiais. Normalmente, a molécula de ozônio é gerada em abundância em plasmas usando o ar, tendo a capacidade de atacar especificamente a lignina do material tratado, deixando intacta a celulose e a hemicelulose, que é a degradação direta (RAVINDRAN et al., 2019; BRUGGEMAN et al., 2007; PEREIRA et al., 2021).

Para gerar o plasma não térmico é necessário um gás, sendo que os principais utilizados são o argônio e ar atmosférico. Quando é aplicado o gás argônio, a excitação e ionização gerada vai de acordo com as equações (2-3), onde o átomo neutro é atacado pelo elétron para formar um íon positivo e ocorre a colisão dos íons positivo e negativo, o elétron é transferido e são formados dois nêutrons e o excesso de energia é responsável pela reação em cadeia e propagação da radiação (Figura 3) (CHAPMAN, 1980).

Figura 3. Geração do PNT.



Fonte: CHAPMAN, 1980.

Quando em contato com água pode formar espécies radicais onde esta reação está representada na equação (4). A descarga de NTP de argônio na interface gás-água também produz espécies primárias a partir da degradação da água, como OH•, H •, O •, O2 • (equações 5-6) (LOCKE & SHIH, 2011).

$$Ar + e^- \rightarrow Ar^* + e^- \quad (2)$$
$$Ar + e^- \rightarrow Ar^+ + 2e^- \quad (3)$$
$$Ar^* + H_2O \rightarrow Ar + \bullet OH + \bullet H \quad (4)$$
$$H_2O + e^- \rightarrow HO\bullet + H\bullet \quad (5)$$
$$O_2 + e^- \rightarrow O\bullet + O\bullet \quad (6)$$

Quando ar é utilizado para a formação de PNT, formaram-se espécies oxigenadas (ROS) e nitrogenadas reativas (RNS), que sofrem excitação, dissociação e ionização (JIANG, et al, 2014), conforme as equações abaixo (7-21).

$$O_2 + e^- \rightarrow 2O\bullet \quad (7)$$
$$H_2O + O\bullet \rightarrow 2OH\bullet \quad (8)$$
$$O_2 + O\bullet \rightarrow O_3 \quad (9)$$
$$O_3 + -HO_2 \rightarrow \bullet O_2^- + OH\bullet + O_2 \quad (10)$$
$$2O_3 + H_2O_2 \rightarrow 3O_2 + OH\bullet \quad (11)$$
$$N_2 + e^- \rightarrow N\bullet + N\bullet \quad (12)$$
$$O\bullet + N_2 \rightarrow NO\bullet + N\bullet \quad (13)$$
$$N\bullet + O_2 \rightarrow NO\bullet + O \quad (14)$$
$$NO\bullet + N\bullet \rightarrow N_2 + O \quad (15)$$
$$NO\bullet + NO\bullet \rightarrow N_2 + O_2 \quad (16)$$
$$NO^* + O_2 + e^- \rightarrow NO_2^- + O\bullet \quad (17)$$
$$NO\bullet + O_3 + e^- \rightarrow NO_2^- + O_2 \quad (18)$$
$$NO_2^- + O_3 \rightarrow NO_3^- + O_2 \quad (19)$$
$$NO\bullet + O\bullet + e^- \rightarrow NO_2^- \quad (20)$$
$$NO_2^- + O\bullet \rightarrow NO_3^- \quad (21)$$

Além das espécies representadas nas equações (2-21) existe a dissociação da água ocasionada em decorrência do plasma como é possível ver nas equações (22-27) (CUBAS et al., 2019).

$$e^- + H_2O \rightarrow H + OH + e^- \quad (22)$$
$$e^- + H_2O \rightarrow H_2O^+ + 2e^- \quad (23)$$
$$H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH \quad (24)$$
$$OH + OH \rightarrow H_2O_2 \quad (25)$$
$$H_2O + h\nu \rightarrow H + OH \quad (26)$$
$$H_2O_2 + h\nu \rightarrow OH + OH \quad (27)$$

A geração dos radicais hidroxila e os efeitos físico-químicos formados durante o tratamento com o plasma são responsáveis pela eliminação das bactérias (FRIDMAN, 2008; JIANG et al., 2014; CUBAS et al., 2019; KRISHNA et al., 2016; MAGUREANU et al., 2015).

A formação de radicais OH e oxigênio atômico foi evidenciada por investigações espectroscópicas da luz emitida pelo plasma (SUN et al., 1997; PARK et al., 2006). A geração de ozônio e peróxido de hidrogênio também foi estudada (JOSHI et al., 1995; HOLZER & LOCKE, 2008). O plasma não térmico foi investigado para a oxidação de vários compostos orgânicos na água: fenóis (HAYASHI et al., 2000; LUKES et al., 2005; GRABOWSKI et al., 2006), corantes orgânicos (GHEZZAR et al., 2007; GRABOWSKI et al., 2007; MAGUREANU et al., 2018), etc.

O uso do ar atmosférico como gás indutor facilita uma abordagem potencialmente ecológica e economicamente viável. Foi relatado que o plasma atmosférico é eficiente na

decomposição de corantes (CREMA et al., 2019), pesticidas (SARANGAPANI et al., 2017), (SARANGAPANI et al., 2016), aflatoxinas (DEVI et al., 2017) e na inativação de bactérias patogênicas (ZIUZINA et al., 2013).

A tecnologia de plasma não térmico emergiu como um processo de oxidação avançado para tratamentos de águas residuais, oferecendo compatibilidade ambiental e grandes taxas de remoção de poluentes (JIANG et al., 2014).

A tecnologia de PNT pode ser aplicada em diversas áreas, por ser um processo atóxico, viável e ambientalmente amigável. Estudos apontam para a ocorrência de deslignificação usando pré-tratamento da biomassa com plasma à base de líquido (PEREIRA et al., 2021), extração de óleo da borra do café (CUBAS et. al, 2020), remoção de produtos farmacêuticos presentes na água (GRAUMANS et al., 2019), inativação de bactérias na água (CUBAS et al., 2019), tratamento de águas residuais (HASIM et al., 2016), entre outros.

Além disso, os processos movidos a eletricidade podem evitar o uso de químicos, evitando os riscos cancerígenos provenientes do cloro (CHAPLIN, 2019; RADJENOVIC & SEDLAK; 2015, Von GUNTEN, 2018; CHEN et al., 2020; ZHANG & LIU 2019).

A utilização das tecnologias de plasma não térmico é essencial para aplicações tecnológicas que buscam a inovação e oferecem taxas eficazes de remoção e compatibilidade ambiental (MILOSAVLJEVIC´ et al., 2007; JIANG et al., 2014).

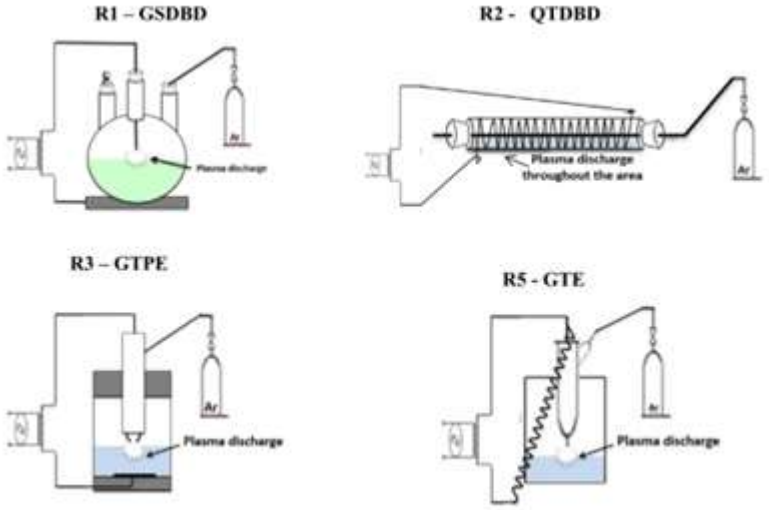
3.2.5.1 Reatores de plasma

Os reatores de PNT são sistemas que dependem de uma série de variáveis ou parâmetros operacionais - distância entre eletrodos, pressão, gás de trabalho, arranjo dos eletrodos, fonte de alimentação elétrica, material dielétrico (presença ou não) e o meio onde o plasma é formado - gás ou líquido (Figura 4) (ALSHEYAB & MUÑOZ, 2007; OUTRAN & AARON, 2014; EVERETT et al., 1995; MILOSAVLJEVIC et al., 2007). Sendo a forma de arranjo dos eletrodos e a presença ou não de material dielétrico consideradas as variáveis mais importantes na sua funcionalidade e correspondente aplicação.

O plasma pode ser gerado a partir de diversos equipamentos, incluindo: descarga de corona, descarga de barreira dielétrica (DBD), tocha de plasma, tocha indutiva, catodo oco, entre outros (BALDISSARELLI, 2012; ŽIGON et al., 2018).

Figura 4. Reatores de plasma, com barreira dielétrica (reator de forma esférica de vidro de descarga de barreira dielétrica (R1-GSDBD) e reator de forma tubular de quartzo de descarga de barreira dielétrica (R2-QTDBD); sem barreira dielétrica (reator de eletrodos de placa de

ponta de vidro (R3-GTPE) e reator de eletrodos paralelos de vidro (R5-GPE); (E1 = eletrodo 1 e E2 = eletrodo 2).



Fonte: Adaptada pela autora, 2021.

O plasma é um gás parcial ou totalmente ionizado composto de elétrons, íons, moléculas excitadas e neutras, espécies reativas como radicais livres e fótons (FRIDMAN, 2008; JIANG et al., 2014; PEREIRA et al., 2021). O plasma não térmico gera radicais livres, espécies reativas e íons, que apresentam níveis mais altos de energia, aumentando a taxa de reações os elétrons que interagem com as moléculas (WU et al., 2013; PEREIRA et al., 2021).

