



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental  
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

---



**JORDÂNIA FERNANDES FERREIRA**

## **Desinfecção de Água por Plasma não-térmico**

Ouro Preto

2023

# Desinfecção de Água por Plasma não-térmico

Jordânia Fernandes Ferreira

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção do  
Grau de Engenharia Ambiental na  
Universidade Federal de Ouro Preto.*

Área de concentração: Engenharia Ambiental

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dra. Marina de Medeiros Machado – UFOP

Co-orientador: Glívia Braga Faria - UFOP

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F383d Ferreira, Jordania Fernandes.  
Desinfecção de água por plasma não-térmico. [manuscrito] / Jordania  
Fernandes Ferreira. - 2023.  
42 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Marina Medeiros.  
Coorientadora: Glúvia Faria.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola  
de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Água - Purificação. 2. Plasma (Gases ionizados)- Plasma não-  
térmico. 3. Halogênios - Cloro. 4. Águas residuais - Purificação. I.  
Medeiros, Marina. II. Faria, Glúvia. III. Universidade Federal de Ouro Preto.  
IV. Título.

CDU 504:502

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Jordânia Fernandes Ferreira**

### **Desinfecção de água por plasma não-térmico e cloro**

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

Aprovada em 31 de março de 2023.

#### Membros da banca

Dra. Marina de Medeiros Machado - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)  
Glívia Braga Faria - Coorientadora (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)  
Dr. Aníbal da Fonseca Santiago - (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)  
Me. Paula Cristine Silva Gomes - (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)

Marina de Medeiros Machado, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Marina de Medeiros Machado, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/04/2023, às 13:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0505376** e o código CRC **64BC089B**.

*Dedico este trabalho a todos que estiveram comigo durante esta jornada, e a todos os professores da UFOP que me proporcionaram um ensino de qualidade, em especial a minha orientadora, Marina de Medeiros e a co-orientadora Glivia. Também a todos os amigos de laboratório, em especial Maria Clara e Ítalo, que compartilham comigo a mesma paixão.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me sustentado até esse momento, sem Ele eu jamais teria chegado até aqui.

Deixo meus agradecimentos à minha família e à Aline por todo apoio, amor e paciência. Agradeço à professora Marina pela dedicação e, principalmente, confiança na minha capacidade desde o início da Iniciação Científica à orientação deste trabalho e, também por ser a responsável por colocar essa paixão pelo saneamento no coração.

Obrigada aos amigos de vida que nos piores momentos dessa estrada seguraram com muita força a minha mão e me ajudaram não desistir. Obrigada também aos amigos que conquistei graças à Engenharia Ambiental. Agradeço também aos meus fieis amigos que Diamantina me deu de presente, e que sem dúvida alguma a minha história passou por lá para conhecer vocês.

Agradeço também à Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas, dois braços que carregarei com muito orgulho para sempre. Obrigada pelo ensino de qualidade e oportunidades oferecidas, como a Iniciação Científica e a empresa Júnior, Renovar Consultoria, das quais foram essenciais para o fomento da minha trajetória acadêmica e pessoal. Agradeço também aos professores da UFVJM, onde iniciei minha vida acadêmica, e que me ajudaram a entender um pouco sobre a vida e seus desafios, e também me transmitiram conhecimento com muita qualidade.

Obrigada também a todos os professores que passaram por minha vida e que me deram mais do que conhecimento, me deram afeto e carinho, e que tenho muito orgulho de terem tido comigo. Eu jamais os esquecerei, em especial todos do CAOB e demais funcionários que acompanharam a minha história. Eu amo vocês.

E por fim, carrego comigo a certeza que conhecimento nunca é demais e é a única coisa que o ser humano não consegue nos roubar.

## RESUMO

O aumento crescente da poluição da água tem levado à busca por novos métodos de tratamento de água. O cloro é o método comumente utilizado, porém, os subprodutos gerados pela reação do cloro com a água são tóxicos à saúde humana. Diante disso, Processos de Oxidação Avançados foram testados como métodos alternativos à substituição do cloro. Neste estudo foram analisadas amostras de água filtrada e desinfetada, coletada em uma Estação de Tratamento de Água (ETA). As análises da água foram realizadas com o objetivo de comparação de parâmetros físico-químicos, sendo estes o Potencial Hidrogeniônico (pH), Temperatura, Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Turbidez e Cor. Os parâmetros microbiológicos, Coliformes Totais e *E. coli*, também foram comparados. O tratamento da água por Plasma não-térmico foi realizado em um reator ponta-plano, com tensão de aproximadamente 7,7 kV. As análises da água filtrada desinfetada após o tratamento por Plasma não-térmico mostraram resultados mais consistentes. O cloro é o desinfetante mais usado em ETAs devido à sua eficiência, entretanto a formação de subprodutos tóxicos o torna temerário, o que coloca a tecnologia de Plasma não-térmico em evidência, sendo considerado um método sustentável de tratamento de água.

Palavras-chaves: Tratamento de água. Plasma não-térmico. Cloro. Desinfecção.

## **ABSTRACT**

The growing increase in water pollution has led to the search for new methods of water treatment. Chlorine is the commonly used method, however, the by-products generated by the reaction of chlorine with water are toxic to human health. Given this, Advanced Oxidation Processes were tested as alternative methods for replacing chlorine. In this study, samples of filtered and disinfected water collected at a Water Treatment Station (WTS) were analyzed. Water analyzes were carried out with the aim of comparing physical-chemical parameters, such as Hydrogenionic Potential (pH), Temperature, Dissolved Oxygen (DO), Chemical Oxygen Demand (COD), Turbidity and Color. Microbiological parameters, Total Coliforms and E. coli, were also compared. The water treatment by non-thermal Plasma was carried out in a flat tip reactor, with a voltage of approximately 7.7 kV. Analyzes of disinfected filtered water after treatment with non-thermal Plasma showed more consistent results. Chlorine is the most used disinfectant in WTS due to its efficiency, however the formation of toxic by-products makes it reckless, which puts the non-thermal Plasma technology in evidence, being considered a sustainable method of water treatment.

**Keywords:** Water treatment. Non-thermal Plasma. Chlorine. Disinfection.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	11
2. OBJETIVO GERAL .....	12
2.1. Objetivo Específico .....	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO .....	14
3.1. Água e seus poluentes .....	14
3.2. Tratamento de água .....	15
3.3. Tratamento Convencional .....	17
3.4. Tratamento Avançado.....	18
3.5. Plasma.....	19
3.5.1. Plasma não-térmico .....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
4.1. Aplicação da tecnologia de plasma não-térmico como processo de desinfecção da água	21
4.2. Água filtrada .....	21
5. RESULTADOS .....	25
5.1. Água filtrada e água filtrada após os tratamentos de desinfecção por cloro e por Plasma não-térmico .....	25
5.1.2. Água Filtrada.....	25
5.1.3. Água filtrada após o tratamento de desinfecção por cloro .....	27
5.1.4. Tratamento de desinfecção por Plasma não-térmico.....	28
6. DISCUSSÃO .....	34
6.1. Água filtrada .....	34
6.2. Água filtrada após o tratamento de desinfecção por cloro .....	35
6.3. Tratamento de desinfecção por plasma não-térmico .....	35

7. CONCLUSÃO .....	37
8. REFERÊNCIAS.....	37

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Sistema de tratamento por plasma não-térmico: (a): reator ponta-plano, (b): fonte de tensão, (c): transformador de tensão. Variac. ....	21
<b>Figura 2:</b> Dicromato de potássio e Ácido sulfúrico. ....	22
<b>Figura 3:</b> Teste Colilert. ....	24
<b>Figura 4:</b> Antes e depois da realização do teste Colilert. ....	24
<b>Figura 5:</b> Amostra com presença e ausência de coliformes totais respectivamente. ....	26
<b>Figura 6:</b> Amostra com ausência e presença de E. coli respectivamente. ....	27
<b>Figura 7:</b> Ausência de Coliformes Totais nas duas amostras. ....	29
<b>Figura 8:</b> Ausência de E.coli nas duas amostras. ....	30
<b>Figura 9:</b> Ausência de Coliformes Totais nas duas amostras. ....	31
<b>Figura 10:</b> Ausência de E. coli nas duas amostras. ....	31
<b>Figura 11:</b> Ausência de Coliformes Totais nas duas amostras. ....	33
<b>Figura 12:</b> Ausência de E. coli nas duas amostras. ....	33

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1:** Resultados da análise da água filtrada e após o tratamento de desinfecção por Cloro. ....25

**Tabela 2:** Resultados da análise da amostra de água filtrada e da amostra de água filtrada e desinfetada.....28

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANA: Agência Nacional de Águas

OMS: Organização Mundial de Saúde

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

FUNASA: Fundação Nacional de Saúde

ETA: Estação de tratamento de Água

ETE: Estação de tratamento de Esgotos

DAM: Drenagem Ácida de Mineração

DQO: Demanda Química de Oxigênio

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

OD: Oxigênio Dissolvido

THM: Trialometano

POA: Processos Oxidativos Avançados

ROS: Espécies Reativas de Oxigênio

RNS: Espécies Reativas de Nitrogênio

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, no Brasil e no mundo, a preservação da água tem sido pauta em muitos debates sobre meio ambiente, devido à sua escassez e ao fato de sua qualidade estar diminuindo constantemente com o desenvolvimento global (ANA - Agência Nacional de Águas, 2013). Ainda, de acordo com os dados da ANA (2013), o aumento da população, agravado pelas mudanças climáticas que afetam o ciclo hidrológico, colocando em risco, além da saúde humana, os ecossistemas.

