



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO
SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA



Proposta de melhoria para o tratamento de água de Porto Alegre: um estudo teórico

Autor: Maria Carolina S. Gomes

Orientador: Liliana Amaral Feris

Porto Alegre, maio de 2021

Autor: Maria Carolina S. Gomes

Proposta de melhoria para o tratamento de água de Porto Alegre: um estudo teórico

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química*

Orientador: Liliana Amaral Feris

Banca Examinadora:

Jordana Corralo Spada, Professora Adjunta, DEQUI/UFRGS

Keila Guerra Pacheco Nunes, Pós Doutoranda, DEQUI/UFRGS

Porto Alegre

2021

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Química e a UFRGS, pela oportunidade de realizar minha formação.

A Professora Liliana, pela orientação nesse trabalho, pelo exemplo de profissional, e, principalmente, pela constante gentileza, carinho, empatia e incentivo ao longo do curso.

Aos meus amigos da Engenharia, em especial aos “Os de Sempre”, com certeza a ajuda de vocês foi essencial no caminho até aqui. Vocês me deram o suporte e a parceria para enfrentar todas as dificuldades ao longo do curso, e com isso se fizeram fundamentais para que hoje eu esteja concluindo esta etapa. Tenho certeza de que contarei com a amizade de vocês nas próximas etapas que ainda estão por vir. Um agradecimento especial ao meu amigo, Gustavo, o qual esteve presente comigo, desde o primeiro semestre, e enfrentou esta etapa final ao meu lado, não poderia ser diferente, entramos juntos e nos formaremos engenheiros juntos.

Aos meus amigos de tantos anos, por entenderem a distância física que se fez presente nos últimos anos e por não deixarem que isso afetasse a nossa amizade, obrigada pela compreensão e carinho.

Aos amigos que o estágio me deu. Vocês estiveram presentes durante meus últimos semestres no curso e foram extremamente importantes, obrigada pela parceria, conversas e carinho.

Ao meu namorado, Renan, obrigada pelo suporte e companheirismo durante todos esses anos, por me acompanhar, até mesmo estudando, pelo carinho, paciência e amor.

A minha família, especialmente à minha avó, Leda, que me criou e aos meus pais, Nelton e Belquis, que me deram todo o suporte durante a graduação, à minha madrasta, Carina, que me incentivou e me inspirou, à minha avó Janete, que entendeu minhas viagens corridas apenas para matar um pouco da saudade e esteve sempre presente e se preocupando comigo, ao meu avô Nelson, aos meus irmãos, Natália e Rafael, às minhas tias, Suzete, Claudete e Cristina, que me apoiaram e me inspiraram ao longo de todos estes anos, enfim, à todos vocês, obrigada. Vocês me deram a oportunidade de chegar até aqui, me ensinaram, incentivaram e me deram apoio, amor e carinho.

RESUMO

Ao longo dos anos a tecnologia alcançou diversos avanços, com isso e com o aumento populacional novos produtos foram desenvolvidos visando as mais diversas finalidades. Entretanto estes novos produtos, como fármacos, produtos de higiene pessoal e pesticidas, possuem novas formulações, as quais, possuem contaminantes que as estações de tratamento de água convencionais não são capazes de remover. Ao entrarem em contato com o meio ambiente e conseqüentemente com os corpos hídricos, estes contaminantes causam a contaminação das águas. A presença e os efeitos dos contaminantes emergentes (CEs) no meio ambiente são tratados em diversos estudos, assim como, os riscos destes contaminantes para os seres vivos. Com isso, novas técnicas vêm sendo estudadas com o intuito de remover e degradar estes contaminantes emergentes, essas técnicas são denominadas de processos oxidativos avançados (POAs). Os POAs são processos em que o oxidante primário é o radical hidroxila, o qual possui um alto potencial de redução, desta forma estes processos são capazes de mineralizar diversos poluentes, tornando-os substâncias mais simples e menos tóxicas, passíveis de degradação através de outras técnicas. Neste contexto, o presente trabalho faz uma análise de estudos que avaliaram a degradação de fármacos em estações de tratamento de água utilizando como técnica oxidativa avançada o processo de ozonização. O presente trabalho seguiu a base do estudo exploratório, mediante a pesquisa em bancos de dados tais como Science Direct, Scopus e Google Acadêmico. Foram selecionados trabalhos entre 2015 e 2021 que avaliassem a aplicação de ozônio ao tratamento de água, em escala real ou piloto. Entre os artigos selecionados foram destacados aqueles que foram realizados em configurações de processo de tratamento de água mais semelhantes ao tratamento de água realizado no Brasil. As informações foram analisadas e, de acordo com os resultados obtidos, contaminantes avaliados e a eficiência obtida nestes estudos foi proposta uma configuração para inserção da ozonização como etapa adicional ao processo na estação de tratamento de água de Porto Alegre. A ozonização pode ser aplicada em diferentes etapas do processo de tratamento de água, como ainda na água bruta, pré-ozonização, antes da etapa de filtração, ozonização intermediária, ou após a filtração, pós ozonização. Todas as configurações abordadas nos trabalhos avaliados apresentaram uma boa eficiência na remoção dos contaminantes emergentes analisados nos respectivos estudos, podendo-se destacar o processo de pré-ozonização aliado à pós-ozonização, onde a eficiência foi ainda maior considerando que a pós ozonização foi capaz de reduzir ou eliminar os contaminantes remanescentes da pré-ozonização. A proposta, ao final do trabalho, também considerou os contaminantes emergentes abordados nos estudos e considerou os que continham um maior número de contaminantes emergentes em comum com os que já foram relatados estarem presentes na água bruta de Porto Alegre.