As espécies químicas formadas responsáveis pela eliminação de bactérias estão diretamente relacionadas ao estado físico onde a descarga é formada, daí a influência do arranjo dos eletrodos na eficiência do sistema, no geral os reatores são classificados em três tipos principais: reator de descarga em fase gasosa, reator de descarga em fase líquida (chamada de descarga eletro-hidráulica) e reator de descarga híbrida (MILOSAVLJEVIC et al, 2007; LIHANG et al, 2019).

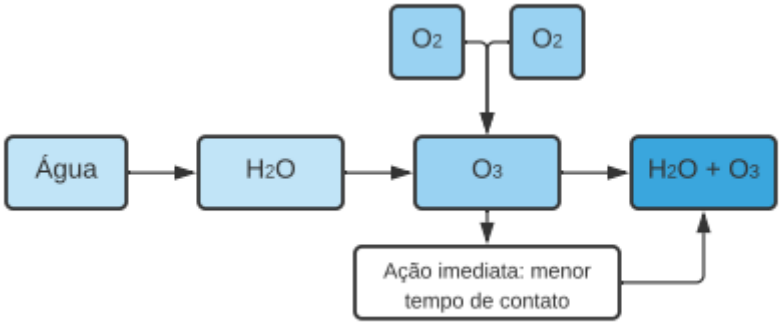
3.3 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS APRESENTADAS

Os estudos demonstram que o cloro é o processo menos eficaz para o tratamento da água contaminada por compostos mais complexos, por isso, a ozonização e UV surgiram como uma alternativa avançada de oxidação para eliminar tais compostos. Entretanto tais tecnologias também apresentam limitações e um alto custo operacional.

Os parágrafos a seguir apresentam a análise dos processos de desinfecção voltados aos compostos citados (UV, ozonização e plasma não térmico).

A ozonização, por exemplo, tem sido amplamente aplicada no tratamento de água e esgoto (Figura 5), porém é ineficiente na mineralização de poluentes orgânicos e pode formar subprodutos tóxicos (DBPs). Uma alternativa para esse problema é a ozonização catalítica que pode promover a decomposição do O3 (CHEN & WANG, 2019), porém o ozônio tem baixa solubilidade em água e para sua eficiência é necessário um maior período de tempo de contato gás-líquido e reatores em grandes escalas (GRAÇA ET AL., 2020).

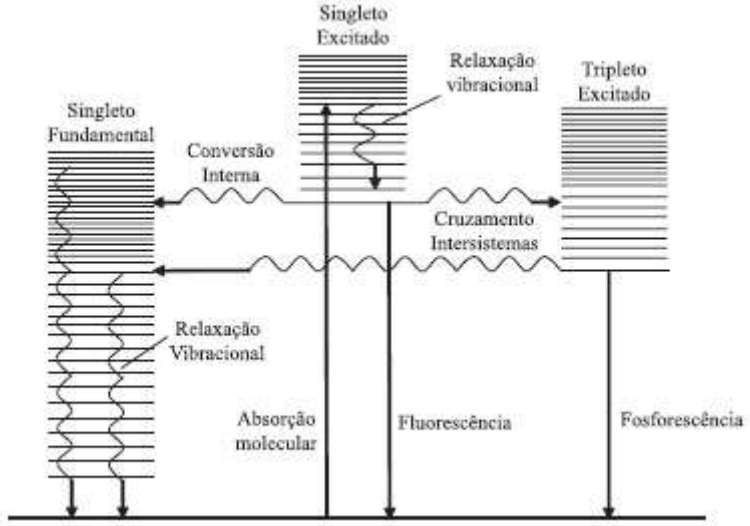
Figura 5. Ozonização no tratamento da água.



Fonte: adaptada pela autora, 2021.

A eficácia do processo UV é evidenciada de acordo com a presença de fótons nas moléculas (Figura 6). Entretanto, a UV pode ser ineficiente para inativação de determinados vírus, esporos e cistos, e os microrganismos podem ser capazes de reverter os efeitos destrutivos da UV através de mecanismos de reativação (fotoreativação), turbidez e sólidos suspensos totais na água podem prejudicar a eficiência da inativação (USEPA, 1999).

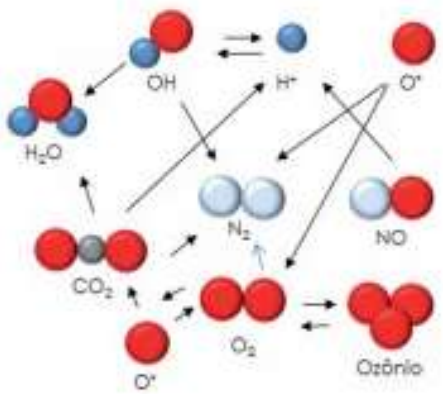
Figura 6. Diagrama de níveis de energia mostrando os processos físicos que podem ocorrer após cada molécula absorver um fóton no ultravioleta ou visível.



Fonte: Gouvêa, 2014.

Enquanto isso, o plasma não térmico é uma tecnologia que não requer o uso de produtos químicos, forma radicais livres e promove a geração abundante do ozônio sem um alto custo operacional (Figura 7). A descarga de gás e tensão aplicada para o tratamento da amostra a partir da tecnologia de plasma é capaz de promover a conversão da energia elétrica em irradiação UV (GRAUMANS et al., 2019). A combinação de tecnologias promovidas pela atividade do plasmática contribui com a eficiência do tratamento da água, devido a maior interação das espécies altamente reativas (RNOS) com as moléculas de água (WU et al., 2013).

Figura 7. Formação e recombinação de radicais (H2O, N2, CO2, O2).



Fonte: Adaptada pela autora, 2021.

3.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

A Portaria n° 2.914, de 12 de dezembro de 2011, dispõe sobre os procedimentos e parâmetros para o controle da qualidade necessária da água para o consumo humano buscando evitar os danos à saúde (BRASIL, 2011; NAKADA et al., 2020).

O padrão de potabilidade da água é identificado de acordo com o Índice de Qualidade da Água (IQA), indicador qualitativo utilizado para avaliar a qualidade da água para abastecimento público, composto por nove parâmetros, dentre eles: oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes, potencial hidrogeniônico (pH), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), temperatura, nitrogênio total, fósforo total, turbidez e resíduo total (ANA, 2021).

Salienta-se que a tecnologia escolhida deve-se ser estudada para a identificação das análises mais relevantes para a comprovação da qualidade da água e eficiência do tratamento utilizado, pois a eficiência da desinfecção está relacionada as condições do meio e ao tempo de exposição.

O oxigênio dissolvido é um dos principais parâmetros de qualidade da água. É um gás pouco solúvel em água, devido às condições de temperatura e sais dissolvidos e indica a concentração de oxigênio na água em mg L^{-1} (DERISIO, 1992; ARAÚJO et. al, 2004).

O potencial hidrogeniônico (pH) representa as condições ácidas ou alcalinas do meio líquido, medido a partir da presença de íons de hidrogênio (H+), o mesmo contribui com o grau de solubilidade das substâncias presentes no meio e é capaz de determinar o potencial de toxidade de alguns elementos (APHA, 2005). Além disso, o pH da solução afeta diretamente a inativação bacteriana no plasma não térmico. Chandana et al., cita que na exposição plasmática em condições extremamente ácidas (pH < 4,7) a inativação bacteriana ocorre muito rapidamente (CHANDANA et al., 2018).

A análise da temperatura é outro fator essencial ao aplicar a tecnologia de plasma não térmico (PNT), devido a significativa diferença entre a temperatura dos elétrons com o restante das espécies do gás (JIANG et al., 2014). Enquanto a temperatura do elétron pode atingir as faixas entre 1 - 10 eV, os demais constituintes podem permanecer na temperatura ambiente (ZANG et al., 2017; CHEN et al., 2008), razão pela qual as temperaturas dificilmente atingem valores muito altos pois o PNT encontra-se fora do equilíbrio termodinâmico local (FRIDMAN, 2008; CHEN et al., 2008), a variação de temperatura do meio está diretamente relacionada à transferência de energia do gás de plasma para o meio líquido (CUBAS et al. 2019).

A condutividade elétrica representa a capacidade de transmissão da corrente elétrica no meio em função a presença de substâncias dissolvidas, ânions e cátions, um parâmetro que também deve ser analisado, pois seu comportamento é capaz de interferir as condições do meio.

A concentração iônica representa ação eletrolítica e, consequentemente a condução da corrente elétrica (FUNASA, 2014).

A Portaria de Consolidação n° 5/2017 determina os teores máximos de nitrito e nitrato na água, 10,0 mg/L de N e 1,0 mg/L de N, respectivamente (BRASIL, 2017). Os teores de nitrogênio devem ser analisados, pois podem apresentar riscos ao consumo humano.

Observa-se que qualidade da água está diretamente relacionada, assim como as condições físico-químicas e patogênicas, a saúde pública, por isso o Ministério da Saúde estabelece padrões para impedir possíveis impactos ao consumidor (BRASIL, 2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

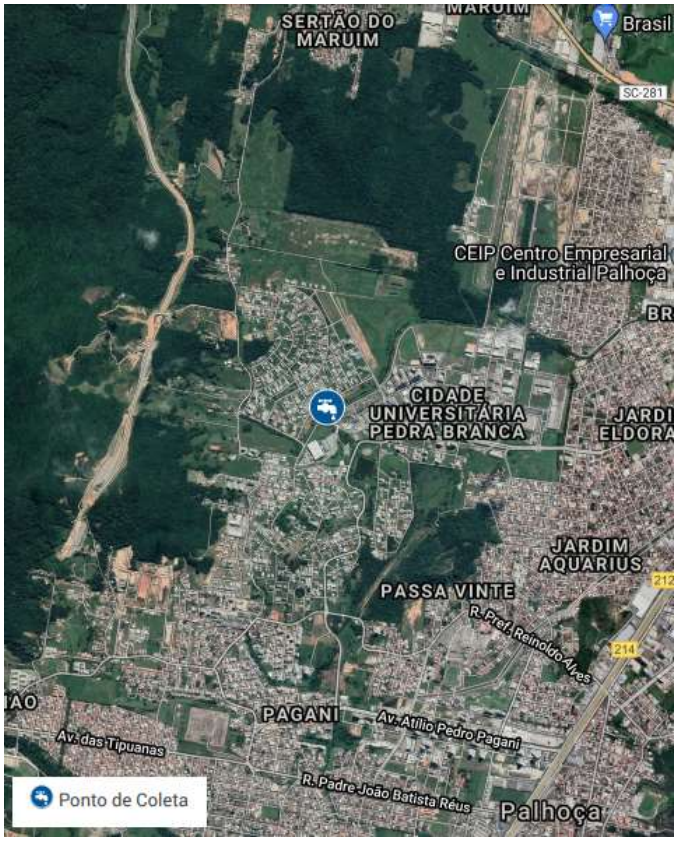
Este trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia Ambiental e Sanitária – LEA, da Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL, onde foi realizado o tratamento de água com o plasma não térmico e radiação ultravioleta e determinados os parâmetros físico-químicos e microbiológico. As análises laboratoriais foram realizadas no período de abril a maio do ano de 2021.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A amostra de água foi coletada no Córrego dos Pombos, localizado no bairro Pedra Branca, na Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL (Figura 8).