Segundo dados da Organização Mundial de Saúde (OMS, 2020), mais de 2 bilhões de pessoas no mundo consomem água de fontes contaminadas por fezes e 2,4 bilhões de pessoas estão sem saneamento básico. De acordo com dados publicados pela WWF, dos 70% de água disponível no planeta, menos de 1% é própria para consumo humano (*World Wildlife Fund*, 2022).

No Brasil, o volume de água tratada distribuída por dia é de 43.645.542 m<sup>3</sup> e de água sem tratamento é de 2.527.219 m<sup>3</sup>, mas, apesar do quantitativo referente ao volume de água com tratamento ser maior do que a sem tratamento, o esgotamento básico deixa a desejar, sendo 10.983.179 m<sup>3</sup> de esgoto tratado por dia e coletados por uma rede de 300.520 km, ou seja, chega água tratada nas residências, mas não possuem destinação e rede coletoras adequadas (IBGE, 2017).

Em se tratando do enfrentamento da pandemia da COVID-19, o Brasil ganhou notoriedade quanto às questões sanitárias, uma vez que quase 2 bilhões de pessoas corriam maior risco de contaminação porque contavam com a falta de saneamento básico nas Unidades de Saúde (OMS, 2020). A realidade era de que a cada duas Unidades de Saúde, uma não tinha água potável; e em cada quatro Unidades de Saúde, uma não tinha uma rede coletora de esgoto adequada (OPAS, 2020). A COVID-19 trouxe à tona estes números devido à imensa necessidade de higiene adequada, e mostrando a realidade do país, onde 1 em cada 4 pessoas não têm acesso à água potável (OMS, 2020).

A ausência de saneamento básico coloca em risco a vida de populações que consomem essas águas contaminadas, através das doenças de veiculação hídrica (ANA, 2013). Essas doenças são causadas por x e outros microrganismos, sendo transmitidas através de fezes humanas e de animais inseridas nas fontes de água (FUNASA, 2014).

Para assegurar o direito da população de consumir água potável, a Portaria n.º 888, de 04 de maio de 2021, do Ministério da Saúde, estabelece o padrão de qualidade de água e potabilidade para consumo humano. Para alcançar esses padrões de potabilidade existem tratamentos que podem ser realizados, sendo um deles o tratamento convencional, aplicado em Estações de Tratamento de Água (ETAs), constituído, essencialmente, pelas operações unitárias de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção (BOTERO, 2009). O grande problema deste método convencional, e que tem levado a muitos estudos em busca de outras alternativas, é o fato de alguns organismos serem resistentes à cloração. (FREGONESI et al., 2012).

As doenças de veiculação hídrica estão associadas a doenças ligadas ao intestino. A falta do acesso à água tratada e contaminada por microrganismos patogênicos é o motivo da ocorrência deste tipo de doença, na qual tem como principal sintoma a diarreia. Segundo a OMS, no Brasil a porcentagem de pessoas sem acesso à água potável é bem maior em regiões pobres do que em regiões urbanas (FAVERI, 2013). Esses dados nos alertam provam mais uma vez das motivações por estudos sobre tratamentos alternativos de água.

Diante disso, é ressaltada a necessidade de explorar tecnologias novas e/ou adicionais para o tratamento de água, uma vez que, estudos realizados pela OMS em 2020, especulam para 2030 a quantidade de pessoas no mundo que não terão acesso a um saneamento básico completo, contando ainda com 1,6 bilhões de pessoas sem água potável (OMS,2021).

O plasma é uma tecnologia que se mostra promissora para o tratamento de água, uma vez que não produz grandes quantidades de subproduto como a cloração (PATANGE et al., 2018). Segundo Murugesan (2020), o plasma é considerado o quarto estado da matéria e consiste em um gás ionizado contendo uma enorme gama de espécies reativas se mostrando eficiente para a desinfecção de água.

Sendo assim, o presente trabalho propõe analisar a tecnologia de plasma não-térmico como método de desinfecção da água antes e após a cloração.

## **2. OBJETIVO GERAL**

O objetivo do presente trabalho é caracterizar o potencial desinfetante da tecnologia de Plasma não-térmico em água de abastecimento humano antes e após o processo de cloração.

## 2.1. Objetivo Específico

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar a água filtrada e após o tratamento por Plasma não-térmico;
- Comparar os parâmetros físico-químicos e microbiológicos, indicados na Portaria nº 888/2021, da amostra coletada e da amostra após o tratamento por Plasma não-térmico;
- Analisar qualitativamente os Coliformes Totais e *E. coli* de amostras com tratamento por Plasma não-térmico e o complexo Plasma não-térmico e cloro.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. Água e seus poluentes

A água possui uma importância global, abrangendo diversos setores econômicos, como hidrelétricas e agricultura, e também na manutenção da vida na terra (RUSS, 2020). Segundo Von Sperling (1995), os poluentes da água mais comuns são os esgotos domésticos, despejos industriais e escoamento superficial.

Os poluentes químicos são os oriundos dos processos da mineração, como, por exemplo, a Drenagem Ácida de Minas (DAM), que é uma solução aquosa ácida formada por sulfetos minerais oxidados na presença de água, sendo então formados os sulfatos, que dão a esse resíduo a característica ácida, e o torna um contaminante quando chega em corpos hídricos sem tratamento através de drenagens irregulares ou a falta da mesma (CETEM, 2004).

O garimpo de ouro no Brasil é muito comum, e é o maior responsável pela poluição dos rios devido ao uso do mercúrio em seu processo, sendo este uma ameaça à vida aquática, pois em contato com a água o mercúrio se transforma em espécies tóxicas e que acumulam nos tecidos dos peixes, fazendo com que o ciclo de vida de algumas espécies seja reduzido (PORTO & ROCHA, 2022).

Outro tipo de poluente químico é o de origem farmacêutica. Segundo Arola (2017), os fármacos são micropoluentes de compostos constituintes de fórmulas de remédio, e são altamente nocivos para a vida aquática, sendo exemplo destes: carbamazepina, atenolol, sotalol, diclofenaco e entre outros. O primeiro relato de um composto fármaco detectado foi em efluente tratado nos Estados Unidos em 1976 (ESCHER et. al., 2022).

Estes compostos são liberados por humanos e animais através de suas excreções após a administração de remédios, e na ausência de saneamento básico essa excreção é lançada diretamente nos corpos hídricos, ou então chega a uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), que pode não possuir um tratamento adequado para a remoção de todos esses micropoluentes. (ESCHER et. al., 2022).

Entretanto, apesar destes poluentes citados serem ameaçadores para a qualidade da água, o aumento de microrganismos patogênicos, como bactérias, parasitos, vírus e fungos, é a principal causa do crescimento das buscas por tratamentos de água (RÍOS-TOBÓN et al., 2017). De acordo com a Funasa (2014), os principais microrganismos causadores de doenças presentes na água são *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*, *Shigella spp* e *Salmonella spp*.

### 3.2. Tratamento de água

De acordo com Von Sperling (1995), para selecionar o tratamento de água adequado é necessário que se meça alguns parâmetros, que são indicadores da qualidade de água, sendo estes de uso rotineiro em laboratórios de análises de água, e, por isso, estes indicadores são utilizados para tratamentos adequados de água para abastecimento humano. Ainda segundo Von Sperling (1995), estes parâmetros são caracterizados como físicos, químicos e biológicos.