Palavras-chave: ozonização, tratamento de água, contaminantes emergentes, fármacos

ABSTRACT

Over the years, technology has achieved several advances, with this and with the increase in population, new products have been developed aiming at the most diverse purposes. However, these new products, such as drugs, personal hygiene products and pesticides, have new formulations, which have contaminants that conventional water treatment plants are not able to remove. When they meet the environment and, consequently, with water bodies, these contaminants cause water contamination. The presence and effects of emerging contaminants (ECs) on the environment are addressed in several studies, as well as the risks of these contaminants for living beings. With this, new techniques have been studied to remove and degrade these emerging contaminants, these techniques are called advanced oxidative processes (AOPs). AOPs are processes in which the primary oxidant is the hydroxyl radical, which has a high potential for reduction, so these processes are capable of mineralizing various pollutants, making them simpler and less toxic substances, susceptible to degradation through other techniques. In this context, the present academic work analyzes studies that evaluated the degradation of drugs in water treatment plants using the ozonation process as an advanced oxidative technique. The present academic work followed the basis of the exploratory study, by searching databases such as Science Direct, Scopus and Google Scholar. Papers between 2015 and 2021 that evaluated the application of ozone to water treatment, on a real or pilot scale, were selected. Among the selected studies, were highlighted those that have most similar configurations to the water treatment applied in Brazil. The data was analyzed and, according to the results, assessed contaminants, as well as the efficiency obtained in these studies, was proposed the most appropriate configuration to insert ozonation as a step to be applied at Porto Alegre water treatment plant. Ozonation can be applied at different stages of the water treatment process, as well as in raw water, pre-ozonation, before the filtration stage, intermediate ozonation, or after filtration, post ozonation. All the configurations covered in the evaluated papers presented a good efficiency in the removal of emerging contaminants analyzed in the respective studies, highlighting the pre-ozonation process combined with post-ozonation, where the efficiency was even greater considering that post ozonation was capable to reduce or eliminate the remaining contaminants from pre-ozonation. The proposal, at the end of the work, also considered the emerging contaminants addressed in the studies and considered those that contained a greater number of emerging contaminants in common with those that have already been reported to be present in the raw water from Porto Alegre.

Keywords: *ozonation, water treatment, emerging contaminants, pharmaceuticals*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resultado obtido em busca no Science Direct utilizando as palavras-chaves: contaminantes emergentes e ozonização.....	1
Figura 2: Processo de coagulação seguido de floculação	6
Figura 3: Floculadores mecânicos	6
Figura 4: Decantadores vertical e horizontal	7
Figura 5: Filtro rápido	8
Figura 6: Desinfecção, fluoretação e alcalinização	9
Figura 7: Processo de tratamento de água realizado pelo DMAE	10
Figura 8: Processo de tratamento de água estudado por Borrul e colaboradores (2021)	23
Figura 9: Processo de tratamento de água estudado por Lin e colaboradores (2016)	24
Figura 10: Processo de tratamento de água estudado por Miao e colaboradores (2015).....	25
Figura 11: Processo de tratamento de água (i) estudado por Yang e colaboradores (2017) ..	26
Figura 12: Processo de tratamento de água (ii) estudado por Yang e colaboradores (2017) .	26
Figura 13: Processo de tratamento de água proposto para aplicação na cidade de Porto Alegre.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados para contaminantes emergentes em amostras reais da água coletada no Arroio Dilúvio em Porto Alegre. Os círculos pretos preenchidos representam analitos detectados.	11
Tabela 2: Valores do potencial padrão de redução (E^0) de espécies oxidantes.....	14
Tabela 3: Resumo dos trabalhos de aplicação de ozonização no processo de tratamento de água.....	19

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Tratamento de água e legislação	3
2.2	Etapas do tratamento de água	4
2.2.1	Captação e pré-tratamento	4
2.2.2	Coagulação e Floculação	5
2.2.3	Decantação	7
2.2.4	Filtração	7
2.2.5	Desinfecção, Alcalinização e Fluoretação	8
2.3	Tratamento de água em Porto Alegre	9
2.3.1	Eficiência do tratamento de água	11
2.4	Contaminantes Emergentes	12
2.5	Técnicas avançadas para tratamento de água	14
2.5.1	Processos oxidativos avançados (POA's)	14
2.5.2	Ozonização	15
3	Materiais e Métodos	17
4	Resultados	18
4.1	Tratamento de água por ozonização: pesquisas avaliadas	18
4.2	Tratamento de água por ozonização: pesquisas avaliadas com o tratamento mais próximo ao realizado no Brasil	23
4.2.1	Artigo 1 – Borrul e colaboradores (2021)	23
4.2.2	Artigo 2 – Lin e colaboradores (2016)	24
4.2.3	Artigo 3 – Miao e colaboradores (2015)	25
4.2.4	Artigo 4 – Yang e colaboradores (2017)	25
4.3	Tratamento de água por ozonização: proposta de tratamento para a cidade de Porto Alegre	27
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	29
	REFERÊNCIAS	30

1 Introdução

O aumento populacional leva ao aumento do consumo de medicações, produtos de cuidados pessoais e alimentos, que por sua vez, levam ao aumento da utilização de pesticidas no ramo agrícola. Com isso, cresce a contaminação da água, um recurso natural, o qual é utilizado para as mais diversas finalidades, como irrigação, abastecimento, fins industriais, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, turismo e lazer.

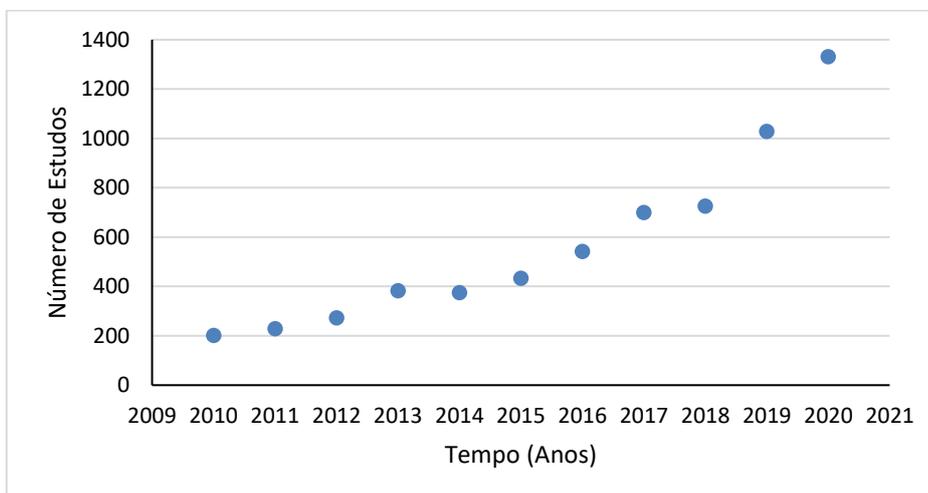
Considerando a água utilizada para abastecimento da população, esta deve seguir padrões de potabilidade, para que, desta forma, não apresente riscos à saúde humana e animal. O tratamento de água no Brasil segue majoritariamente o processo convencional de tratamento de água, o qual é constituído pelas operações de coagulação, floculação, decantação e filtração (Achon et al., 2013; Botero et al., 2009), seguidas dos processos de desinfecção, alcalinização e, em alguns casos, de fluoretação (Botero et al., 2009).