O Córrego dos Pombos é um afluente do Rio Imaruim, que recebe efluente da Estação de Tratamento de Esgoto do bairro Pedra Branca, um sistema autônomo e independente das demais estações de tratamento da SAMAE (Secretaria Executiva de Saneamento) de Palhoça (PMSB, 2015).

Figura 8. Localização do Ponto de Coleta da Amostra.



Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

4.2 AMOSTRAGEM

A coleta das amostras de água do Córregos dos Pombos (Figura 9) foi realizada de acordo com as especificações da NBR 9898, que dispõe sobre a preservação e técnica de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores.

Figura 9. Córrego dos Pombos.

Fonte: elaborada pela autora, 2021.

4.3 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

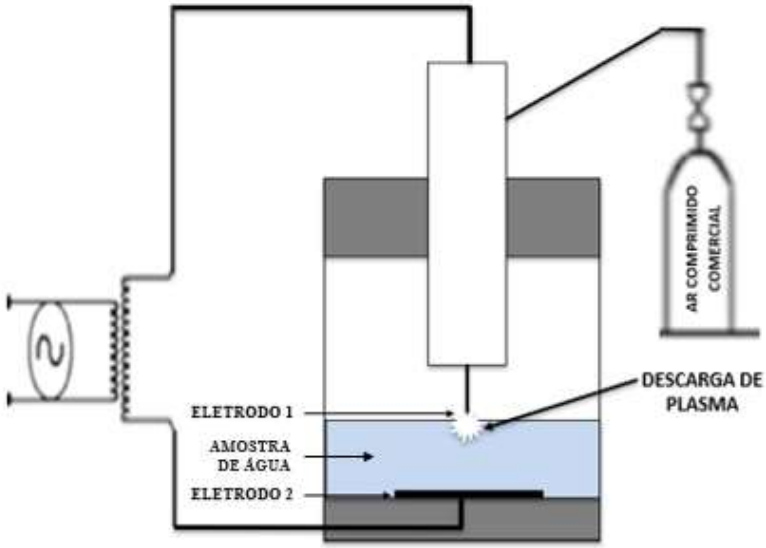
As análises microbiológicas foram realizadas em duplicata, com a água do Córregos dos Pombos e o tempo de tratamento (tanto com o PNT quanto com a UV) foi de 10 min. Os materiais utilizados foram autoclavados e secos em uma capela de fluxo laminar sob radiação ultravioleta.

4.4 TRATAMENTO COM PNT

Os experimentos foram desenvolvidos em reator ponta-plano descarga de plasma não térmico, conectado a uma fonte de energia de 17kW de potência e corrente de 0,03A, com entrada e saída de ar, e a potência do plasma foi de 23 kW (Figura 10). A distância entre a amostra de água bruta e a lâmpada UV utilizado no reator foi de 10 cm.

Para o tratamento com PNT, foi utilizado o ar comprimido comercial (ar) como gás de plasma e 60 mL de amostra de água bruta para analisar a eficiência do reator.

Figura 10. Reator de ponta-plano de plasma não térmico.



Fonte: Adaptada pela autora (2021).

4.5 TRATAMENTO COM UV

Para o tratamento com UV, utilizou-se uma lâmpada UV de cano único de vidro de quartzo à prova de explosão de 20 cm de comprimento, diâmetro de 2 cm, potência de 13 W e onda de luz de 254 nm. A distância entre a amostra de água bruta e a lâmpada UV utilizado no reator foi de 1 cm.

Os experimentos foram desenvolvidos com 60 mL de amostra de água bruta para analisar a eficiência do reator UV, o qual apresenta uma taxa de transmissão dos raios ultravioletas de 90%. A Figura 11 mostra o desenho esquemático do reator UV utilizado nos experimentos.

Figura 11. Reator UV.

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

4.6 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

As análises físico-químicas, de pH, temperatura, condutividade e turbidez foram realizadas com o pH-metro HANNA Instruments HI 2221 Calibration Check pH/ORP meter, termômetro químico incoterm líquido vermelho, equipamento multiparâmetros HANNA Instruments HI 9828 e turbidímetro, respectivamente. Para as análises de nitrito e nitrato foi realizado o cálculo de incerteza (equação 28) considerando as especificações técnicas do Colorímetro, modelo DR890 da marca HACH, e os métodos 8171 (Diazotization Method - Nitrito) e 8171 (Cadmium Reduction Method - Nitrato).

Equação para cálculo do desvio padrão residual (Eurachem/CITAC, 2012):

$$u\,(x_0) = \frac{S}{b} \cdot \sqrt{\frac{1}{p} + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - x^{-})^2}{Sxx}} \qquad (28)$$

4.7 INÓCULO E ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS

As amostras foram espalhadas com alça de Drigalsky em placas de Petri com meio PCA (ágar de contagem de placas) e permaneceram 48 horas a 35°C na estufa. A quantidade de amostra utilizada foi de 0,1 mL. As análises incluíram não só as amostras tratadas com o plasma frio, mas também um meio PCA sem amostra, um meio somente com água destilada, outro com amostra sem tratamento com o plasma e um com as bactérias, para comprovar sua ativação.

5 RESULTADOS

5.1 ÁGUA BRUTA

A amostra de água que não foi submetida ao tratamento apresentou alto índice de microrganismos (Tabela 1 e Tabela 3) comparando-se com as amostras tratadas com PNT, o que consequentemente representa um alto índice de contaminação e grandes riscos à saúde pública.

5.1.1 Turbidez

A turbidez da água coleta foi de 22 NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez), a análise foi realizada para identificar a possibilidade de interferência no tratamento com PNT e radiação ultravioleta.

5.2 PLASMA NÃO TÉRMICO

Na Tabela 1 pode-se verificar os resultados em relação a inativação das bactérias e condições físico-químicas da água.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos e microbiológicos da amostra de água bruta e da água tratada com PNT.

	Amostras	**pH**	**Cond. µS / cm^A**	**Temp. °C**	**Contagem das bactérias (UFC/mL)**
Rio		7,27	177	27	Incontável (IN)
Rio		7,27	177	27	Incontável (IN)
PNT		6.01	261	39	2

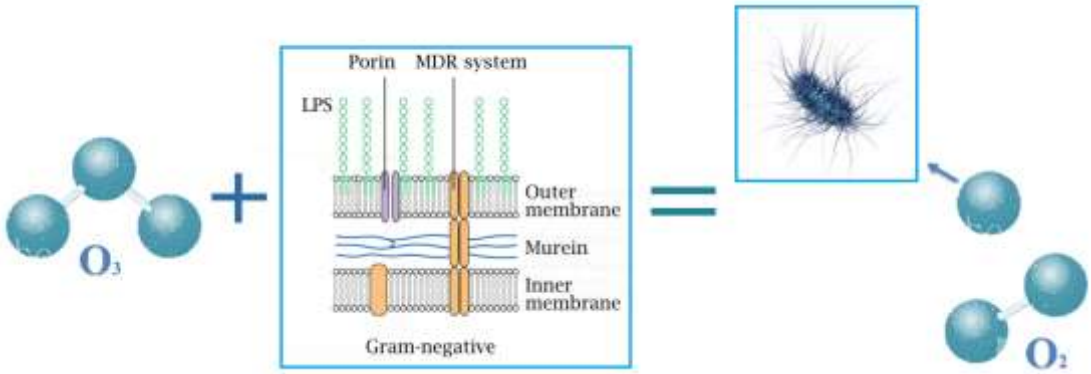
	Amostras	pH	Cond. µS / cm^A	Temp. °C	Contagem das bactérias (UFC/mL)
PNT		6.01	261	39	2

*Problema no equipamento.

Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

A descarga na interface gás-líquido forma espécies reativas de oxigênio e nitrogênio responsáveis pela oxidação das membranas celulares e aminoácidos (Figura 12), formação de ROS (espécies reativas de oxigênio) e RNS (espécies reativas de nitrogênio), radicais hidroxila, gás ozônio, óxido nítrico e dióxido de nitrogênio, sendo esse um mecanismo importante de inibição microbiana mediada pelo plasma frio (LAROUSSI; LEIPOLD, 2004). A descarga de PNT também proporciona a radiação ultravioleta (UV) que além de inativar os microrganismos, causando danos às membranas celulares, é capaz de causar modificações no DNA e consequente replicação celular inadequada (GALLAGHER et al., 2007).