A turbidez tem uma grande importância nesta análise, pois ela apresenta a quantidade de luz que atravessa a água, sendo os sólidos em suspensão os responsáveis por essa característica da turbidez. A turbidez também é de grande importância para a determinação de microrganismos presentes na água, que devido à alta turbidez se torna um ambiente apropriado para o crescimento de tais, sendo estes, de acordo com a Funasa (2014), a *Salmonella spp.*, *Shigella spp.*, *Escherichia coli*, *Giárdia lamblia* e *Vibrio cholerae* (VON SPERLING, 1995).

Sabor e odor também são parâmetros físicos, porque são influenciados pelos sólidos dissolvidos e em suspensão, e também pelos gases dissolvidos. A temperatura mede a intensidade de calor da água, e temperaturas elevadas causam reações químicas e biológicas indesejadas, daí a importância deste parâmetro (VON SPERLING, 1995).

Os parâmetros químicos são constituídos pelo pH que mede a quantidade de acidez ou de alcalinidade. Para uma água ser caracterizada com qualidade apropriada para consumo humano, esta água deve ter um pH neutro, e esse pH frequentemente deve ser corrigido antes ou depois do tratamento da água (VON SPERLING, 1995).

O Ferro e o Manganês estão presentes de forma insolúveis na ausência de oxigênio, ou seja, nas águas subterrâneas quando não passam por um tratamento adequado chegam na casa do consumidor com a contaminação do Ferro e do Manganês, e assim que entra em contato com o oxigênio esses dois elementos se transformam nas suas formas solúveis, e geram alteração da cor da água quando sai da torneira ou do chuveiro (VON SPERLING, 1995).

Os cloretos são resultados da dissolução de sais nas águas naturais, que possuem um sabor salgado quando não tratadas adequadamente, por isso nas ETAs, que tem como fonte de abastecimento águas naturais, deve-se fazer sempre o controle de cloretos presentes na água bruta (VON SPERLING, 1995).

O nitrogênio possui um papel importante nas análises de água, porque eles são encontrados de várias formas no meio aquático, e o ser humano ao ingerir uma água contaminada por nitrogênio pode ser acometido por doenças, como por exemplo a metahemoglobina, conhecida como a síndrome do bebê azul. O nitrogênio também é responsável pela eutrofização em lagos, ameaçando a vida dos peixes em sua forma de amônia livre (VON SPERLING, 1995).

O fósforo em contato com a água se apresenta na forma de ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico, sendo todos de pouca ameaça à qualidade da água (VON SPERLING, 1995).

O decaimento da quantidade de oxigênio que é dissolvida na água, é a responsável pela eutrofização que acarreta a redução das taxas fotossintéticas dos organismos fitoplanctônicos da cadeia trófica aquática e tem como consequência o mau cheiro das águas, sendo este o principal parâmetro para caracterizar os efeitos da poluição das águas causada por despejo de matéria orgânica (VON SPERLING, 1995).

A DQO e a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) são dois dos parâmetros mais importantes e fáceis para medir a quantidade de matéria orgânica presente na água, sendo a DBO a mais importante nesse aspecto, uma DBO alta significa que há muita matéria orgânica na água, enquanto a DQO mede a quantidade de oxigênio que foi consumido levando à degradação da matéria orgânica (VON SPERLING, 1995).

Os micropoluentes orgânicos são um parâmetro que caracteriza a existência de algum composto orgânico tóxico presente na água, muitos desses são os derivados de petróleo e pesticidas, a importância dessa identificação e quantificação é devido ao fato de, além de serem tóxicos, não são biodegradáveis (VON SPERLING, 1995).

Os parâmetros biológicos são os microrganismos já citados acima, como *E. coli* e coliformes totais, pois são os mais recorrentes e mais resistentes ao tratamento do que outros microrganismos patogênicos, ou seja, se a quantidade de *E. coli* e coliformes totais estiverem dentro da legislação, é seguro consumir aquela água. Abaixo encontra-se um quadro com todos os principais parâmetros para qualidade da água, na qual fica fácil a visualização e associação entre eles e o tipo de água e finalidade da mesma (VON SPERLING, 1995).

### 3.3. Tratamento Convencional

De acordo com a Funasa (2014), o tratamento convencional é conhecido também como Ciclo Completo, porque abrange as variações sazonais que afetam a água e é composto por cinco etapas, sendo elas: Coagulação, Floculação, Decantação, Filtração e Desinfecção. As ETAs convencionais são configuradas em várias operações unitárias em série (FILHO, 2020).

Inicialmente, em uma ETA tem-se a etapa de coagulação, que segundo Filho (2020), se define sendo a operação unitária onde há a adição de um coagulante que tem como objetivo diminuir as forças de repulsão que mantém as partículas separadas, e essa agregação transforma essas partículas em partículas chamadas de coloidais. Para este processo deve-se utilizar uma unidade de mistura rápida para que a coagulação seja efetiva, imediatamente após a adição deste coagulante, pois com essa interação entre a água e o coagulante formam-se espécies hidrolisadas.

A floculação é o processo que sucede a coagulação, e é uma operação unitária importante do tratamento de água por se tratar da agregação das partículas coloidais, em função das forças de *Van Der Vals*, com a finalidade de aumentar o tamanho físico dessas partículas. A formação dos flocos ocorre também com o auxílio da diminuição do gradiente de velocidade da água ao percorrer as câmaras, inclusive uma intensa e contínua agitação nessas câmaras pode levar à separação dos flocos já formados (FILHO, 2020).

Segundo Filho (2020), a decantação da água é uma operação unitária subsequente à floculação que tem como princípio de funcionamento o tamanho físico das partículas coloidais, para que haja uma efetiva sedimentação gravitacional das mesmas. Nesta etapa a água juntamente com os flocos chegam sem agitação, mostrando mais uma importância oriunda da diminuição do gradiente de velocidade da água ao decorrer do processo de floculação.

A filtração é a terceira e última operação unitária de tratamento de água em uma ETA, que é caracterizada, principalmente, pela remoção de partículas coloidais que não foram removidas nas etapas anteriores, tal qual são responsáveis por dar cor e turbidez a água, caracterizando-se como a mais importante entre as três operações unitárias em um processo de tratamento de águas de abastecimento humano, pois é a etapa que retém alguns microrganismos (FILHO, 2020).

A última etapa do processo de tratamento de água para fins de consumo humano é a desinfecção com oxidantes, sendo o cloro o mais utilizado e responsável pela inativação dos microrganismos, transformando a água bruta em desinfetada (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006). O mecanismo de inativação do cloro é a modificação de estruturas enzimáticas que são as bases da sobrevivência bacteriana (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2018).

Apesar do cloro estar sendo por anos o agente responsável pela inativação de microrganismos na água mais utilizado em ETAs, havendo estudos que comprovam o porquê deste fato, o seu uso também acarreta consequências negativas, como a geração subprodutos tóxicos à saúde humana (MEYER, 1994). Esses subprodutos são formados através das reações do cloro com os compostos orgânicos, pois a água bruta contém ácidos fúlvicos e húmicos, e estes possuem cetonas em suas composições, gerando os triclorometano, bromodiclorometano, dibromoclorometano e tribromometano, todos englobados pela palavra Trihalometanos (THMs) (MEYER, 1994). Pinto (2020) explica que através dos estudos realizados é estabelecida uma relação entre a toxicidade dos níveis de THMs em água com o surgimento de câncer no estômago, câncer de cólon em humanos e infertilidade em homens.

### 3.4. Tratamento Avançado

A comprovação da toxicidade do cloro levou a estudos sobre tratamentos não-convencionais, ou seja, que buscam outra forma de desinfecção de água. Estes tratamentos não-convencionais são chamados de Tratamentos Avançados, que tem como característica a diminuição de reagentes para a desinfecção da água e a diminuição de subprodutos neste processo (ROSA *et al.*, 2012).

Ainda segundo Rosa *et al.*, (2012), alguns desses métodos são a adsorção através de carvão ativado em pó, biofiltros de carvão ativado, flutuação por ar dissolvido, membranas de baixa e média pressão e processos híbridos.

De acordo com Araújo *et al.* (2016), os modelos de Tratamentos Avançados também são eficientes em transformar as espécies tóxicas em produtos mais simples, contribuindo para degradá-los.

Esses estudos sobre a toxicidade e a busca por soluções não convencionais através de processos avançados fez-se chegar nos Processos de Oxidação Avançados (POAs). Esse processo de Oxidação Avançado é caracterizado por sua alta eficiência em formar radicais fortes, como a radical hidroxila (OH), que são capazes de degradar o contaminante que se deseja (MOUELE *et al.*, 2018).