Entretanto, estudos mostram que, embora a água passe por diversas etapas de tratamento, o tratamento convencional não é capaz de remover os contaminantes emergentes (Pescara, 2014). Contaminantes emergentes são compostos químicos sem estatuto regulamentar, os quais o impacto sobre o meio ambiente e saúde humana é pouco compreendido (United States Environmental Protection Agency, 2021).

A fim de uma maior compreensão a respeito dessa problemática, este tema vem sendo, ao longo dos anos, cada vez mais abordado em estudos, com o objetivo de aumentar a qualidade tanto do tratamento de água como também do tratamento de efluentes.

Na Figura 1 fica evidenciado o crescimento do número de estudos citando os termos “emerging contaminants” e “ozonation” em uma busca realizada no banco de dados do Science Direct entre os anos de 2010 e 2020.

Figura 1: Resultado obtido em busca no Science Direct utilizando as palavras-chaves: contaminantes emergentes e ozonização



Fonte: Autor

A ozonização é um processo que vem se mostrando altamente eficiente não apenas na remoção de contaminantes emergentes, mas também na sua degradação (Homem e Santos, 2011). Outra vantagem a ser considerada é que o ozônio é gerado *in situ*, não apresentando problemas, desta forma, para manuseio e transporte.

Neste contexto, o presente trabalho realiza um estudo exploratório e discute os resultados obtidos em pesquisas que abordam a degradação de contaminantes emergentes aplicando ozonização como processo oxidativo avançado como alternativa de melhoria ao processo de tratamento de água de abastecimento urbano.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do presente estudo consiste em avaliar artigos científicos que estudam a remoção de contaminantes através da utilização da ozonização em processos de tratamento de água no mundo e, com base nos resultados obtidos nessas pesquisas, elaborar uma proposta para inserção da referida técnica nas etapas de tratamento da água de abastecimento de Porto Alegre.

Os objetivos específicos são:

- Pesquisa e leitura seletiva de artigos científicos na base de dados Science Direct com enfoque na ozonização aplicada ao tratamento de água de abastecimento, identificando os parâmetros responsáveis pela eficiência dos processos em cada estudo e os resultados obtidos;
- Análise dos artigos científicos selecionados e identificação dos trabalhos que apresentam processos com configurações mais semelhantes ao processo de tratamento de água aplicado no Brasil;
- Elaboração de proposta de aplicação de ozonização no tratamento de água de Porto Alegre tendo como base os parâmetros de processo e resultados obtidos nas pesquisas estudadas.

2 Revisão Bibliográfica

Esta seção apresenta conceitos necessários à compreensão do presente estudo. As etapas do processo de tratamento de água, bem como o detalhamento do tratamento de água realizado em Porto Alegre são abordados. Também, eficiência do tratamento de água convencional e aplicação de técnicas oxidativas avançadas ao processo de tratamento de água, com enfoque no processo de ozonização são discutidos.

2.1 Tratamento de água e legislação

Define-se o tratamento de água como o processamento da água para alcançar uma qualidade ou padrões que atendam aos usuários finais (Howe et al., 2016). No Brasil as principais finalidades de uso da água são para irrigação, abastecimento, fins industriais, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, turismo e lazer (ANA, 2020).

Para promover o abastecimento de água à população se faz necessário a adequação da água bruta aos padrões de potabilidade, que é o conjunto de valores permitidos como parâmetro da qualidade da água para consumo humano. Os parâmetros estipulados no Brasil estão descritos no Anexo XX da Portaria de Consolidação N° 5 do Ministério da Saúde, de 3 de outubro de 2017.

Segundo dados de 2018 do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), 83,6% dos brasileiros possuíam acesso ao serviço de abastecimento de água. No que se refere ao tratamento de esgoto, 42,6% eram coletados e tratados antes de retornarem aos mananciais, o que é o cenário ideal. Por outro lado, 38,6% dos esgotos produzidos no Brasil não eram coletados, nem tratados e cerca de 18,8% dos esgotos eram coletados, mas lançados nos corpos d'água sem tratamento (ANA, 2021).

Os mananciais, ao mesmo tempo em que são fonte de captação de água para tratamento também recebem o esgoto proveniente de tratamento. Observa-se que 9.098 toneladas de carga orgânica eram produzidas diariamente no Brasil em 2018, sendo que 5.516 toneladas chegavam diretamente aos rios e reservatórios mesmo após o tratamento dos esgotos. Essa inserção afeta as características da água, causando um impacto ambiental (ANA, 2021). A água apresenta uma grande variedade de contaminantes e devido a isso é necessário submetê-la a diversas etapas de tratamento para torná-la própria para consumo e garantir a sua qualidade (Francisco et al., 2011).

Segundo Achon et al., (2013), em 2013 existiam em torno de 7500 estações de tratamento de água (ETA's) no Brasil. A maioria dessas estações utilizam o processo convencional de tratamento de água, que consiste nas operações de coagulação, floculação, decantação e filtração (Achon et al., 2013; Botero et al., 2009), seguidas dos processos de desinfecção, alcalinização e, em alguns casos, de fluoretação (Botero et al., 2009).

A classificação dos corpos de água, as condições e os padrões de lançamento de efluentes no país são definidos através da resolução CONAMA N° 430, de 13 de maio de 2011 e o tratamento de água no Brasil segue as normas e regulamentos da Portaria N° 2.914, de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde, a qual dispõe sobre os procedimentos de controle

e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Ainda, a Lei Nº 14.026, de 15 de julho de 2020, estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e a Lei Nº 6.050, de 24 de maio de 1974, dispõe sobre a fluoretação da água em Sistemas de Abastecimento.