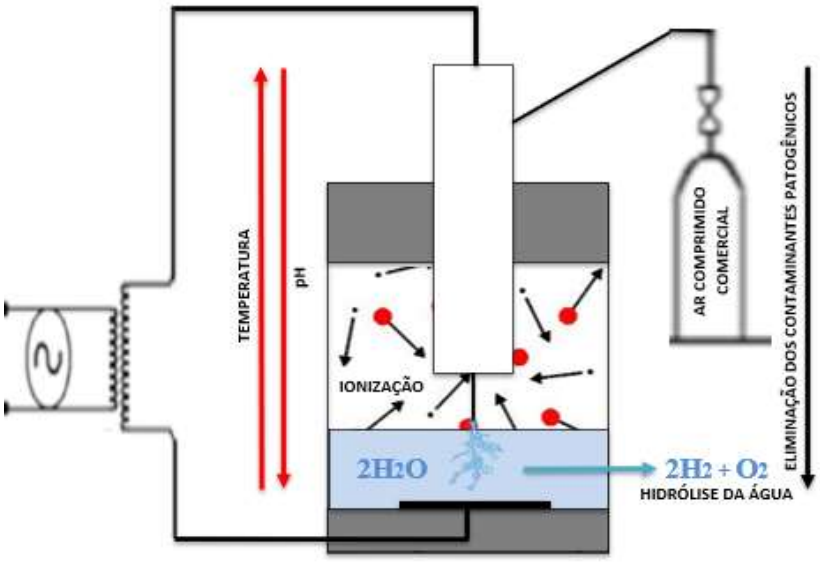
Figura 12. Ação do ozônio (oxidação) no microrganismo.



Fonte: Adaptada pela autora, 2021.

As cargas elétricas nas espécies de plasma e a hidrólise da água são responsáveis pelo aumento condutividade e redução do pH (CONNOLLY, et al., 2013; ERCAN, et al., 2013; ZHANG, et al., 2017), o que contribui com a inativação de bactérias (Figura 13) (CUBAS, 2019). E a inativação bacteriana é acelerada quando a exposição plasmática ocorre em condições ácidas (Chandana et al., 2018).

Figura 13. Desenho esquemático da ação do PNT e comportamento das condições físico-químicas e microbiológicas.

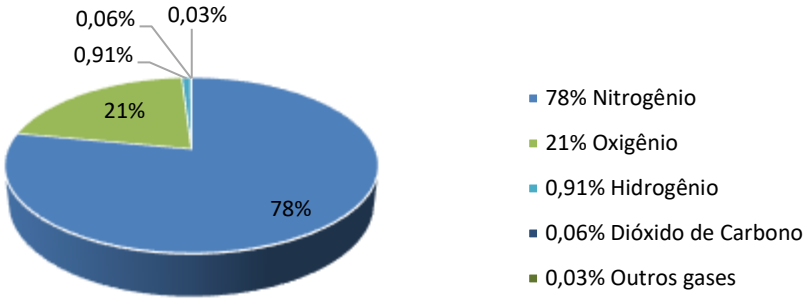


Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

A ionização do ar é outro fator que influenciou na redução do pH, após o tratamento com PNT, pois trata-se de uma reação química entre o próton e a molécula e/ou íons. Entretanto, as espécies formadas são rapidamente consumidas no meio reacional não alterando consideravelmente o pH (PARVULUSCU et al., 2012).

Além disso, o gás plasmogênico utilizado, que é composto nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono e outros gases (Figura 14), reage com as espécies reativas de nitrogênio, contribuindo com a acidificação da amostra. A acidificação da amostra ao utilizar o ar atmosférico como gás plasmogênico também foi testemunhada por Silva, 2017, Cubas et al., 2019 e Giardina et al., (2018).

Figura 14. Composição do ar atmosférico.



Fonte: Adaptado pela autora, 2021.

Observou-se que a estrutura do reator auxilia na dissipação de calor e promover a geração contínua de plasma em pressão atmosférica desequilibrada, onde a temperatura do elétron é superior à temperatura do íon ou do gás (TOCHIKUBO, 2016).

Tabela 2. Índices de nitrito e nitrato obtidos.

	Nitrito $U_{[curva]}$ 0,07 mg/L	**Nitrato** $U_{[curva]}$ 0,004 mg/L
Rio	0,193 mg/L	0,9 mg/L
Rio	0,172 mg/L	0,8 mg/L
PNT	1,238 mg/L	5.5 mg/L
PNT	1,238 mg/L	5,5 mg/L

Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

O índice de nitrato não excede os teores máximos estabelecidos pela Portaria de Consolidação n° 5/2017 (BRASIL, 2017), onde Nitrato: 10,0 mg/L de N, ou seja, não apresentam risco a qualidade da água, porém o índice de nitrito foi superior a portaria citada, sendo Nitrito: 1,0 mg/L de N (Tabela 2). O aumento nos índices de nitrito e nitrato são evidenciados devido a série nitrogenada do rio e a entrada de oxigênio no sistema.

O nitrogênio está presente nos ambientes aquáticos e a água é capaz de dissolver gases, por isso, a identificação dos teores obtidos e as análises realizadas são fundamentais, pois deve-se atender os padrões estabelecidos (BRAGA, 2006).

O efeito negativo do plasma não térmico nas concentrações de nitrito e nitrato se deve à presença de ar úmido na câmara de plasma (GRINEVICH et al., 2011).

A formação de espécies oxidantes reativas e o aumento do teor de nitrito na amostra são causados pela liberação de íons de acordo com as Eqs. 28-31 (LUKES et al., 2014; RAYSON et al., 2012).

$$NO + NO2 + H2O \rightarrow 2NO\text{-}2 + 2H+ \quad (28)$$
$$2NO2 + H2O \rightarrow NO\text{-}2 + NO\text{-}3 + 2H+ \quad (29)$$
$$N2O3 + H2O \rightarrow 2NO\text{-}2 + 2H+ \quad (30)$$
$$N2O4 + H2O \rightarrow NO\text{-}2 + 2H+ \quad (31)$$

Além disso, a formação das espécies de nitrito na água e a formação de radicais plasmáticos evidencia a formação de radicais altamente bactericidas, onde as espécies de vida curta, como $\bullet O_2$ e •OH, encontradas em meio ácido são convertidos em HOO• e podem facilmente penetrar na parede celular bacteriana e destruir os componentes intracelulares, desempenhando um papel importante na inativação bacteriana no ambiente aquoso (SHAW et al., 2018; KLINHOM et al., 2019; CUBAS et al., 2019; KORSHUNOV & IMLAY, 2002).

5.3 RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

Na Tabela 3 pode-se verificar os resultados em relação a inativação das bactérias e condições físico-químicas da água.

Tabela 3. Parâmetros físico-químicos e microbiológicos da amostra de água bruta e da água tratada com radiação UV.

	Amostras	**pH**	**Cond. µS / cm^A**	**Temp. °C**	**Contagem das bactérias (UFC/mL)**
Rio		7,27	177	27	Incontável (IN)
Rio		7,27	177	27	Incontável (IN)
UV		7.51	*	27	Incontável (IN)
UV		7.51	*	27	Incontável (IN)

*Problema no equipamento.

Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

O aumento da condutividade da água representa a oxidação das estruturas moleculares (CAUX, 2009). Com base nisso, e na ineficácia da eliminação dos microrganismo, pressupõe-se que a condutividade da água não sofreu grandes alterações.

A alcalinidade do pH (representada pela presença de íons HCO2- e CO3-²) é um dos fatores que interferem no tratamento de compostos orgânicos presentes na água (responsáveis pelo crescimento bacteriano), pois durante o sequestro de radicais hidroxila, pode ocorrer uma disputa entre o carbono inorgânico que compõe a alcalinidade e o carbono orgânico na fase oxidativa da fotocatálise heterogênea (LEGRINI et al., 1993).

Os índices de nitrato e nitrito obtidos estão em conformidade com teores máximos estabelecidos pela Portaria de Consolidação n° 5/2017 (BRASIL, 2017), onde Nitrato: 10,0 mg/L de N e Nitrito 1,0 mg/L de N, ou seja, não apresentam risco a qualidade da água (Tabela 4).

Tabela 4. Índices de nitrito e nitrato obtidos.

	Nitrito $U_{[curva]}$ 0,07 mg/L	**Nitrato** $U_{[curva]}$ 0,004 mg/L
Rio	0,193 mg/L	0,9 mg/L
Rio	0,172 mg/L	0,8 mg/L
UV	0.170 mg/L	0.9 mg/L
UV	0.170 mg/L	0.9 mg/L

Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

A radiação ultravioleta é capaz de provocar alterações estruturais no material genético das células de alguns germicidas (CASAS-MONROY et al., 2018; WEF, 1996). Entretanto, a inativação microbiana só ocorre se houver a absorção da luz responsável pela reação fotoquímica capaz de alterar componentes moleculares essenciais para as funções celulares, causando danos nos ácidos nucléicos (DNA e RNA) dos microrganismos inativando-os

(CASAS-MONROY et al., 2018). O estudo demonstrou que o reator UV foi ineficiente para inativação dos microrganismos em água, pois a turbidez da água provocou a reversão dos efeitos destrutivos da UV, através de mecanismos de reativação (fotoreativação) (USEPA, 1999).

5.4 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE DESINFECÇÃO DA ÁGUA

Com base na Portaria n° 2.914/2011, a tecnologia de plasma não térmico se apresentou mais eficiente que a radiação ultravioleta, pois reduziu significativamente a quantidade de microrganismos (BRASIL, 2011).

A conformidade em relação ao índice de nitrito da água tratada com PNT, disposto pela Portaria de Consolidação n° 5/2017 (BRASIL, 2017), pode ser atingida a partir do processo de redução da Demanda Química de Oxigênio - DQO, responsável pelo aumento dos índices de nitrito e nitrato (DUARTE, 2018).

A radiação UV é um processo físico que não requer o uso de produtos químicos e de fácil e segura operação. Entretanto, a eficiência do reator de ultravioleta está atrelada as características do meio, a dosagem e ao comprimento da onda (BARBOSA, 2016).

O plasma não térmico é uma alternativa viável para o tratamento da água, por ser um método atóxico e ambientalmente favorável, pois não requer o uso de químicos, promove a geração de ozônio no meio sem interferir no custo operacional, tem um grande potencial oxidativo e possibilita a eliminação de microrganismos patogênicos (HAAG & HOIGNE, 1983; CHEN & WANG, 2019; BENETOLLI et al., 2011; JIANG et al., 2014). Entretanto, é uma tecnologia mais sofisticada, o que dificulta a aquisição da mesma.