Um desses tratamentos avançados é o Plasma não-térmico, que é um gás ionizado, ou parcialmente ionizado, onde encontram-se elétrons e íons em equilíbrio, podendo ser ionizado através de energia térmica ou através de campos eletromagnéticos (MURUGESAN *et al.*, 2020).

### 3.5. Plasma

O plasma é conceituado como o quarto estado da matéria, tal como os estados gasoso, líquido e sólido, e é produzido através da diferença de potencial elétrico (VOLKOV, 2021).

#### 3.5.1. Plasma não-térmico

O plasma não-térmico é composto por elétrons, íons, moléculas, além de apresentar um sistema elétrico, campo elétrico, radiação UV e radicais livres, como  $H_2O^+$ ,  $O_2^+$  e OH (HERRMANN *et al.*, 1999; MAGRO *et al.*, 2006; FRIDMAN, 2008).

O funcionamento do reator do plasma não-térmico ocorre através da diferença de potencial elétrico, e deriva de alguns fatores importantes para que seu funcionamento seja seguro e eficaz, como a distância entre os eletrodos e uma fonte de alimentação adequada para a formação do jato de plasma (BRUGGEMAN, 2009).

A água ativada por plasma é caracterizada pelas reações que acontecem com o contato água/gás/plasma e formam as espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (VOLKOV, 2021). Ainda segundo Volkov (2021) essas espécies reativas são compostas por  $N_2O$ ,  $NO_x$ ,  $H_2O_2$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ , e  $O_3$ . Frías *et al.* (2020) em seu estudo revela que a água ativada por plasma possui uma grande eficiência para desinfetar microrganismos patogênicos como *E. coli* e *Staphylococcus aureus*, possuindo um longo período de tempo com a ação antimicrobiana ativa, atribuindo essa capacidade às espécies de vida longa que são formadas durante a ativação da água, como o  $O_3$ .

O plasma não-térmico é caracterizado por possuir propriedades capazes de inativar microrganismos patogênicos em águas residuárias, mas também em outros campos da ciência, como por exemplo na área da saúde que demanda uma esterilização eficiente, e Plasma não-térmico oferece esta esterilização devido à formação de espécies reativas de oxigênio (ROS) e espécies reativas de nitrogênio (RNS) (VOLKOV, 2021).

Uma das principais vantagens de aderir ao tratamento com plasma não-térmico é a sua capacidade de promover a desinfecção sem produzir subprodutos tóxicos, que é o grande problema da utilização do cloro, e isso o torna uma tecnologia sustentável (ALSHEYAB; MUÑOZ, 2007).

O plasma não-térmico em contato com a água promove as reações heterogêneas, que são formadoras das espécies reativas, acontecendo na interface plasma-gás-água (VOLKOV, 2021). Ainda segundo Bruggeman (2009), o gás escolhido no processo do uso do plasma não-térmico também interfere nos resultados finais do tratamento.

O funcionamento do reator do Plasma não-térmico se dá pela contribuição do campo elétrico, que tem grande responsabilidade na inativação de microrganismos, realizando o rompimento das membranas celulares através do campo elétrico. Os radicais livres que são gerados pelo plasma não-térmico em contato com a água também possuem uma significativa contribuição para o rompimento dessa parede celular e extensão das rupturas (ESTIFAE et al., 2019).

Um desses radicais livres que dão ao Plasma não-térmico o poder de esterilização é o Ozônio ( $O_3$ ), que é um gás incolor e com um odor pouco perceptível, este gás se encontra na forma triatômica do oxigênio e a sua dissolução na água a torna uma água ozonizada com inúmeras alternativas de uso (KUNZ, 1999).

O Ozônio tem sido pesquisado como mais um método de desinfecção de água além dos já existentes, que são o cloro, radiação de ultravioleta (UV), monocloramina e dióxido de cloro. O ozônio é usado como uma alternativa para o não uso do cloro ou pelo menos redução da concentração que gera os THMs. (SRIVASTAV, 2020).

De acordo com Kim *et al.* (2018), o Ozônio tem um alto poder de desinfetar e esterilizar. Nos tratamentos de água através do Ozônio não há a formação dos THMs, que é o grande motivador de pesquisas sobre métodos alternativos de desinfecção de água (SRIVASTAV 2020).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

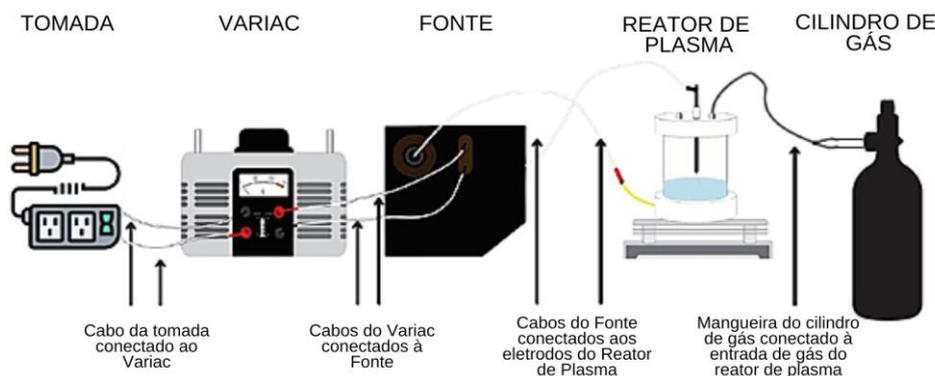
### 4.1. Aplicação da tecnologia de plasma não-térmico como processo de desinfecção da água

O processo de desinfecção da água foi realizado em um reator de Descarga em Barreira Dielétrica, utilizando a geometria ponta-plano, que devido ao formato pontiagudo do eletrodo de alta voltagem favorece a ruptura do jato de plasma (Figura 1) (BRUGGEMAN *et al.*, 2016) O gás utilizado foi o Oxigênio (O<sub>2</sub>), com vazão de 1 L/min e pressão de 1 Kgf/cm<sup>2</sup>.

O reator foi configurado com dois eletrodos opostos conectados a um variador de tensão (Variac), na qual foi utilizado com a tensão de aproximadamente 7,7 kV. Na Figura 3 é apresentado a configuração dos quatro elementos constituintes do sistema.

O gap foi de 1,5 cm, que é a distância entre a água e o eletrodo, utilizando 150 mL de amostra a cada batelada. Foram coletados 2 L de água antes do processo de cloração, a água filtrada, e 2 L de água após o processo de cloração na ETA. O processo de tratamento por Plasma não-térmico ocorreu em três tempos diferentes, sendo estes de 5, 10 e 20 minutos, respectivamente.

**Figura 1:** Sistema de tratamento por plasma não-térmico: (a): reator ponta-plano, (b): fonte de tensão, (c): transformador de tensão. Variac.



Fonte: Autora (2023).

### 4.2. Água filtrada

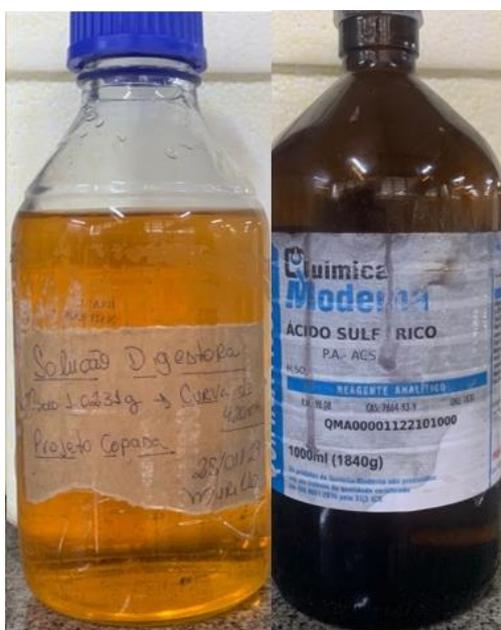
A caracterização desta água após o tratamento de desinfecção por cloro, e a caracterização após o tratamento de desinfecção por Plasma não-térmico seguiu os parâmetros exigidos pela Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021.

A água filtrada foi coletada na Estação de Tratamento de Água (ETA) do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), do município de Mariana/MG. A E é a água coletada na saída do filtro da ETA, onde através de um pescador feito de um recipiente de plástico e um fio, a água é pescada nesta saída. Para a coleta da água após o processo de desinfecção por cloro foi utilizado um outro pescador, devidamente desinfetado por álcool 70%. A água clorada foi armazenada em frascos de plásticos também desinfetados com álcool 70%.