No Rio Grande do Sul, entre as legislações que versam a respeito da água potável, é possível citar: a Portaria Estadual Nº 580/2015, de 14 de maio de 2015, a qual dispõe sobre os procedimentos quanto à ocorrência e floração de cianobactérias em mananciais utilizados na captação de água para consumo humano; a Portaria Estadual nº 320, de 28 de abril de 2014, que estabelece parâmetros adicionais de agrotóxicos ao padrão de potabilidade para substâncias químicas, no controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano no RS; a Portaria nº 10/99, de 16 de agosto de 1999, a qual define teores de concentração do íon fluoreto nas águas para consumo humano fornecidas por Sistemas Públicos de Abastecimento, a Portaria SSMA nº 15/89, que dispõe sobre a obrigatoriedade da fluoretação da água para consumo humano nos sistemas públicos e privados de abastecimento do Estado do Rio Grande do Sul, e a Portaria nº 635/BSB, de 26 de dezembro de 1975, D.O.E de 30 de janeiro de 1976, que aprova as normas e padrões sobre a fluoretação da água, tendo em vista a Lei nº 6050/74. Ainda, de acordo com o Anexo XX da Portaria de Consolidação Nº 5 do Ministério da Saúde, de 3 de outubro de 2017, compete à Secretaria de Vigilância em Saúde a vigilância da qualidade da água para consumo humano.

2.2 Etapas do tratamento de água

O processo de tratamento de água consiste na aplicação de diversas etapas em sequência, tendo como objetivo fornecer água com qualidade apropriada para a consumo humano, ou seja, alcançar os padrões de potabilidade estabelecidos pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação Nº 5 do Ministério da Saúde, de 3 de outubro de 2017 (CEVS - RS, 2020). Os itens a seguir apresentam as etapas de tratamento de água potável em detalhe.

2.2.1 Captação e pré-tratamento

A etapa de captação consiste na coleta da água bruta, isto é, sem tratamento e imprópria para consumo, diretamente de algum rio ou reservatório. Para minimizar o arraste de material são utilizadas grades, as quais retêm os elementos sólidos de maior volume (Bittencourt e Paula, 2014).

As obras de captação envolvem o conjunto de estrutura e equipamentos dispostos junto a um manancial, para a tomada de água destinada ao sistema de abastecimento. Os mananciais de superfície podem ser os rios, os córregos, lagos e reservatórios artificialmente formados. Estes últimos, muitas vezes, são construídos como parte integrante do sistema de captação, visando assegurar a obtenção da vazão necessária. As obras de captação devem ser projetadas e construídas de forma que, em qualquer época do ano, sejam asseguradas condições de fácil entrada da água e, tanto quanto possível, da melhor qualidade encontrada no manancial em consideração. Igualmente, devem-se ter sempre em vista, ao desenvolver

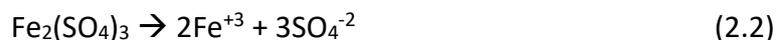
um projeto, facilidades de operação e manutenção ao longo do tempo (UNIP - Universidade Paulista, 2021).

A água bruta passa então por uma etapa de pré-tratamento, onde são adicionados agentes oxidantes e carvão ativado, com o objetivo de reduzir a quantidade de matéria orgânica (Porto Alegre, 2020).

Por fim, a água é transportada, normalmente por meio de bombas, até a ETA, onde é submetida à uma série de operações unitárias para torná-la própria para consumo (Bittencourt e Paula, 2014).

2.2.2 Coagulação e Floculação

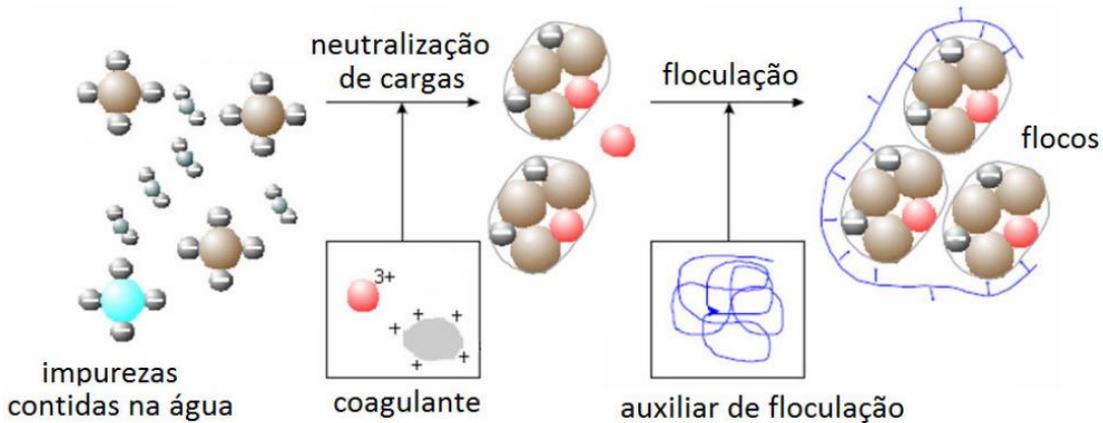
A coagulação é uma operação unitária capaz de desestabilizar partículas coloidais em um sistema aquoso. Sais de alumínio e de ferro são os coagulantes mais utilizados no tratamento de água, pois ao serem introduzidos em meio aquoso, os mesmos se dissociam, conforme os mecanismos representados nas equações abaixo. Após a dissociação dos sais, os íons resultantes reagem com a água, formando espécies mononucleares e polinucleares.



Nas unidades de coagulação, os parâmetros de operação e projeto que devem ser determinados são o tempo de detenção e o gradiente de velocidade, isto é, a intensidade de agitação do líquido necessária para garantir a dispersão dos agentes coagulantes (Francisco et al., 2011).

O processo de coagulação é utilizado na maioria das estações de tratamento de água, com o objetivo de reduzir a turbidez, a coloração e eliminar alguns contaminantes. O uso moderno de agentes coagulantes se deu início há mais de cem anos, quando cloreto férrico e sulfato de alumínio foram utilizados no tratamento de água em escala real (Jiang, 2015). O primeiro lugar do mundo a utilizar sulfato de alumínio para clarificação da água foi a China, seguida por outras nações. Agentes coagulantes metálicos, como sulfato férrico, são os principais utilizados nos Estados Unidos desde 1880 (Choy *et al.*, 2014).