O estudo das tecnologias citadas é essencial, pois a demanda por diferentes tecnologias de desinfecção da água vem sendo evidenciada, tal como a Portaria n° 888/2021 – que altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação n° 5/2017 – que inclui artigos sobre a desinfecção por ozônio e ultravioleta (BRASIL, 2021).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou que o plasma não térmico é uma tecnologia eficiente para a desinfecção da água. Observou-se que o aumento da temperatura está atrelado a estrutura do reator. As cargas elétricas nas espécies de plasma (ionização), a hidrólise da água e o gás plasmogênico utilizado foram responsáveis pelo aumento da condutividade, redução do pH e consequentemente, eliminação dos microrganismos. O índice de nitrato está em conformidade com os teores estabelecidos pela Portaria de Consolidação n° 5/2017 do Ministério da Saúde, mas o índice de nitrito foi superior ao teor estabelecido pela portaria supracitada devido a influência da série nitrogenada do rio e a entrada de oxigênio no sistema.

O tratamento da água com o reator de radiação ultravioleta utilizado, foi ineficiente para a eliminação dos microrganismos. Logo, a oxidação da estrutura molecular dos microrganismos não foi significativa. A condutividade da água não sofreu grandes alterações e a alcalinidade do pH foi um dos possíveis fatores que interferiram no tratamento da água e a turbidez da água provocou a reversão dos efeitos destrutivos da UV, através de mecanismos de reativação. Os índices de nitrato e nitrito obtidos estão em conformidade com teores máximos estabelecidos pelo Ministério da Saúde.

Os resultados demonstram que dentre os métodos de desinfecção da água analisados, a tecnologia de plasma não térmico é o método mais eficiente para eliminação dos microrganismos. As espécies reativas ROS e NOS e as condições físico-químicas, acidificação do pH, formação de espécies nitrogenadas, condutividade, dissipação do calor e pressão atmosférica, contribuem com a oxidação da membrana celular dos microrganismos.

A viabilidade do método também está atrelada com a atoxidade do mesmo. É um processo movido a eletricidade evitando o uso de produtos químicos. Uma alternativa ambientalmente favorável que pode ser aplicada no tratamento de água voltada ao abastecimento público.

7 TRABALHOS FUTUROS

Para um entendimento mais abrangente da eficiência das tecnologias estudadas, assim como viabilidade das mesmas, os seguintes estudos são sugeridos:

- Realizar o estudo da viabilidade econômica do reator de plasma não térmico e do reator de radiação ultravioleta.

- Realizar todas as análises físico-químicas e microbiológicas requeridas pelas legislações pertinentes, para caracterização completa da água, determinação da classe do Córrego dos Pombos de acordo com o CONAMA 357/2015, e análise do comportamento do plasma e ultravioleta perante os parâmetros físico-químicos.

- Desenvolver um reator de fluxo contínuo para avaliar a eficiência do mesmo e identificar a aplicação das tecnologias apresentadas em grande escala.

8 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9898 de 30 de junho de 1987. Preservação e técnicas de amostragem de afluente líquidos e corpos receptores - Procedimento**. Disponível em: https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=5400. Acesso em: 16 mar. 2021

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUA – ANA. **Indicadores de Qualidade – Índice de Qualidade das Águas (IQA)**. Disponível em: http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx. Acesso em: 9 mai. 2021.

AGENDA 2030. **A integração dos ODS**. Disponível em: http://www.agenda2030.org.br/os_ods/. Acesso em: 15 mai. 2021.

ALSHEYAB, M. A., & MUÑOZ, A. H. **Comparative study of ozone and MnO2/O3 effects on the elimination of TOC and COD of raw water at the Valmayor station**. Desalination. 207(1-3), 179–183, 2007.

ALVIM, C. B., MOREIRA, V. R., ABNER, Y. R. L., SANTOS, A. V., LANGE, L. C., MOREIRA, R. P. M., … AMARAL, M. C. S. **Comparison of UV, UV/H2O2 and ozonation processes for the treatment of membrane distillation concentrate from surface water treatment: PhACs removal and Environmental and Human health risk assessment.** Chemical Engineering Journal, 125482, 2020.

AMERICAN REPUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for examination of water wasterwater.** 21. ed. Washington: APHA, 2005.

AMY, G.L., BULL, R.J., CRAUN, G.F. **Environmental Health Criteria 216: Disinfectants and Disinfectant By−products**. World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2000.

ANTÔNIO, J.M. **Desinfecção de Esgoto Sanitário por Processos Oxidativos Avançados (POA's) utilizando nanopartículas de TiO2**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

ARAÚJO, S. C. de S.; SALLES, P. S. B. de A.; SAITO, C. H. **Modelos qualitativos, baseados na dinâmica do oxigênio dissolvido, para a avaliação da qualidade das águas em bacias hidrográficas. Desenvolvimento tecnológico e metodológico para medição entre usuários e comitês de bacia hidrográfica**. Brasília: Departamento de Ecologia. Editora da UNB. p.9-24, 2004.

AUTIN, O., ROMELOT, C., RUST, L., HART, J., JARVIS, P., MACADAM, J., … JEFFERSON, B. **Evaluation of a UV-light emitting diodes unit for the removal of micropollutants in water for low energy advanced oxidation processes**. Chemosphere, 92(6), 745–751, 2013.

BALDISSARELLI, V. Z. **Estudo da degradação do ch4 e da mistura ch4/co2 por plasma térmico de argônio: identificação e caracterização dos produtos obtidos**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopolis, 2012.

BARARPOUR, S. T., FEYLIZADEH, M. R., DELPARISH, A., QANBARZADEH, M., RAEISZADEH, M., & FEILIZADEH, M. **Investigation of 2-nitrophenol solar degradation in the simultaneous presence of K 2 S 2 O 8 and H 2 O 2: Using experimental design and artificial neural network**. Journal of Cleaner Production, 176, 1154–1162, 2018.

BARAZESH, J.M., HENNEBEL, T., JASPER, J.T. AND SEDLAK, D.L. **Modular advanced oxidation process enabled by cathodic hydrogen peroxide production**. Environ. Sci. Technol. 49(12), 7391-7399, 2015.

BARBOSA, A. de O. **Uso da radiação ultravioleta como técnica avançada de tratamento de água**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Cívil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

BARROS, W. de M. **Riscos associados a utilização do agente desinfetante cloro no tratamento de água potável: uma revisão de literatura**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, 2018.

BENETOLI L. L. O. **Desenvolvimento e aplicação de reator de plasma frio na degradação do corante azul de metileno em meio aquoso**. Tese (Doutorado em Química) - UFSC, Florianópolis, 2011.

BENETOLI, L. O. DE B., CADORIN, B. M., POSTIGLIONE, C. DA S., SOUZA, I. G. DE, & DEBACHER, N. A. **Effect of temperature on methylene blue decolorization in aqueous medium in electrical discharge plasma reactor**. Journal of the Brazilian Chemical Society, 22(9), 2011.

BILOTTA, P.; DANIEL, L.A. **Use of germicidal lamps in the disinfection of sanitary wastewater**. Rev. Ambient. Água [online]. vol.7, n.1, pp.120-129. ISSN 1980-993X, 2012.

BKR AMBIENTAL. **Saneamento em Pauta**. Disponível em: < https://blog.brkambiental.com.br/etapas-tratamento-de-agua/ >. Acesso em: 8 mai. 2021.

BRAGA E. DE A. S. **Determinação dos compostos inorgânicos nitrogenados (amônia, nitrito e nitrato) e fósforo total, na água do açude gavião, e sua contribuição para a eutrofização**. Dissertação (Mestrado) - UFC, Fortaleza, 2006.

BRAGA, T. S.; URRUCHI, W. I.; MASSI, M.; BICUDO, R.O. **Estudo da aplicação de ozônio para pré-tratamento de água para abastecimento**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, 2007.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº. 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria 2.914, de 12 de dezembro de 2011**. Procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para o consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: Secretaria de Vigilância em Saúde, 2012. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acesso em: 27 mar. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília, DF: DOU, 2017. Disponível em: https://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolida----o-n---5--de-28-de-setembro-de-2017.pdf. Acesso em: 04 abr. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS n° 888, de 04 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: Secretaria de Vigilância em Saúde, 2012. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562. Acesso em: 10 mai. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano/ Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde**. – Brasília: Ministério da Saúde. 212 p. – (Série B. Textos Básicos de Saúde) ISBN 85-334-1240-1, 2006.

BRUGGEMAN, P., DEGROOTE, J., LEYS, C., VIERENDEELS, J. **Plasma characteristics in air and vapor bubbles in water**. 859–862, 2007.

C. VON SONNTAG. **Advanced oxidation processes: mechanistic aspects**. Water Sci Technol 1; 58 (5): 1015–1021, September 2008.

C.J. PERRUCCI, S.G.C. RODRIGUES, E.P. SILVA. **Aplicação de peróxido de hidrogênio em substituição ao cloro na etapa de pré-oxidação no processo de tratamento de águas de abastecimento como alternativa para a redução da formação de trihalometanos**. Congresso ABES FENASSAN, 2017.

CASAS-MONROY, O., LINLEY, R. D., CHAN, P.-S., KYDD, J., VANDEN BYLLAARDT, J., & BAILEY, S. **Evaluating efficacy of filtration + UV-C radiation for ballast water treatment at different temperatures**. Journal of Sea Research, 133, 20–28, 2018.

CASTRO, E. **Princípios de Control Microbiológico com Oxidantes**. Água Latinoamérica, v.3, n.2 mar/abr. 2003.

CAUX, L.S de. **Modificação da Celulose Kraft Branqueada de Eucalipto por Tratamento Térmico e Radiação Ultravioleta**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, 2009.