Os parâmetros analisados foram o pH, temperatura, DQO, turbidez, cor, *E. coli* e Coliformes Totais. Todos os procedimentos de análise seguiram as metodologias do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, exceto a análise de cor, que seguiu o padrão estabelecido pelo *Standard Test Method for Color of Clear Liquids (Platinum-Cobalt Scale)*.

A determinação quantitativa da DQO foi realizada através do método colorimétrico, que consiste na oxidação química dos componentes orgânicos dissolvidos com dicromato de potássio, em uma solução de ácido sulfúrico (Figura 2).

**Figura 2:** Dicromato de potássio e Ácido sulfúrico.



Fonte: Autora (2023)

O pH e a temperatura foram medidas através de um multiparâmetro digital da marca Hach modelo HQ 40d, e utilizando apenas a sonda de medição de pH foi possível obter a temperatura.

As análises das amostras in natura – antes e pós cloração – foram realizadas *in loco*, no momento da coleta das amostras na ETA.

A turbidez foi analisada de duas formas. A primeira forma foi *in loco*, utilizando um turbidímetro digital da marca Hach modelo 2100Q, em que o procedimento consistiu em verter uma quantidade de amostra em um frasco de vidro lavado com água destilada. A segunda forma em que a turbidez foi analisada foi através do aparelho digital da marca Hach modelo TL2360, no laboratório de Saneamento do departamento de Engenharia Civil da UFOP.

O Oxigênio Dissolvido (OD) foi analisado com o mesmo multiparâmetro digital utilizado para medir o pH e temperatura, porém sua respectiva sonda, própria para medir a concentração de OD.

A cor das amostras foi analisada através de um colorímetro digital da marca Digimed modelo DM-COR. O método de análise foi o mesmo método utilizado para medir a turbidez, consistindo em verter uma pequena quantidade em um frasco de vidro lavado com água destilada e inserido no aparelho, que realizou a medição imediatamente. A leitura do resultado é feita através da escala platina-cobalto (Pt-Co), que é utilizada para medir tons de amarelo, típicos de águas residuárias.

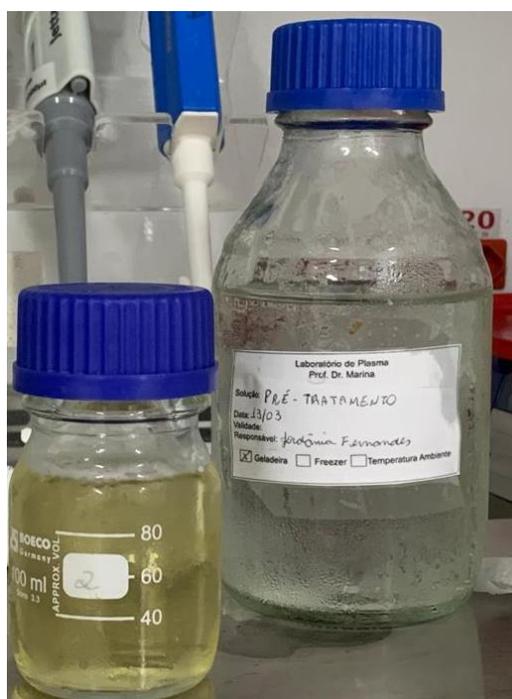
As análises qualitativas de coliformes totais e *E. coli* aconteceram através do teste Colilert, que consiste em um substrato definido para detectar tais microrganismos (Figura 3). Na Figura 4 é possível perceber a mudança de tonalidade da amostra em comparação com a água filtrada imediatamente após a realização do início do teste Colilert. Isto se deve ao fato do teste Colilert apresentar cor.

**Figura 3:** Teste Colilert.



Fonte: Autora (2023)

**Figura 4:** Antes e depois da realização do teste Colilert.



Fonte: Autora (2023)

Todo o procedimento deste teste aconteceu em Capela de Fluxo Laminar, utilizando uma pipeta automática com precisão de 1-5 ml. Foram pipetados 10 ml de amostra em um frasco de

vidro autoclavado, e em seguida foi adicionada uma unidade de Colilert. O vidro foi fechado imediatamente e após agitação para a dissolução do substrato, os frascos eram encaminhados para a estufa, onde ficavam por 24 horas.

O teste finaliza após 24 horas de amostras na estufa, onde posteriormente as amostras foram submetidas à luz UV, para verificação da presença ou ausência dos microrganismos.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Água filtrada e água filtrada após os tratamentos de desinfecção por cloro e por Plasma não-térmico

A água filtrada e após o tratamento de desinfecção por cloro e Plasma não-térmico foram analisadas e seus parâmetros físico-químicos e microbiológicos foram determinados.

#### 5.1.2. Água Filtrada

A Tabela 1 mostra que DQO obteve um resultado de 103,3 mg/L, o que já era esperado por se tratar de uma amostra sem nenhum tratamento por desinfecção, ou seja, com uma alta concentração de matéria orgânica.

**Tabela 1:** Resultados da análise da água filtrada e após o tratamento de desinfecção por Cloro.

ÁGUA FILTRADA		
Parâmetros	Sem tratamento de desinfecção	Com tratamento de desinfecção por Cloro
pH	8,21	8,42
Temperatura (°C)	21,5	21,6
OD (mg/L)	7,06	7,21
Turbidez (NTU)	0,9	0,65
DQO	103,3	47
<i>E. Coli</i>	Presença	Ausência
Coliformes	Presença	Ausência

Fonte: Autora (2023)

O valor do pH medido da água in natura foi de 8,21, e a temperatura estava em 21,5 °C. O pH é um parâmetro químico muito importante durante a caracterização da qualidade de água, pois é através dele que se define o tipo de tratamento e como esse tratamento será realizado para que a água se torne própria para consumo humano (CASTRO, 2014).

A amostra da água in natura apresentou um valor de turbidez de 0,9 NTU. De acordo com Roberto (2017), a turbidez está relacionada à existência de matéria orgânica e sólidos suspensos que formam coloides que interferem na penetração da luz. Portanto.

A análise do parâmetro OD obteve o resultado de 7,06 mg/L. De acordo com o Portal da Qualidade das Águas (ANA), o OD é necessário para a sobrevivência da vida aquática, como peixes, e a baixa concentração de OD impede que esses organismos que utilizam o oxigênio não consigam respirar. Neste portal também informa que águas poluídas por esgotos possuem baixas concentrações de OD, porque este é consumido na decomposição de matéria orgânica, e de forma oposta as águas limpas apresentam concentrações superiores a 5 mg/L. Em rios, onde existem características hidráulicas, acontece a introdução do oxigênio, sendo nestes, encontradas concentrações superiores a 10 mg/L.

Os parâmetros microbiológicos foram determinados com as amostras após 24 horas na estufa a 37,5 °C. A água filtrada apresentou resultado positivo para Coliformes Totais e para a bactéria *E. coli*. (Figura 5 e 6).

**Figura 5:** Amostra com presença e ausência de coliformes totais respectivamente.



Fonte: Autora (2023)

**Figura 6:** Amostra com ausência e presença de *E. coli* respectivamente.



Fonte: Autora (2023)

### 5.1.3. Água filtrada após o tratamento de desinfecção por cloro

Os resultados das análises realizadas para a amostra da água filtrada após o tratamento de desinfecção por cloro encontram-se sintetizados na Tabela 1.

A análise da DQO obteve um resultado de 47 mg/L.

O resultado da análise de pH foi de 8,42, cumprindo a legislação MS N° 888, de 4/2021. O valor detectado por esta análise foi bem próximo ao encontrado na água.

A turbidez apresentou um valor de 0,65 NTU, significando uma pequena, porém, diferença em relação à água filtrada. Como a turbidez está relacionada com a existência de matéria orgânica e sólidos em suspensão, este valor mostra que estes indicadores de presença de microrganismos diminuíram com a desinfecção por cloro.

O resultado obtido pela análise de OD foi de 7,21 mg/L. O Portal da Qualidade das Águas (ANA), afirmam que as águas limpas apresentam concentrações superiores a 5 mg/L.

#### 5.1.4. Tratamento de desinfecção por Plasma não-térmico

Os resultados das análises da água filtrada e da água filtrada desinfetada por cloro após o tratamento por Plasma não-térmico são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Resultados da análise da amostra de água filtrada e da amostra de água filtrada e desinfetada.