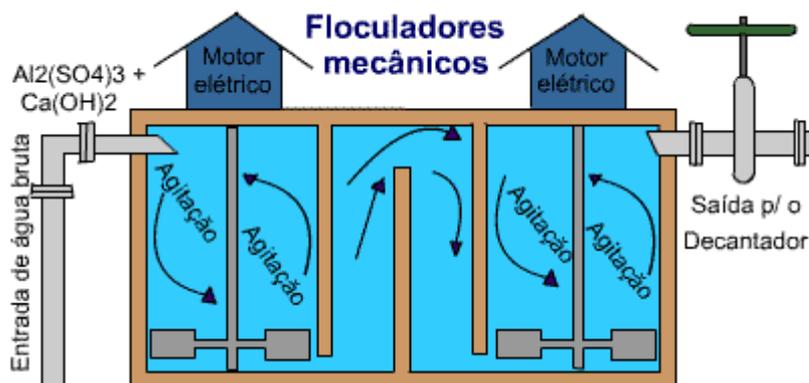
A floculação, que ocorre após a etapa de coagulação, consiste em um processo físico em que partículas coloidais são postas em contato umas com as outras através da adição de um reagente floculante, causando uma aglomeração, e, portanto, um aumento de volume dessas partículas, permitindo que posteriormente ocorra a sedimentação, de acordo com o processo descrito na Figura 2.

Figura 2: Processo de coagulação seguido de floculação

Fonte: Murakami, 2011

Existem diversas opções de agentes que podem ser utilizados, por exemplo, cloreto férrico, sulfato de alumínio e policloreto de alumínio (PAC), como critérios de escolha avalia-se a eficiência e a relação custo – benefício (Bittencourt e Paula, 2014).

A adição de um agente floculante ao meio, que é um coloide carregado positivamente, faz com que o mesmo atraia as partículas carregadas negativamente, com isso, as partículas negativas sofrem uma aglutinação ao redor da partícula positiva e formam-se flocos de maior densidade, facilitando a deposição (Howe et al., 2016) . Essas reações químicas se iniciam na unidade de mistura, a qual pode ser observada na Figura 3, possibilitando a aglomeração das impurezas e com isso levando à formação de flocos. Após sair do floculador, a água é destinada ao decantador, onde os flocos gerados irão decantar (Francisco et al., 2011).

Figura 3: Floculadores mecânicos

Fonte: O2 Engenharia (2020)

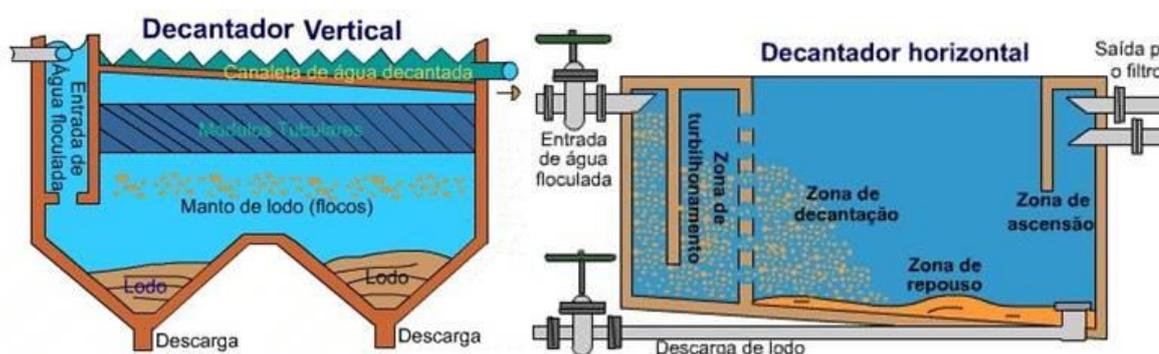
Os parâmetros de operação e projeto devem ser determinados de acordo com as necessidades de cada estação de tratamento, sendo eles: tempo de detenção no tanque de floculação e o gradiente de velocidade (Francisco et al., 2011).

Tratamentos adequados são essenciais na remoção da turbidez e de contaminantes presentes na água. Em razão da simplicidade e eficácia, coagulação e floculação são as técnicas mais empregadas para restaurar a palatabilidade e diminuir a turbidez da água, esses processos desestabilizam as partículas coloidais e posteriormente incrementam tamanho às partículas, facilitando a sedimentação das mesmas (Choy et al., 2014). Em geral, os processos mais comumente empregados e viáveis para remoção da matéria orgânica presente na água são os processos de coagulação e floculação seguido de sedimentação e filtração (Matilainen et al., 2010).

2.2.3 Decantação

Decantação é um processo físico de separação de misturas heterogêneas, baseado na diferença de densidade. Em um tanque de sedimentação, à medida que a água flui, as partículas mais densas se depositam em seu fundo, formando uma camada de lodo. Existem dois tipos de decantadores, o decantador vertical e o decantador horizontal, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4: Decantadores vertical e horizontal



Fonte: O2 Engenharia (2020)

Após a coagulação e floculação, as partículas adquirem um maior volume, sendo possível dessa forma a sua deposição no tanque de sedimentação. Nesta etapa é necessário conhecer a velocidade de sedimentação, que é calculada através de um balanço entre as forças atuantes na partícula: força de arraste, empuxo e peso.

2.2.4 Filtração

Filtração é um método de separação de misturas heterogêneas e consiste na utilização de um meio poroso que permite a passagem do líquido e retêm as partículas sólidas de menor densidade, que não se depositaram no decantador. Existem diversos tipos de filtros, na filtração granular, o meio poroso é uma espessa camada de material granular, como areia (Bittencourt e Paula, 2014).

No caso da filtração rápida (Figura 5), a qual é a mais utilizada no processo de tratamento de água, os meios granulares geralmente são processados, promovendo tamanhos mais uniformes (Howe et al., 2016).