Cerne Ambiental. **Plano Municipal de Saneamento Básico CPMSB: de Palhoça**. Volume 1, Etapa 5, 2015

CHANDANA L., SANGEETHA C.J., SHASHIDHAR T., SUBRAHMANYAM CH**. Non-thermal atmospheric pressure plasma jet for the bacterial inactivation in an aqueous médium**. Science of The Total Environment, Volumes 640–641, Pages 493-500, 2018.

CHAPLIN, B. P. **The Prospect of Electrochemical Technologies Advancing Worldwide Water Treatment**. Accounts of Chemical Research 52(3), 596-604, 2019.

CHAPMAN, B. **Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching**. 1. ed. NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1980.

CHEN, H. L., LEE, H. M., CHEN, S. H., & CHANG, M. B. **Review of Packed-Bed Plasma Reactor for Ozone Generation and Air Pollution Control**. Industrial & Engineering Chemistry Research, 47(7), 2122–2130, 2008.

CHEN, H., WANG, J. L. **Catalytic ozonation of sulfamethoxazole over Fe3O4/Co3O4 composites**. Chemosphere, 234:14-24, 2019.

CHEN, L., XUE, Y., LUO, T., WU, F., & ALSHAWABKEH, A. N. **Electrolysis-assisted UV/sulfite oxidation for water treatment with automatic adjustments of solution pH and dissolved oxygen**. Chemical Engineering Journal, 403, 126278, 2020.

CHEN, W., BAO, Y., LI, X., HUANG, J., XIE, J., & LI, L. **Role of Si-F groups in enhancing interfacial reaction of Fe-MCM-41 for pollutant removal with ozone**. Journal of Hazardous Materials, 122387, 2020.

CHEVREMONT, A. -C., BOUDENNE, J.-L., COULOMB, B., & FARNET, A.-M. **Fate of carbamazepine and anthracene in soils watered with UV-LED treated wastewaters**. Water Research, 47(17), 6574–6584, 2013.

CONNOLLY, J., VALDRAMIDIS, V. P., BYRNE, E., KARATZAS, K. A., CULLEN, P. J., KEENER, K. M., & MOSNIER, J. P. **Characterization and antimicrobial efficacy against E. coli of a helium/air plasma at atmospheric pressure created in a plastic package**. Journal of Physics D: Applied Physics, 46(3), 035401, 2013.

COURA, F. M., LAGE, A. P., & HEINEMANN, M. B. **Patotipos de *Escherichia coli* causadores de diarreia em bezerros: uma atualização**. Pesquisa Veterinária Brasileira, 34(9), 811–818, 2014.

CREMA A. P. S.; DEBACHER, N. A. **Degradação de contaminantes emergentes aplicando plasma não térmico e sistema híbrido**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Programa de Pós-Graduação em Química, 2019.

CREMA, A. P. S., PIAZZA BORGES, L. D., MICKE, G. A., & DEBACHER, N. A. **Degradation of indigo carmine in water induced by non-thermal plasma, ozone and hydrogen peroxide: A comparative study and by-product identification**. Chemosphere, 125502, 2019.

CUBAS, A. L. V., FERREIRA, F. M., GONÇALVES, D. B., MACHADO, M. M., DEBACHER, N. A., MOECKE, E. H. S. **Influence of non-thermal plasma reactor geometry and plasma gas on the inactivation of *Escherichia coli* in water**. Chemosphere, 2021.

CUBAS, A. L. V., MACHADO, M. DE M., BIANCHET, R. T., HERMANN, K. A. DA C., BORK, J. A., DEBACHER, N. A., MOECKE E. H. S. **Oil extraction from spent coffee grounds assisted by non-thermal plasma**. Separation and Purification Technology, 117171, 2020.

CUBAS, A. L. V., MACHADO, M. DE M., RAMOS, J. DOS S., ZANCO, J. J., RIBEIRO, D. H. B., MOECKE E. H. S., DEBACHER, N. A. **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, 2019.

DERISIO, J.C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. São Paulo: Cetesb, 1992.

DEVI, Y., THIRUMDAS, R., SARANGAPANI, C., DESHMUKH, R. R., & ANNAPURE, U. S. **Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts. Food Control**, 77, 187–191, 2017.

DIRISU, G. B. and OKONKWO, UGOCHUKWU C. and OKOKPUJIE, IMHADE P. and FAYOMI, O. S. I. **Comparative Analysis of the Effectiveness of Reverse Osmosis**

and Ultraviolet Radiation of Water Treatment. Journal of Ecological Engineering, 20 (1). pp. 61-75, 2019.

ERCAN, U. K., WANG, H., JI, H., FRIDMAN, G., BROOKS, A. D., & JOSHI, S. G. **Nonequilibrium Plasma-Activated Antimicrobial Solutions are Broad-Spectrum and Retain their Efficacies for Extended Period of Time**. Plasma Processes and Polymers, 10(6), 544-555, 2013.

EURACHEM/CITAC. **Quantifying Uncertainly in Analytical Measurement**. 3nd ed., 2012.

EVERETT, M. J., LAL, A., GORDON, D., WHARTON, K., CLAYTON, C. E., MORI, W. B., & JOSHI, C. **Evolution of Stimulated Raman into Stimulated Compton Scattering of Laser Light via Wave Breaking of Plasma Waves**. Phys. Rev. Lett., 74(8), 1355–1358, 1995.

FARIA, P. C. C., ÓRFÃO, J. J. M., PEREIRA, M. F. R. **Activated carbon and ceria catalysts applied to the catalytic ozonation of dyes and textile effluents**. Applied Catalysis B: Environmental, 88, 341-350, 2009.

FRIDMAN, A. **Plasma chemistry**. Cambridge University Press; Edição: 1, Cambridge University Press: New York, 2008.

FUNASA. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Brasília/DF: Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. 1ª Edição, p.19, 2014.

GALLAGHER, M. J., VAZE, N., GANGOLI, S., VASILETS, V. N., GUTSOL, A. F., MILOVANOVA, T. N., … FRIDMAN, A. A. **Rapid Inactivation of Airborne Bacteria Using Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Grating Discharge**. IEEE Transactions on Plasma Science, 35(5), 1501–1510, 2007.

GEORGE, A., SHEN, B., CRAVEN, M., WANG, Y., KANG, D., WU, C., TU, X. **A Review of Non-Thermal Plasma Technology: A novel solution for CO2 conversion and utilization**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 135,2021,109702, ISSN 1364-0321, 2021.

GHEZZAR, M. R., ABDELMALEK, F., BELHADJ, M., BENDERDOUCHE, N., & ADDOU, A. **Gliding arc plasma assisted photocatalytic degradation of anthraquinonic acid green 25 in solution with TiO2**. Applied Catalysis B: Environmental, 72(3-4), 304–313, 2007.

GIARDINA, A., TAMPIERI, F., MAROTTA, E., & PARADISI, C. **Air non-thermal plasma treatment of Irgarol 1051 deposited on TiO 2**. Chemosphere, 210, 653–661, 2018.

GOMES, T. A. T., ELIAS, W. P., SCALETSKY, I. C. A., GUTH, B. E. C., RODRIGUES, J. F., PIAZZA, R. M. F., … MARTINEZ, M. B. **Diarrheagenic *Escherichia coli***. Brazilian Journal of Microbiology, 47, 3–30, 2016.

GOTTSCHALK C, LIBRA J A, SAUPE A. **Ozonation of water and waste water: A practical guide to understanding ozone and its applications**. John Wiley & Sons, 2009.

GOUVÊA, M. M., LIMA, G. S., SILVA NETO, A. A., PEREIRA NETTO, A. D., MARQUES, F. F. DE C. **Application of ultraviolet radiation as a contribution to green chemistry and construction of an alternative and low-cost photochemical reactor for pre-treatment of samples**. Química Nova, 37 (2), 2014.

GRABOWSKI, L. R., VELDHUIZEN, E. M. VAN, PEMEN, A. J. M., & RUTGERS, W. R. **Breakdown of methylene blue and methyl orange by pulsed corona discharge**. Plasma Sources Science and Technology, 16(2), 226–232, 2007.

GRABOWSKI, R. **Kinetics of Oxidative Dehydrogenation of C2-C3Alkanes on Oxide Catalysts**. Catalysis Reviews, 48(2), 199–268, 2006.

GRAÇA, C. A. L., LIMA, R. B., PEREIRA, M. F. R., SILVA, A. M. T., & FERREIRA, A. **Intensification of the ozone-water mass transfer in an oscillatory flow reactor with innovative design of periodic constrictions: optimization and application in ozonation water treatment**. Chemical Engineering Journal, 124412, 2020.

GRAUMANS, M. H. F., HOEBEN, W. F. L. M., RUSSEL, F. G. M., & SCHEEPERS, P. T. J. **Oxidative degradation of cyclophosphamide using thermal plasma activation and UV/H2O2 treatment in tap water**. Environmental Research, 109046, 2019.

GRINEVICH, V. I., KVITKOVA, E. Y., PLASTINIA, N. A., RYBKIN, V. V. **Application of dielectric barrier discharge for waste water purification**. Plasma Chemistry and Plasma Process, vol. 31, pp. 573-583, 2011.

GUO, D., ZHANG, L., KONG, S., LIU, Z., LI, X., & PAN, H. **Metabolic Engineering of *Escherichia coli* for Production of 2-Phenylethanol and 2-Phenylethyl Acetate from Glucose**. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66(23), 5886–5891, 2018.

HAAG W R, HOIGNE J. **Ozonation of bromide-containing waters: kinetics of 1109 formation of hypobromous acid and bromate**. Environmental Science & 1110 Technology, 17, 261-267, 1983.

HASHIM, S. A., SAMSUDIN, F. N. D. BINTI, WONG, C. S., ABU BAKAR, K., YAP, S. L., & MOHD. ZIN, M. F. **Non-thermal plasma for air and water remediation**. Archives of Biochemistry and Biophysics, 605, 34–40, 2016.

HAYASHI, D., HOEBEN, W. F. L. M., DOOMS, G., VELDHUIZEN, E. M. VAN, RUTGERS, W. R., & KROESEN, G. M. W. **LIF diagnostic for pulsed-corona-induced degradation of phenol in aqueous solution**. Journal of Physics D: Applied Physics, 33(12), 1484–1486, 2000.