TRATAMENTO POR PLASMA NÃO-TÉRMICO						
Parâmetros	Água filtrada			Água filtrada com tratamento de desinfecção por cloro		
	5 minutos	10 minutos	20 minutos	5	10	20
pH	7,48	6,53	4,94	7,37	6,02	6,41
Temperatura (°C)	30,8	32,9	36,6	28,2	31,6	34,2
OD (mg/L)	17,5	16,6	16,3	17,6	16,3	14,6
Turbidez (NTU)	1,19	1,55	1,6	1,19	1,55	1,6
DQO	127,5	145,8	0	169,2	2,5	0
Cor	25,6	30,2	26	24,2	24,4	24,4
<i>E. Coli</i>	Ausência	Ausência	Ausência	Ausência	Ausência	Ausência
Coliformes	Ausência	Ausência	Ausência	Ausência	Ausência	Ausência

Fonte: Autora (2023)

##### 5.1.4.1. Cinco minutos de tratamento por Plasma não-térmico

A amostra filtrada foi submetida a 5 minutos de tratamento de desinfecção por plasma não-térmico, e o valor da DQO foi de 127,5 mg/L, enquanto o resultado da amostra filtrada desinfetada foi de 47 mg/L.

O resultado da análise do pH da amostra filtrada foi de 7,48 e da amostra filtrada desinfetada foi de 7,37. Estes resultados apontam um decaimento de pH quando a amostra é a amostra com desinfecção.

A temperatura da água filtrada e da água desinfetada foram de 30,8 °C e 28,2 °C. A variação da temperatura medida entre uma amostra e a outra é normal que ocorra, mesmo se tratando de tempos de tratamentos iguais. Entretanto, além da viração normal, o fator humano também foi responsável. O tempo que a amostra foi retirada do reator e a temperatura medida variou para mais na segunda batelada, causando este decaimento de temperatura.

A turbidez da água filtrada foi de 1,19 NTU e da amostra de água desinfetada foi de 1,24 NTU.

Os resultados da análise de OD para a água filtrada e desinfetada foram de 17,5 mg/L e 17,6 mg/L respectivamente.

A análise colorimétrica para cor verdadeira foi de 26,6 Pt-Co para a água filtrada e de 24,2 Pt-Co para a amostra de água desinfetada.

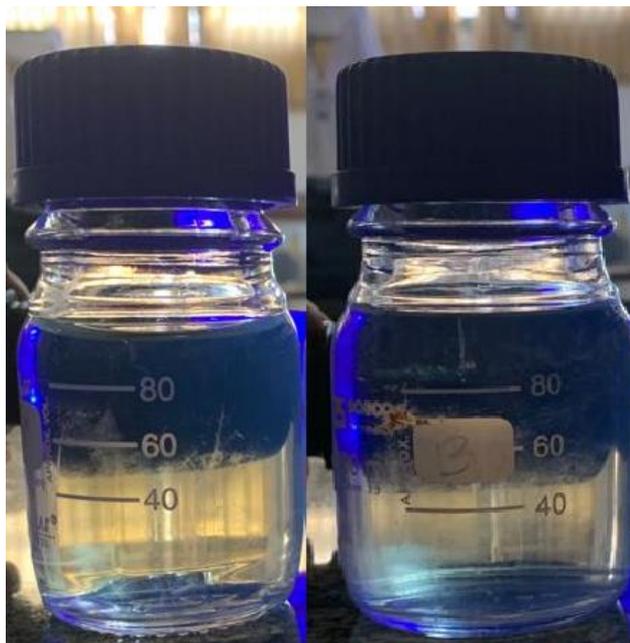
Os indicadores de presença de microrganismos, Coliformes Totais e *E. coli* não foram detectados em ambas as amostras tratadas (Figuras 7 e 8). Este resultado mostra o potencial do Plasma não-térmico como tratamento de desinfecção em comparação com o cloro.

**Figura 7:** Ausência de Coliformes Totais nas duas amostras.



Fonte: Autora (2023)

**Figura 8:** Ausência de *E.coli* nas duas amostras.



Fonte: Autora (2023)

#### 5.1.4.2. Dez minutos de tratamento por Plasma não-térmico

Após as duas bateladas de tratamento de desinfecção por Plasma não-térmico, foi iniciada a primeira batelada de dez minutos.

O valor da DQO da água filtrada foi de 145,8 e da água filtrada desinfetada foi de 2,5.

O resultado da análise do pH da água filtrada foi de 6,53 e o da água filtrada desinfetada foi de 6,02.

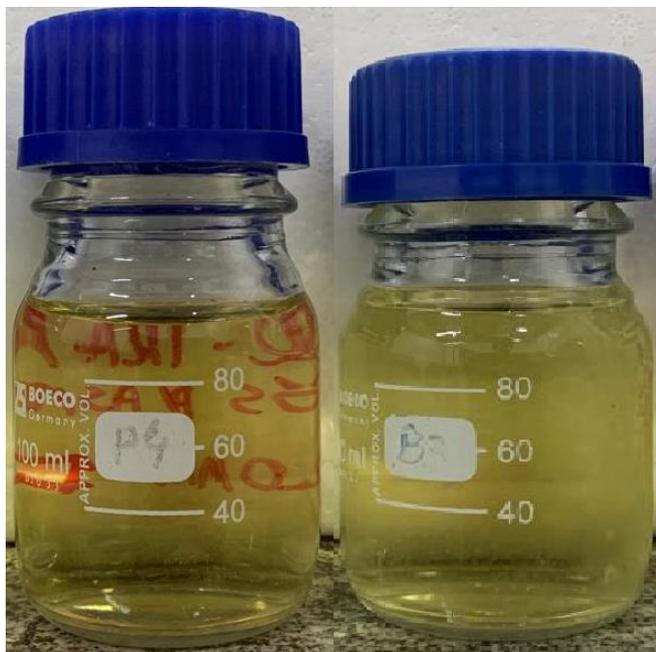
A temperatura medida da água filtrada foi de 32,9 °C e da água desinfetada foi de 31,6°C. Neste caso a variação da temperatura de 1,3 °C também é devida aos fatores humanos.

A turbidez da água filtrada foi de 1,55 NTU e da amostra de água desinfetada foi de 1,53 NTU, apresentando uma variação negativa entre a amostra de água filtrada e a amostra de água filtrada desinfetada.

O resultado da análise de OD para a água filtrada foi de 16,6 mg/L e de 16,3 mg/L. E a cor verdadeira foi medida na água filtrada com o resultado de 30,2 Pt-C e na água filtrada desinfetada 24,4 Pt-Co.

A análise qualitativa da água filtrada detectou ausência de Coliformes Totais e *E. coli*. Na amostra de água filtrada e desinfetada o resultado foi o mesmo, como mostram as Figuras 9 e 10.

**Figura 9:** Ausência de Coliformes Totais nas duas amostras.



Fonte: Autora (2023)

**Figura 10:** Ausência de *E. coli* nas duas amostras.



Fonte: Autora (2023)

#### 5.1.4.3. Vinte minutos de tratamento por Plasma não-térmico

A última batelada de cada amostra aconteceu com 20 minutos de tratamento por Plasma não-térmico.

A DQO obtida para a água filtrada foi zero, assim como ocorreu no tratamento por 5 minutos por Plasma não-térmico.

O pH medido para a amostra filtrada foi de 4,94 e para a amostra filtrada desinfetada foi de 6,41. Com 20 minutos de tratamento o pH também sofreu um declive entre uma amostra e a outra.

A temperatura medida foi de 36,6 °C para a água filtrada e de 34,2 °C para a água filtrada desinfetada, mostrando que também ocorreu a mesma variação negativa que ocorreu com 5 e 10 minutos de tratamento.

A análise da turbidez para a amostra de água filtrada foi de 1,6 NTU e para a amostra de água filtrada desinfetada foi de 1,34 NTU. Apresentado, também, uma diminuição.

O resultado do OD para a amostra filtrada foi de 16,3 mg/L e para a amostra filtrada desinfetada foi de 14,6 mg/L.

A cor verdadeira foi de 26 Pt-Co para a amostra de água filtrada e de 24,4 para a amostra de água filtrada desinfetada.

A análise qualitativa de Coliformes Totais e *E. coli* apresentaram ausência para ambos microrganismos (Figura 11 e 12).

**Figura 11:** Ausência de Coliformes Totais nas duas amostras.



Fonte: Autora (2023).

**Figura 12:** Ausência de *E. coli* nas duas amostras.



Fonte: Autora (2023)

## 6. DISCUSSÃO

### 6.1. Água filtrada

O presente estudo analisou e caracterizou a água filtrada, a água após o tratamento por cloro. Essa análise e caracterização ocorreram de forma análoga após o tratamento por Plasma não-térmico.