Figura 5: Filtro rápido de areia



Fonte: O2 Engenharia (2020)

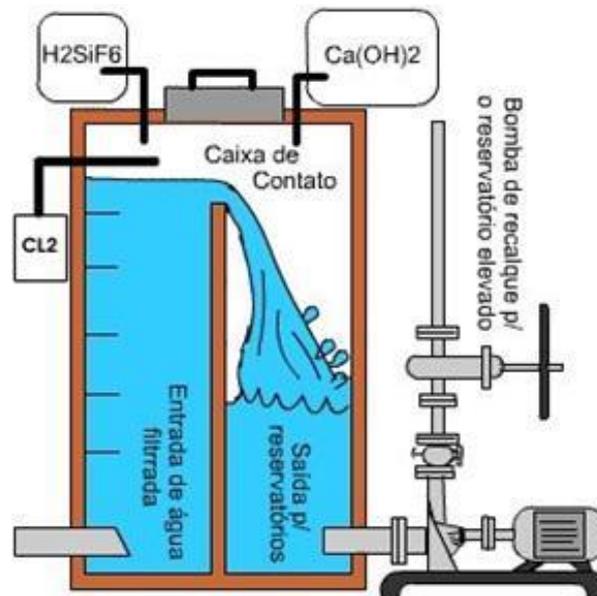
2.2.5 Desinfecção, Alcalinização e Fluoretação

A etapa de desinfecção é essencial para que a água bruta se torne potável, pois para isso, é necessário a remoção de agentes patogênicos. Diversos agentes desinfetantes podem ser empregados no tratamento de água, desde agentes físicos como radiação ultravioleta ou temperatura, até agentes químicos, como ácidos, bases, halogêneos, entre outros (Ferreira Filho, 2017).

O agente mais comumente adicionado nesta etapa, principalmente em estações de tratamento no Brasil, é o cloro. Entretanto, vale ressaltar que o uso deste agente pode gerar subprodutos tóxicos, que assim como as características da água, podem variar a sua ocorrência em função da sazonalidade, sendo assim, se faz importante o monitoramento (Alvarenga, 2010).

A alcalinização consiste na adição de agentes alcalinizantes na água para que a mesma recupere sua alcalinidade natural e seu pH. Geralmente, em casos em que é necessária a elevação do pH para ajuste dos parâmetros de qualidade, é feita a adição de cal virgem, que além de possuir uma grande afinidade com a água, forma uma película protetora nas tubulações, ajudando na prevenção de oxidação (Bittencourt e Paula, 2014).

A fluoretação consiste na adição de flúor à água. Essa etapa é recomendada por diversas instituições científicas ao redor do mundo, com o intuito de prevenir a cárie dentária (Roncalli et al., 2019). Desde 1974 essa etapa é obrigatória no tratamento de água no Brasil. A Lei Federal Nº 6.050, de 24 de maio de 1974, dispõe sobre a fluoretação da água em sistemas públicos de abastecimento, sendo devidamente regulamentada pelo Decreto Federal nº 76.872, de 22 de dezembro de 1975, que dispõe sobre a obrigatoriedade da fluoretação.

Figura 6: Desinfecção, fluoretação e alcalinização

Fonte: O2 Engenharia (2020)

2.3 Tratamento de água em Porto Alegre

O tratamento de água em Porto Alegre (RS) é realizado pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE). Existem 7 estações de tratamento de água (ETA's) situadas em diversos bairros e com diferentes capacidades que, ao total, produzem cerca de 10,9 mil litros de água por segundo. O tratamento de água nessas estações segue as seguintes etapas: captação, pré-tratamento, floculação, decantação, filtração, desinfecção, alcalinização, fluoretação, armazenamento e distribuição (Porto Alegre, 2020), conforme Figura 7.

Figura 7: Processo de tratamento de água realizado pelo DMAE

Fonte: Porto Alegre (2020)

A água é captada do Lago Guaíba, em Porto Alegre (RS) e passa por um gradeamento, nas Estações de Bombeamento de Água Bruta, onde ficam retidos os sólidos de maior volume. Na etapa de pré-tratamento são aplicados agentes oxidantes e carvão ativado na água bruta, que é então conduzida às Estações de Tratamento de Água, onde recebe a adição de um agente coagulante (sulfato de alumínio ou cloreto de polialumínio) e com isso, ocorre a aglutinação de partículas sólidas, que posteriormente decantam e se depositam no decantador. A água então passa por filtros rápidos de areia, que filtram as partículas menos pesadas, que não sedimentaram, e passa para a etapa de desinfecção, onde é adicionado cloro para a eliminação de microrganismos patogênicos. Após, a água recebe a adição de agentes alcalinizantes, visando devolver a sua alcalinidade natural e então é feita a aplicação de flúor com o intuito de reduzir a ocorrência de cárie dentária e, finalmente, a água está em condições apropriadas de ser distribuída para a população (Porto Alegre, 2020).

Ainda, sobre o lançamento de efluentes, que é um importante fator na poluição das águas, no Rio Grande do Sul os padrões e critérios de lançamentos de efluentes líquidos seguem a resolução CONSEMA Nº 355/2017.

2.3.1 Eficiência do tratamento de água

Segundo os dados de 2018, 49,1% do esgoto de Porto Alegre referido à água consumida é tratado, e 9,5% da população não tem coleta de esgoto, com isso, uma parcela de esgoto não tratado se mistura à água, dificultando ainda mais o processo de tratamento de água (Painel Saneamento, 2018).

Arsand e colaboradores (2018), estudaram a água do arroio Dilúvio, em Porto Alegre – RS. A água foi coletada de diversos pontos e com base nos dados das análises realizadas é possível verificar a presença de diversos contaminantes emergentes, tais como fármacos, na água. A água do arroio Dilúvio deságua diretamente no lago Guaíba, de onde a água é coletada pelas estações de bombeamento de água para tratamento e destinada às ETA's, sendo, após tratamento, distribuída à população.

Tabela 1: Resultados para contaminantes emergentes em amostras reais da água coletada no Arroio Dilúvio em Porto Alegre. Os círculos pretos preenchidos representam analitos detectados.

Contaminantes Emergentes	Presença no Efluente
Antibióticos	
Sulfametoxazol	•
Trimetoprima	•
Oxitetraciclina	•
Cocidiostáticos	
4,4' – Dinitrocarbanilida	•
AINEs	
Diclofenaco	•
5- Hidroxifunixina	•
Cetroprofeno	•
Fenilbutazona	•
Beta-bloqueadores	
Atenolol	•
Carvedilol	•
Labetalol	•

Metoprolol	•
Propranolol	•
Sotalol	•
Corticóides	
Prednisolona	•
Prednisona	•
Betametasona	•
Outros	
Cafeína	•

Fonte: ARSAND, 2018

Como é possível observar na Tabela 1, diversos compostos além da matéria orgânica são encontrados na água bruta, que é submetida ao tratamento convencional realizado nas ETA's, conforme descrito anteriormente. Porém, os tratamentos convencionais realizados nas ETA's não são totalmente eficientes na remoção dos contaminantes emergentes presentes na água, removendo-os apenas parcialmente (Pescara, 2014).