HODGES, B. C., CATES, E. L., & KIM, J.-H. **Challenges and prospects of advanced oxidation water treatment processes using catalytic nanomaterials**. Nature Nanotechnology, 13(8), 642–650, 2018.

HOIGNÉ J. **Chemistry of aqueous ozone and transformation of pollutants by ozonation and advanced oxidation processes**. In Quality and treatment of drinking water II, Springer, Berlin, Heidelberg. 83-141, 1998.

HOLZER, F., & LOCKE, B. R. **Influence of High Voltage Needle Electrode Material on Hydrogen Peroxide Formation and Electrode Erosion in a Hybrid Gas–Liquid Series Electrical Discharge Reactor**. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 28(1), 1–13, 2007.

HOLZER, F., & LOCKE, B. R. **Multistage Gas−Liquid Electrical Discharge Column Reactor For Advanced Oxidation Processes**. Industrial & Engineering Chemistry Research, 47(7), 2203–2212, 2008.

HU C, XING S, QU J, HE H. **Catalytic ozonation of herbicide 2, 4-D over cobalt oxide supported on mesoporous zirconia**. The Journal of Physical Chemistry C, 112, 5978-5983, 2008.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Projeção da População do Brasil e das Unidades da Federação**. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html. Acesso em: 31 mar. 2021.

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Ministério do Meio Ambiente. **Decreto n° 14.250, de 5 de junho de 1981**. Regulamenta dispositivos da Lei nº 5.793, de 15 de outubro de 1980, referentes à proteção e à melhoria da qualidade ambienta. Disponível em: http://icmbio.gov.br/portal/. Acesso em: 27 mar. 2021.

JIANG B., ZHENG J., QIU S., WU M., ZHANG Q., YAN Z., XUE Q. **Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation**. Chemical Engineering Journal, 236, 348–368, 2014.

JOSHI, A. A., LOCKE, B. R., ARCE, P., & FINNEY, W. C. **Formation of hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and aqueous electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution**. Journal of Hazardous Materials, 41(1), 3–30, 1995.

KIEFER, K., BADER, T., MINAS, N., SALHI, E., JANSSEN, E. M. L., VON GUNTEN, U., & HOLLENDER, J. **Chlorothalonil transformation products in drinking water resources:Wide spread and challenging to abate**. Water Research, 116066, 2020.

KLINHOM S, SIENGDEE P, NGANVONGPANIT K, BOONYAWAN D, SILVA-FLETCHER A, THITARAM C. **Effect of culture medium treated with non-thermal plasma energy on the growth and viability in-vitro of fibroblast cells from Asian elephants (Elephas maximus)**. Kafkas Univ Vet Fak Derg, 25 (6): 815- 823, 2019.

KORSHUNOV, S.S., IMLAY, J.A. **A potential role for periplasmic superoxide dismutase in blocking the penetration of external superoxide into the cytosol of Gram-negative bacteria**. Mol. Microbiol. 43, 95–106, 2002.

KRISHNA, S., CERIANI, E., MAROTTA, E., GIARDINA, A., ŠPATENKA, P., & PARADISI, C. **Products and mechanism of verapamil removal in water by air non-thermal plasma treatment**. Chemical Engineering Journal, 292, 35–41, 2016.

LAROUSSI, M., & LEIPOLD, F. **Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure.** International Journal of Mass Spectrometry, 233(1-3), 81–86, 2004.

LEGRINI, O., OLIVEIROS, E., BRAUN, A.M. **Photochemical processes for water treatmen**. Chem. Rev., v.93, n.2, p.671-698, 1993.

LIMA, J. P. M.; ROLLEMBERG, S. L. S. **Técnicas Simplificadas de Tratamento de Água**. Revista Virtual de Química, 2020.

LOCKE, B. R., & SHIH, K.-Y. **Review of the methods to form hydrogen peroxide in electrical discharge plasma with liquid water**. Plasma Sources Science and Technology, 20(3), 034006, 2011.

LUKES, P., & LOCKE, B. R. **Degradation of Substituted Phenols in a Hybrid Gas−Liquid Electrical Discharge Reactor**. Industrial & Engineering Chemistry Research, 44(9), 2921–2930, 2005.

LUKES, P., DOLEZALOVA, E., SISROVA, I., & CLUPEK, M. **Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H2O2and HNO2.** Plasma Sources Science and Technology, 23(1), 015019, 2014.

M'ARIMI, M. M., MECHA, C. A., KIPROP, A. K., & RAMKAT, R. **Recent trends in applications of advanced oxidation processes (AOPs) in bioenergy production: Review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 121, 109669, 2020.

MAGUREANU, M., BRADU, C., & PARVULESCU, V. I. **Plasma processes for the treatment of water contaminated with harmful organic compounds**. Journal of Physics D: Applied Physics, 51(31), 313002, 2018.

MAGUREANU, M., MANDACHE, N. B., & PARVULESCU, V. I. **Degradation of pharmaceutical compounds in water by non-thermal plasma treatment**. Water Res., 81, 124–136, 2015.

MAHMOUD, A., & FREIRE, R. S. **Métodos emergentes para aumentar a eficiência do ozônio no tratamento de águas contaminadas**. Química Nova, 30(1), 198–205, 2007.

MATAFONOVA, G., & BATOEV, V. **Recent advances in application of UV light-emitting diodes for degrading organic pollutants in water through advanced oxidation processes: A review**. Water Research, 132, 177–189, 2018.

MEYER, SHEILA T. **O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública**. Cadernos de Saúde Pública [online], v. 10, n. 1, pp. 99-110, 1994.

MIKLOS, D. B., REMY, C., JEKEL, M., LINDEN, K. G., DREWES, J. E., & HÜBNER, U. **Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical review**. Water Research, 139, 118–131, 2018.

MILOSAVLJEVIĆ, A. R., VÍKOR, G., PEŠIĆ, Z. D., KOLARŽ, P., ŠEVIĆ, D., MARINKOVIĆ, B. P., … PIRAUX, L. **Guiding of low-energy electrons by highly ordered Al2O3 nanocapillaries**. Physical Review A, 75(3), 2007.

MOHAMADI, L., BAZRAFSHAN, E., RAHDAR, A., LABUTO, G., KAMALI, A. R. **Nanostructured MgO-enhanced catalytic ozonation of petrochemical wastewater**. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, ISSN 0366-3175, 2020.

MOREAU, M., ORANGE, N., & FEUILLOLEY, M. G. J. **Non-thermal plasma technologies: New tools for bio-decontamination**. Biotechnology Advances, 26(6), 610–617, 2008.

MOREIRA, N. F. F., ORGE, C. A., RIBEIRO, A. R., FARIA, J. L., NUNES, O. C., PEREIRA, M. F. R., & SILVA, A. M. T. **Fast mineralization and detoxification of amoxicillin and diclofenac by photocatalytic ozonation and application to an urban wastewater**. Water Research, 87, 87–96, 2015.

NAKADA, L. Y. K., DOS SANTOS, L. U., GUIMARÃES, J. R. **Pre-ozonation of surface water: An effective water treatment process to reduce the risk of infection by Giardia in drinking water**. Environmental Pollution, 266, 115144, 2020.

NIHEMAITI, M., MIKLOS, D. B., HÜBNER, U., LINDEN, K. G., DREWES, J. E., & CROUÉ, J.-P. **Removal of trace organic chemicals in wastewater effluent by UV/H2O2 and UV/PDS**. Water Research, 2018.

OLLER, I., MALATO, S., & SÁNCHEZ-PÉREZ, J. A. **Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination - A review**. Science of The Total Environment, 409(20), 4141–4166, 2011.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 30 mai. 2021.

OTURAN, M. A., & AARON, J.-J. **Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review**. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 44(23), 2577–2641, 2014.

PADESTE, C., & NEUHAUS, S. **Polymer-on-Polymer Structures Based on Radiation Grafting**. Polymer Micro- and Nanografting, 11–41, 2015.

PALUMBO, D.J., ANDREOLA R. **Análise de Ácidos Haloacéticos (HAACS) nas águas de Maringá-PR**. VII Mostra Interna de Trabalhos de Iniciação Científica, UNICESUMAR, Maringá-PR. ISBN 978-85-459-0309-3, 2016.

PARK, M., KIM, B.-H., KIM, S., HAN, D.-S., KIM, G., & LEE, K.-R. **Improved binding between copper and carbon nanotubes in a composite using oxygen-containing functional groups**. Carbon, 49(3), 811–818, 2011.

PARVULESCU V. I., MAGUREANU M., LUKES P. **Plasma Chemistry and Catalysis in Gases and Liquids.** Germany: Wiley-VCH, 2012.

PASCHOALATO, C. F. P. R. **Efeito da Pré-Oxidação, Coagulação, Filtração e Pós-Cloração na Formação de Subprodutos Orgânicos Halogenados em Águas Contendo Substâncias Húmicas**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005.

PEREIRA, G. N., CESCA, K., CUBAS, A. L. V., OLIVEIRA, D. **Use of non-thermal plasma in lignocellulosic materials: A smart alternative**. Trends in Food Science & Technology, 109 (2), 2021.

PÉREZ-PIZÁ, M. C., PREVOSTO, L., GRIJALBA, P. E., ZILLI, C. G., CEJAS, E., MANCINELLI, B., BALESTRASSE, K. B. **Improvement of growth and yield of soybean plants through the application of non-thermal plasmas to seeds with different health status**. Heliyon, Volume 5, Issue 4, e01495, ISSN 2405-8440, 2019.

PIRNIE, M., LINDEN, K.G., MALLEY, J. **Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule**. US Environ. Prot. Agency 2 (11), 1e436, 2006.

PLÁSTICO MODERNO. **Formação de radicais em cascata**. Disponível em: https://www.plastico.com.br/artigo-tecnico-plasma-o-agente-promotor-de-adesao-em-polimeros-e-sua-facilidade-de-insercao-em-processos-produtivos/. Acesso em: 9 mai. 2021.