A análise da DQO desta amostra prova que, por se tratar de uma amostra sem nenhum tratamento por desinfecção ocorra uma alta concentração de matéria orgânica.

O valor do pH da amostra filtrada é considerado alcalino, e, de acordo com a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021, o valor de pH para sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água com captação em mananciais superficiais deve estar dentro da faixa de 6,5 a 9,0.

Castro (2014) também relaciona o valor do pH com as características locais de onde ocorre essa água, podendo relacionar ao tipo de rocha da região e outros aspectos naturais e resíduos despejados no decorrer do caminho até a ETA.

Dados coletados do portal do Serviço Geológico do Brasil, as rochas encontradas na região de Mariana/MG e Ouro Preto/MG são rochas metamórficas, e esse tipo de rocha são consideradas de básicas a ultrabásicas, o que pode ser relacionado ao valor do pH medido ser mais básico e próximo ao limite considerado recomendável, como citado acima.

A Portaria Nº 888/2021 destaca a importância da turbidez como indicador de microrganismos patogênicos e estabelece valores de turbidez para que a água seja adequada para o consumo humano, sendo o limite de 1,0 NTU. A análise da turbidez desta amostra foi de 0,9 NTU, apontando que, pela turbidez está apta para o consumo humano.

O valor de OD representa, que, a amostra de água filtrada cumpre o que se é esperado, antemão que a ETA Sul é abastecida pelo Ribeirão Belchior e pelo Córrego Banca do Rego.

Os resultados das análises qualitativas de Coliformes Totais e *E. coli* evidenciaram resultados positivos para estes, porém, por se tratar de um teste qualitativo não é possível afirmar a concentração desses microrganismos e afirmar se indicaram que a amostra está apta para consumo humano.

## 6.2. Água filtrada após o tratamento de desinfecção por cloro

A caracterização da amostra filtrada desinfetada aponta uma queda no valor da DQO, em comparação com a DQO da água filtrada. A diminuição do valor da DQO significa que a concentração de matéria orgânica diminuiu, sendo o cloro o agente responsável por esta diminuição (CORDEIRO, 2018).

Como a turbidez está relacionada com a existência de matéria orgânica e sólidos em suspensão, este valor da amostra de água desinfetada mostra que estes indicadores de presença de microrganismos diminuíram com a desinfecção por cloro.

O resultado do OD desta amostra apresentou um leve aumento em relação à anterior, mas este aumento não drástico não significa nenhuma alteração em sua qualidade.

## 6.3. Tratamento de desinfecção por plasma não-térmico

De acordo com a Tabela 2, os parâmetros que mais sofreram alterações de acordo com o tempo de tratamento aplicado e em comparação às amostras filtradas e desinfetadas foram o pH, temperatura, turbidez, OD, Coliformes Totais e *E. coli*.

O valor de pH da água filtrada e da água desinfetada foram próximos entre si, entretanto com 5 minutos de tratamento por Plasma não-térmico esses valores diminuíram consideravelmente. Esses valores diminuíram à medida que o tempo de tratamento aumentou. Esse decaimento do pH é explicado no estudo de Ercan (2017), que diz que a diminuição do pH é atribuída, principalmente, à formação de ácido nítrico, nitroso, ácido, cátion de hidrogênio e ânion de superóxido, que é uma espécie reativa do oxigênio ( $O_2^-$ ). De acordo com Chandana *et al.* (2018) o valor de pH baixo que o plasma não-térmico causa na água é importantíssimo para a morte celular das bactérias. Por tanto, para fins de desinfecção o pH contribui para que o a tecnologia de Plasma não-térmico seja mais favorável do que o cloro.

A temperatura também aumentou comparando-se com as amostras de água filtrada e desinfetada por cloro que não passaram pelo tratamento de Plasma não-térmico. O valor da temperatura aumentou na medida que o tempo de tratamento aumentava. Esse aumento é justificado pela descarga elétrica, que quanto maior o tempo de exposição a ela, maior o aumento da temperatura.

Ao comparar a concentração de OD das amostras que não passaram pelo tratamento de Plasma não-térmico, as amostras que passaram por 5, 10 e 20 minutos de tratamento com

Plasma sofreram um aumento na concentração de OD. Ao comparar os tempos de tratamento por Plasma não-térmico da amostra de água filtrada e da amostra de água desinfetada os valores das concentrações não variaram.

O aumento da concentração de OD durante o tratamento com Plasma não-térmico é justificado pelo uso do oxigênio ( $O_2$ ) como gás, que se quebra transformando-se em  $O^+$ , o que o torna em tamanho de partícula. Ademais, as análises ocorreram em um ambiente que não estava completamente vedado foi favorável para a entrada adicional de ar atmosférico, também com  $O_2$  em sua composição.

Assim como, após o tratamento por cloro, a amostra filtrada não apresentou Coliformes Totais e *E. coli* em todos os tempos de tratamento por Plasma não-térmico. Isso evidencia o potencial da tecnologia de Plasma como método de desinfecção de água. A amostra de água filtrada desinfetada por cloro também evidenciou o mesmo potencial do plasma.

Os parâmetros analisados em relação ao tempo de tratamento por Plasma não-térmico mostraram que o tempo influencia na eficiência desta tecnologia. De acordo com Suwal *et al.* (2019), em sua análise quantitativa foi constatado que após o tratamento por Plasma não-térmico houve a diminuição da iridescência da *E.coli*, significando uma possível morte das bactérias. Porém, um aumento da iridescência foi observado logo após os 5 minutos de tratamento, indicando que este tempo não foi necessário para haver a morte microbiana.

Os estudos de Suwal *et al.* (2019), mostraram também que, no tratamento por Plasma não-térmico por 10 minutos houve a diminuição da iridescência da em análise.

Os resultados obtidos por Suwal *et. al.* (2019) também mostram que a inativação microbiológica que acontece através do contato direto da descarga elétrica com água a ser tratada por Plasma não-térmico foi de 52%, o que significa a redução de 0,32 log UFC/mL.

Os resultados obtidos também mostraram que a combinação entre cloro e Plasma não-térmico obtiveram valores mais próximos aos exigidos pela legislação para o tratamento de água para consumo humano. Essa combinação causa a diminuição da necessidade de grandes concentrações de cloro, aspirando pela diminuição dos subprodutos tóxicos gerados por este (BETTINARDI, 2018).

Chaves *et. al.* (2016) concluíram que por razão dos malefícios causados pelos subprodutos do cloro, algumas ETAs utilizam o ozônio em seu processo de desinfecção, porém esta água depois de desinfetada e própria para consumo humano, precisa conter uma concentração de

cloro residual, e este fator é o diminui a concentração de cloro. O ozônio é uma espécie reativa formada durante o tratamento por Plasma não-térmico.

O uso do ozônio é crescente no mercado de piscinas diminuindo a concentração necessária de cloro a ser utilizada no tratamento da água de piscina. O ozônio desempenha um papel preliminar, pois devido a sua característica química de se decompor rapidamente necessita que o cloro seja inserido para que as modificações que o ozônio causa sejam mantidas. (ILYAS, 2018).

## 7. CONCLUSÃO

A crescente busca de novas tecnologias para tratamento de água para consumo humano, foi impulsionada pelos estudos que comprovam a geração de subprodutos tóxicos pelo cloro. Devido a isso, a busca por tratamentos não-convencionais leva aos Processos de Oxidação Avançados.

A tecnologia de Plasma não-térmico é um POA que se mostra eficiente como método de desinfecção ao realizar a morte celular bacteriana. Este método gera espécies reativas, como o  $O_3$ , que tem sua concentração de geração aumentada quando se utiliza o  $O_2$  como gás de tratamento.

Os resultados obtidos através das análises realizadas neste estudo mostraram que o uso combinado entre o cloro e o Plasma não-térmico se mostrou vantajoso, também, em relação à diminuição da concentração de cloro, mantendo os valores dos parâmetros na faixa exigida pela Portaria n.º 888/2021.

A combinação do cloro mais água ozonizada através do Plasma não-térmico também se mostrou vantajosa, pois o ozônio se desassocia rapidamente, e para manter a morte celular causada pelo mesmo, há a adição de cloro para garantir que os microrganismos não voltem a crescer naquele meio.

Por fim, é possível deslumbrar que o Plasma não-térmico como método de POA é eficiente tanto quanto o cloro, em relação à desinfecção da água.