Machado e colaboradores (2016) comprovaram a presença de contaminantes emergentes na água tratada em diferentes capitais brasileiras, entre as substâncias estudadas, atrazina e cafeína foram observadas com maior frequência nas amostras coletadas. Este estudo confirma que o tratamento de água convencional não é eficaz na degradação de contaminantes emergentes e, ainda, revela que este é um problema real na água potável do Brasil.

2.4 Contaminantes Emergentes

Pesquisadores vêm identificando diferentes contaminantes no meio ambiente (solo, água e ar). Entre estes, há diversas substâncias que são consideradas contaminantes emergentes, tais como: produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais (PPCP's), drogas ilícitas, pesticidas, hormônios, entre outros (Montagner et al., 2017). Em águas superficiais e subterrâneas é possível detectá-los em níveis vestigiais, da ordem de ppb (ng L^{-1}) à ppm (mg L^{-1}) (Bai et al., 2018), porém, estes compostos, mesmo em baixas concentrações, podem apresentar riscos à saúde humana e animal e não há legislações que garantam o seu monitoramento (Montagner et al., 2017). A Agência de Proteção Ambiental (EPA) define poluentes emergentes como novos compostos químicos sem estatuto regulamentar, os quais o impacto sobre o meio ambiente e saúde humana são pouco compreendidos (United States Environmental Protection Agency, 2021).

Um exemplo de contaminante emergente muito conhecido e frequentemente encontrado na água é a cafeína, sendo um dos produtos mais consumidos ao redor do mundo, pois não somente é encontrada em diversos produtos alimentícios como também em diversas plantas e medicamentos. Este composto é bastante estável e solúvel em água, portanto é parcialmente removido nas ETE's, mas pode permanecer na água e conseqüentemente remanescer em águas destinadas ao abastecimento da população (Montagner et al., 2017).

Os contaminantes emergentes têm diversas origens, como a descarga de efluentes de estações de tratamento, rejeitos industriais, agricultura e pecuária, esgoto doméstico e hospitalar, resíduos de construções e coleta de lixo municipal (Zhou et al., 2020).

Segundo Gogoi e colaboradores (2018), os contaminantes emergentes podem ser classificados em três grandes grupos, sendo eles: produtos farmacêuticos, produtos de cuidados pessoais e compostos desreguladores endócrinos.

A classe dos fármacos é constituída por um grande grupo de diversas substâncias químicas orgânicas que são utilizadas com finalidades medicinais para a manutenção da saúde humana e animal, e, portanto, se fazem presentes principalmente no esgoto devido a excreção, através da urina e fezes, de parte da dosagem administrada que não é absorvida pelo organismo juntamente com seus metabólitos (Puckowski et al., 2016). Os tipos de medicamentos mais comumente detectados são anticonvulsivantes, antidepressivos, antiepilépticos, anti-hipertensivos e betabloqueadores, o que se dá, provavelmente, devido à alta solubilidade em água desses medicamentos e às baixas taxas metabólicas em corpo humano (Bai et al., 2018).

Em relação a classe de produtos de cuidados pessoais (PCP's), estes podem ser encontrados em diversos produtos, os PCP's mais comuns são encontrados em cosméticos, hormônios modificados, esteroides, perfumes, shampoos e protetores solar (Gogoi et al., 2018).

Quanto à classe dos desreguladores endócrinos, são compostos químicos, que, quando ingeridos podem levar à alterações hormonais, esses compostos são dispostos no meio ambiente por meio de atividades humanas, animais e industriais, contaminando o solo, águas superficiais e águas subterrâneas (Gogoi et al., 2018).

Contaminantes emergentes já foram detectados não somente em efluentes, como também, em águas residuais tratadas, águas consideradas potáveis, águas superficiais e lençóis freáticos (Gogoi et al., 2018). Esses contaminantes podem trazer problemas tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana. Em relação à saúde humana as conseqüências podem envolver o desenvolvimento de resistência antibiótica, ruptura endócrina e carcinogenicidade (Bai et al., 2018).

O tratamento de água no Brasil segue as normas e regulamentos da Portaria N° 2.9104, de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde, porém dentre as regulamentações previstas nessa portaria não se encontra nada relativo ao monitoramento dos contaminantes emergentes.

Considerando a resistência dos contaminantes emergentes aos tratamentos convencionais, se faz necessária a utilização de técnicas de tratamento avançadas, para que seja possível, dessa forma a eliminação destes poluentes.

2.5 Técnicas avançadas para tratamento de água

Diversos países vêm estudando a aplicação de técnicas de tratamento complementares visando a remoção dos poluentes emergentes presentes na água (Montagner et al., 2017). Dentre os possíveis tratamentos pode-se citar processos como ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa, estes processos se baseiam na separação molecular, sem que ocorra degradação.

Entretanto esses processos apresentam desvantagens, pois é necessário a utilização de técnicas auxiliares para tratar ou dispor a fase sólida concentrada onde se encontram os poluentes (Teixeira e Jardim, 2004; Verlicchi et al., 2015). Ainda, os processos de nanofiltração e osmose inversa apresentam alta eficiência, porém o custo operacional é bastante elevado, dificultando a utilização dos mesmos (Da Cruz et al., 2010).

Além dos processos citados, vêm sendo também estudada a utilização de processos oxidativos avançados (POA's). Esses processos, ao contrário dos anteriormente citados, são capazes de degradar o poluente através da utilização de agentes oxidantes. Com isso, se tornam mais facilmente aplicáveis no tratamento de água e efluentes (Verlicchi et al., 2015).

2.5.1 Processos oxidativos avançados (POA's)

Processos oxidativos avançados são processos em que o oxidante primário é o radical hidroxila, o qual possui um alto potencial de redução, sendo assim, capaz de degradar diversos poluentes (Verlicchi et al., 2015). Os valores do potencial de redução para algumas espécies oxidantes são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores do potencial padrão de redução (E^0) de espécies oxidantes.