RADJENOVIC, J., & SEDLAK, D. L. **Challenges and Opportunities for Electrochemical Processes as Next-Generation Technologies for the Treatment of Contaminated Water**. Environmental Science & Technology, 49(19), 11292–11302, 2015.

RAEISZADEH, M., & TAGHIPOUR, F. **Microplasma UV lamp as a new source for UV-induced water treatment: Protocols for characterization and kinetic study**. Water Research, 114959, 2019.

RAVINDRAN, R., & JAISWAL, A. K. **A comprehensive review on pre-treatment strategy for lignocellulosic food industry waste: Challenges and opportunities**. Bioresource Technology, 199, 92–102, 2016.

RAVINDRAN, R., SARANGAPANI, C., JAISWAL, S., LU, P., CULLEN, P.J., BOURKE, P., JAISWAL, A.K. **Improving enzymatic hydrolysis of brewer spent grain with nonthermal plasma**. Bioresour. Technol. 282, 520–524, 2019.

RAYSON, S., ARCIGA-REYES, L., WOOTTON, L., DE TORRES ZABALA, M., TRUMAN, W., GRAHAM, N., … DAVIES, B. **A Role for Nonsense-Mediated mRNA Decay in Plants: Pathogen Responses Are Induced in Arabidopsis thaliana NMD Mutants**. PLoS ONE, 7(2), e31917, 2012.

REISZ, E., SCHMIDT, W., SCHUCHMANN, H.-P., & VON SONNTAG, C. **Photolysis of Ozone in Aqueous Solutions in the Presence of Tertiary Butanol**. Environmental Science & Technology, 37(9), 1941–1948, 2003.

REMUCAL, C. K., & MANLEY, D. **Emerging investigators series: the efficacy of chlorine photolysis as an advanced oxidation process for drinking water treatment**. Environmental Science: Water Research & Technology, 2(4), 565–579, 2016.

SARANGAPANI, C., DIXIT, Y., MILOSAVLJEVIC, V., BOURKE, P., SULLIVAN, C., & CULLEN, P. J. **Optimization of atmospheric air plasma for degradation of organic dyes in wastewater**. Water Sci. Technol., 75(1), 207–219, 2016.

SARANGAPANI, C., MISRA, N. N., MILOSAVLJEVIC, V., BOURKE, P., O'REGAN, F., & CULLEN, P. J. **Pesticide degradation in water using atmospheric air cold plasma**. Journal of Water Process Engineering, 9, 225–232, 2016.

SARANGAPANI, C., O'TOOLE, G., CULLEN, P. J., & BOURKE, P. **Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries**. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 44, 235–241, 2017.

SARANGAPANI, C., THIRUMDAS, R., DEVI, Y., TRIMUKHE, A., DESHMUKH, R. R., & ANNAPURE, U. S. **Effect of low-pressure plasma on physico–chemical and functional properties of parboiled rice flour**. LWT - Food Science and Technology, 69, 482–489, 2016.

SHAW P., KUMAR N., KWAK H. S., PARK J. H., UHM H. S., BOGAERTS A., CHOI E. H., ATTRI P. **Bacterial inactivation by plasma treated water enhanced by reactive nitrogen species.** Scientific Reports, 8(1), 2018.

SILVA, A. F. F. **Caracterização e Performance de um Reator de Plasma Frio na Produção de Peróxido de Hidrogênio**. UFSC, Florianópolis, 2017.

SILVA, A. M. T. **Fast mineralization and detoxification of amoxicillin and diclofenac by photocatalytic ozonation and application to an urban wastewater**. Water Research, 87, 87–96, 2015.

SILVA, B, H, L., MELOB, M, A, B. **Trihalometanos em água potável e riscos de câncer: simulação usando potencial de interação e transformação de Backlund**. Química Nova, v. 38, p. 309-315, 2015.

SILVA, U. N. de M. **A radiação uvc como alternativa no tratamento de água**. Dissertação (Mestrado) - UFCG, Pombal, 2018.

SNINS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Informações e indicadores agregados**. Disponível em: http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#. Acesso em: 9 mar. 2021.

SONG, K., MOHSENI, M., & TAGHIPOUR, F. **Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review**. Water Research, 94, 341–349, 2016.

SONG, K., TAGHIPOUR, F., & MOHSENI, M. **Microorganisms inactivation by wavelength combinations of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs)**. Science of The Total Environment, 2019.

SUN, B., SATO, M., & SID CLEMENTS, J. **Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water.** Journal of Electrostatics, 39(3), 189–202, 1997.

TAGHIPOUR, F. **Is UV-LED the future of ultraviolet water purification?** IUVA News 15 (4), 2, 2013.

TAO, X.; QI F.; YIN Y.; DAI, X. **CO2 Reforming of CH4 by Combination of Thermal Plasma and Catalyst**. International Journal of Hydrogen Energy, 33, 1262-1265, 2008.

TEIXIERA, J. I. R. **A problemática do investimento estrangeiro nos direitos humanos: o direito à água e ao saneamento básico**. (Mestrado em Direito) - Curso de Pós-graduação em Ciência Jurídica Forense, Universidade Portucalense, Portugal, 2018.

TOCHIKUBO, F. **Current Status and Prospects of Simulation of Non-Equilibrium Atmospheric Pressure Plasmas**. The Journal of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research Vol. 92, No.9, 680-681. September, 2016.

TORRES, N. H., SOUZA, B. S., FERREIRA, L. F. R., LIMA, Á. S., DOS SANTOS, G. N., & CAVALCANTI, E. B. **Real textile effluents treatment using coagulation/flocculation followed by electrochemical oxidation process and ecotoxicological assessment**. Chemosphere, 2019.

TORTORA, G. J., FUNKE, B. R., CASE, C. L. **Microbiologia**. 12° ed. Artmed, 2016.

TRATA BRASIL. **Principais Estatísticas**. Disponível em: http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/agua. Acesso em: 6 mai. 2021.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Guidance manual: alternative desinfectants and oxidants.** Washington: USEPA. Report n.815-R-99-014, 1999.

VON GUNTEN, U. **Oxidation Processes in Water Treatment: Are We on Track?** Environmental Science & Technology, 52(9), 5062–5075, 2018.

VON GUNTEN, U., & HOIGNE, J. **Bromate Formation during Ozonization of Bromide-Containing Waters: Interaction of Ozone and Hydroxyl Radical Reactions**. Environmental Science & Technology, 28(7), 1234–1242, 1994.

VON SONNTAG C, VON GUNTEN U. **Chemistry of Ozone in Water and Wastewater Treatment.** IWA Publishing, 2012.

WANG JL, CHU LB. **Irradiation treatment of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in water and wastewater: An overview**. Radiation Physics and Chemistry, 125, 56-64, 2016.

WANG JL, WANG SZ. **Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) from wastewater: A review.** Journal of Environmental Management, 182, 620-640, 2016.

WANG Y, CAO H, CHEN C, XIE Y, SUN H, DUAN X, WANG S. **Metal-free catalytic ozonation on surface-engineered graphene: Microwave reduction and heteroatom doping**. Chemical Engineering Journal, 355: 118-129, 2019b.

WANG, J., & CHEN, H. **Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective**. Science of The Total Environment, 135249, 2019.

WEF - Water Environment Federation. **Wastewater Disinfection – Manual of Practice FD-10**. 1. ed. Alexandria – VA: WEF. 299 p, 1996.

WU, L., XIE, Q., LV, Y., ZHANG, Z., WU, Z., LIANG, X., LU, M. & NIE, Y. **Degradation of methylene blue by dielectric barrier discharge plasma coupled with activated carbon supported on polyurethane foam**. RSC Adv., 9, 25967, 2019.

WU, Y.L., HONG, J., OUYANG, Z., CHO, T.S., RUZIC, D.N. **Electrical and optical characteristics of cylindrical non-thermal atmospheric-pressure dielectric barrier discharge plasma sources**. Surf. Coatings Technol. 234, 100–103, 2013.

YANG L, HU C, NIE Y, QU J. **Catalytic ozonation of selected pharmaceuticals over mesoporous alumina-supported manganese oxide**. Environmental Science & Technology, 43, 2525-2529, 2009.

YANG L, HU C, NIE Y, QU J. **Surface acidity and reactivity of β-FeOOH/Al2O3 for pharmaceuticals degradation with ozone: in situ ATR-FTIR studies**. Applied Catalysis B: Environmental, 97: 340-346, 2010.

ZHANG, H., MA, D., QIU, R., TANG, Y., & DU, C. **Non-thermal plasma technology for organic contaminated soil remediation: A review**. Chemical Engineering Journal, 313, 157–170, 2017.

ZHANG, X., & LIU, Y. **Halogenated organics generated during online chemical cleaning of MBR: An emerging threat to water supply and public health**. Science of The Total Environment, 656, 547–549, 2019.

ZHANG, Y., WANG, H., LI, Y., WANG, B., HUANG, J., DENG, S., … WANG, Y**. Removal of micropollutants by an electrochemically driven UV/chlorine process for decentralized water treatment**. Water Research, 116115, 2020.

ZHANG, Z., XU, Z., CHENG, C., WEI, J., LAN, Y., NI, G., SUN, Q., QIAN, S., ZHANG, H., XIA, W., SHEN, J., MENG, Y., & CHU, P. K. **Bactericidal Effects of Plasma Induced Reactive Species in Dielectric Barrier Gas–Liquid Discharge.** Plasma Chemistry and Plasma Processing, 37(2), 415-431, 2017.

ŽIGON, J., PETRIČ, M., DAHLE, S. **Dielectric barrier discharge (DBD) plasma pretreatment of lignocellulosic materials in air at atmospheric pressure for their improved wettability: A literature review**. Holzforschung 72, 979–991, 2018.

ZIUZINA, D., PATIL, S., CULLEN, P. J., KEENER, K. M., & BOURKE, P. **Atmospheric cold plasma inactivation of *Escherichia coli* in liquid media inside a sealed package**. Journal of Applied Microbiology, 114(3), 778–787, 2013.