## 8. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (Brasil). **Cuidando das águas: soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos / Agência Nacional de Águas, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. 2. ed.** -- Brasília: ANA, 2013. 157 p. : il. ISBN: 978-85-

8210-018-9 1. recursos hídricos 2. gestão dos recursos hídricos 3. preservação do meio ambiente I. Agência Nacional de Águas (Brasil) II. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente III. Título.

Alex, B. **Ozone in Water Treatment**. Alex Bettinardi. Water Conditioning and Purification Internacional. 2018. Disponível: <https://wcponline.com/2018/08/15/ozone-water-treatment/>.

ALSHEYAB, Mohammad A.; MUÑOZ, Aurelio H. **Comparative study of ozone and MnO<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> effects on the elimination of TOC and COD of raw water at the Valmayor station**. Desalination, v. 207, n. 1-3, p. 179-183, 2007.

Araújo, K. S. et al. **Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais**. Revista Ambiente & Água vol. 11, n. 2, p.387-401. 2016.

Baggio, A, et al. **Effect of negative air ionization technology on microbial reduction of food-related microorganisms**. LWT, v. 169, p. 113998, 2022.

Barros, W, M. **Riscos associados a utilização do agente desinfetante cloro no tratamento de água potável: uma revisão de literatura**. Trabalho de Conclusão de Curso do Departamento de Engenharia Civil. 2018. Instituto Federal Paraíba, Cajazeiras – Paraíba.

Bettinardi, A. **Ozone in Water Treatment**. WCP. 2018.

Borges, F. S. & Meyer, P. **Fundamentals of the Use of Ozone Therapy in the Treatment of Aesthetic Disorders: A Review for Medical Doctors**. 2021. [www.isco3.org](http://www.isco3.org).

Brasil. Ministério da Saúde. **Fundação Nacional de Saúde. Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde**. – Brasília: Funasa, 2014. 112 p. 1. Controle da qualidade da água. 2. Aspectos Técnicos. I. Título.

Brasil. **Resolução ANA nº 903/2013. Agência Nacional de Águas**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2013/903-2013.pdf>.

Brasil. Resolução 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.** Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

Brasil. Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021. **Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS 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.** Ministério da Saúde. Brasília, DF.

BRUGGEMAN, P. J. et al. **Plasma-liquid interactions: A review and roadmap.** Plasma Sources Science and Technology, [s. l.], v. 25, n. 5, 2016.

Bruggeman, P., & Leys, C. **Non-thermal plasmas in and in contact with liquids.** Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(5), 053001.

Chaves, G et al. **Tratamentos de Águas por Ozonização: revisão.** Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc Videira, v. 1, p. e12560-e12560. 2016.

Cordeiro, A. C. S.; Silva, D. M. 2018. **Remoção de matéria orgânica natural em água para consumo humano por processo de Fenton Homogêneo.** Sistemas & Gestão, Vol. 13, No. 3, pp. 311-320.

De Norões Albuquerque, T. **Análise da concentração de trihalometanos em um sistema de abastecimento de água entre os anos de 2015 e 2020.** 2022. [www.repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/1251](http://www.repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/1251).

Ercan, U. K.; Ibis, F. **Bactericidal efficacies of nebulized non-thermal atmospheric plasma-treated liquids.** The European Research Journal, 3(2), 118-126. 2017.

Escher, M., A., S. et al. **A problemática ambiental da contaminação dos recursos hídricos por fármacos.** Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online), n. 51, p. 141-148, 2019.

Faveri, C et al. **Saneamento e epidemiologia ambiental: doenças de veiculação hídrica.** Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 11, 2013.)

Ferreira F., Sidney S. **Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento.** 1ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2020.

Fiocruz. **OMS e Unicef alertam para água potável, saneamento e higiene.** 2021. Disponível em: [www.bio.fiocruz.br/index.php/en/noticias/2481-oms-e-unicef-alertam-para-agua-potavel-saneamento-e-higiene](http://www.bio.fiocruz.br/index.php/en/noticias/2481-oms-e-unicef-alertam-para-agua-potavel-saneamento-e-higiene).

Ilyas, H, et al. **Disinfection methods for swimming pool water: byproduct formation and control.** *Water.* [s. l.], v. 10, n. 6. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w10060797>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico.** 2017. Disponível: [ww.cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/30/84366?ano=2017&localidade1=0](http://ww.cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/30/84366?ano=2017&localidade1=0).

Lacerda, A. C. & Grillo, R. **Efficacy of biostimulating ozone therapy: case report literature review.** 2022. *J Rounesp* 50; 34 - 42.

Ministério Da Saúde. **Vigilância e Controle da Qualidade da Água para consumo humano.** Brasília, 2006.

Mouele et al. **Review of the methods for determination of reactive oxygen species and suggestion for their application in advanced oxidation induced by dielectric barrier discharges.** *Environmental Science and Pollution Research*, 25(10), 9265-9282.

Murugesan et al. **Performance of an atmospheric plasma discharge reactor for inactivation of Enterococcus faecalis and Escherichia coli in aqueous media.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103891.

MURUGESAN Pramila et al. **Water decontamination using non-thermal plasma: Concepts, applications, and prospects.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, n. 5, p. 104377, 2020.

Murugesan, P., Moses, J. A., & Anandharamkrishnan, C. **Water decontamination of using non-thermal plasma: Concepts, applications, and prospects.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 104377. 2020.

Nascimento, K., S. **Processos Oxidativos Avançados Aplicados ao Tratamento de Água Produzida.** Projeto Final de Curso. Departamento de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.

Patange, A., Boehm, D., Giltrap, M., Lu, P., Cullen, P. J., & Bourke, P. **Assessment of the disinfection capacity and eco-toxicological impact of atmospheric cold plasma**

**for treatment of food industry effluents.** Science of the Total Environment, 631, 298-307.

Portal Saneamento Básico. **Água e Saneamento básico são direitos essenciais.** 2017. Disponível: [www.linkedin.com/company/10462300/](http://www.linkedin.com/company/10462300/).

Porto, M., F., S.; Rocha, D. **Neoextrativismo, garimpo e vulnerabilização dos povos indígenas como expressão de um colonialismo persistente no Brasil.** Saúde em Debate, v. 46, p. 487-500, 2022.

**Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos v. 01. Von Sperling. Minas Gerais: ABES, 1995.

Programa Pan-Americana de Saúde. **Quase 2 bilhões de pessoas dependem de unidades sem serviços básicos de água.** 2020. Disponível em: [www.paho.org/pt/noticias/14-12-2020-quase-2-bilhoes-pessoas-dependem-unidades-saude-sem-servicos-basicos-agua](http://www.paho.org/pt/noticias/14-12-2020-quase-2-bilhoes-pessoas-dependem-unidades-saude-sem-servicos-basicos-agua).

Q1 Ambiental. **Manual de instruções: sistema Q1 Pool de tratamento de piscinas – Linha Q1 Home.** 2021. Disponível em: [www.appsisecommerces3.s3.amazonaws.com/clientes/cliente7875/produtos/19796/anejos/anexo\\_40b2de82551f110c77194c3d74a735ae\\_19796.pdf](http://www.appsisecommerces3.s3.amazonaws.com/clientes/cliente7875/produtos/19796/anejos/anexo_40b2de82551f110c77194c3d74a735ae_19796.pdf).

Santos, T. **Tratamento de efluente de lavanderia têxtil utilizando plasma.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2018.

Silva, G; DANIEL, L. **Desinfecção de efluente anaeróbio com o uso de ozônio/cloro.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, p. 279-288, 2015.

Viebrantz, A. **Determinação de Cloraminas em Água Para Consumo Humano.** 2021. Monografia de Mestrado. Universidade Federal do Ceará.

Volkov, Alexander G. et al. **Mechanisms of multielectron reactions at the plasma/water interface: Interfacial catalysis, RONS, nitrogen fixation, and plasma activated water.** Electrochimica Acta, v. 385, p. 138441, 2021.

World Wildlife Found. **Dia Mundial da Água.** Disponível em: [https://www.wwf.org.br/natureza\\_brasileira/areas\\_prioritarias/pantanal/dia\\_da\\_agua/](https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/areas_prioritarias/pantanal/dia_da_agua/).

Zucari, M. L. **Determinação da demanda química de oxigênio (DQO) em águas e efluentes por método colorimétrico alternativo.** 2005. 20 v. Tese de Doutorado.

Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciências Agronômicas, Departamento de Química e Engenharia Rural, UNESP, Botucatu-SP.