Espécie	E^0
Radical Hidroxila, HO•	+2,80
Ozônio, O ₃	+2,07
Peróxido de Hidrogênio, H ₂ O ₂	+1,77
Hipoclorito, ClO ⁻	+1,43
Radical Peridroxil, HO ₂	+1,42
Cloro, Cl ₂	+1,36
Oxigênio, O ₂	+1,23

Fonte: Shin et al., 2008

Os processos oxidativos avançados têm alcançado significativo destaque nos últimos anos devido à sua capacidade de transformar os poluentes em espécies mais simples ou substâncias menos tóxicas e de fácil degradação por tecnologias comuns. Entretanto, um importante fator

a ser considerado é que em alguns casos o produto resultante da degradação utilizando POA's pode ser mais tóxico do que o poluente original (De Araújo et al., 2016).

Diversas técnicas vêm sendo estudados no desenvolvimento de uma abordagem eficiente na remoção de poluentes emergentes, como fotólise, fotocatalise, ozonólise, oxidação Fenton, tratamento de água supercrítica, biodegradação, entre outros. Um POA amplamente estudado é a ozonização, devido a sua alta eficiência na remoção de fármacos (Homem e Santos, 2011).

2.5.2 Ozonização

O ozônio é uma fonte de agente oxidante ($E^0 \cong 2,1 \text{ V}$), com isso, é capaz de oxidar uma série de compostos orgânicos e inorgânicos, além disso, outro fator que leva a sua utilização é o fato de que o oxigênio é seu principal produto de degradação (Mahmoud e Freire, 2007).

Ainda, sob condições básicas, a degradação do ozônio leva à formação de radicais hidroxila, que possui um potencial de redução ainda mais elevado ($E^0 \cong 2,8 \text{ V}$), atuando dessa forma como um POA (Mahmoud e Freire, 2007).

O ozônio pode ser gerado a partir de 3 técnicas: irradiação ultravioleta, eletrólise ou descarga eletroquímica. O método que promove uma maior taxa de conversão do oxigênio em ozônio, sendo, portanto o mais utilizado, é o de descarga eletroquímica, no qual o ozônio é produzido a partir da passagem de ar, ou oxigênio, entre dois eletrodos sujeitos a uma diferença de potencial (Teixeira e Jardim, 2004).

Já, a decomposição do ozônio pode se dar de duas formas, através do mecanismo direto ou do mecanismo indireto. Em pH ácido é predominante a ocorrência do mecanismo direto, reação de ozonólise, uma reação seletiva e muitas vezes com constantes cinéticas lentas. Já em pH básico, predomina o mecanismo indireto, o qual leva a formação de radicais hidroxila, que possuem um alto potencial de redução e elevada constante cinética, dessa forma, se torna muito mais eficiente na degradação de poluentes (Mahmoud e Freire, 2007).

Este processo oxidativo avançado é uma alternativa que vem sendo estudada há anos para aumentar a eficiência do tratamento de água, pois apresenta um alto poder de oxidação, sendo capaz de remover contaminantes emergentes, tais como fármacos (Quero-Pastor et al., 2014). Outra aplicação da ozonização se dá no tratamento de efluentes. Zoumpouli e colaboradores (2020) estudaram a degradação de diversos micropoluentes através do processo de ozonização em diferentes matrizes de água (água pura tamponada, água da torneira e efluente de águas residuais) e obtiveram uma boa eficiência de remoção para grande parte dos contaminantes estudados.

Apesar de ser uma técnica eficiente na remoção de contaminantes emergente, pode-se citar também algumas desvantagens, dentre elas:

- Por se tratar de um sistema mais complexo, requer a aquisição de equipamentos para suportar o processo;

- O custo do tratamento pode ser relativamente alto devido à alta demanda de energia;
- Pode ocorrer a formação de subprodutos na reação de oxidação.

A degradação de contaminantes emergentes também pode ser obtida através de outros processos oxidativos avançados, assim como, através da ozonização aliada à outros processos (Homem e Santos, 2011). Souza e Féris (2015) avaliaram a degradação de um contaminante emergente, a cafeína, utilizando ozonização e ozonização combinada com radiação ultravioleta e concluíram que a ozonização é eficiente na degradação do poluente estudado.

Ainda, o ozônio pode ser aplicado em diferentes etapas do processo de tratamento de água: pré-ozonização, onde a água bruta é submetida ao processo de ozonização; ozonização intermediária, onde a água já submetida às primeiras etapas de tratamento passa pelo processo de ozonização, antes de passar pela filtração; ou ainda pós-ozonização, onde a água passa pelo processo de ozonização após ser filtrada. Ainda, é possível aplicar a ozonização em mais de uma etapa do processo, combinando as aplicações descritas anteriormente (Thompson e Drago, 2015).

3 Materiais e Métodos

O presente trabalho seguiu a base do estudo exploratório, mediante a pesquisa em bancos de dados tais como, Science Direct, Scopus e Google Acadêmico. Foram selecionados trabalhos entre 2015 e 2021 que avaliassem a aplicação de ozônio ao tratamento de água, em escala real ou piloto.

Os termos utilizados para consulta foram: “ozonation”, “ozone”, “water treatment plant”, “emerging contaminants”, “pharmaceuticals”, “advanced oxidative processes”, “water disinfection system”, “large-scale ozonation”. Para a elaboração do trabalho foram selecionados 7 artigos.

O estudo seguiu as etapas:

Etapa 1: Seleção das fontes de consulta.

Etapa 2: Pesquisa e coleta de bibliografia, sendo armazenada no software Mendeley.

Etapa 3: Leitura seletiva dos materiais, a fim de selecionar os trabalhos mais adequados e contendo os parâmetros relevantes para o presente trabalho (etapa de aplicação da ozonização, tempo de contato e concentração aplicada).

Etapa 4: Registro dos parâmetros e resultados obtidos por cada estudo.

Etapa 5: Seleção dos trabalhos com processos mais semelhantes ao processo de tratamento de água aplicado no Brasil.

Etapa 6: Interpretação e discussão aprofundada dos resultados obtidos nos trabalhos selecionados na etapa 5.

Etapa 7: Elaboração de proposta de aplicação de ozonização no tratamento de água de Porto Alegre.

4 Resultados

Esta seção traz a seleção de trabalhos realizada no presente estudo, mostra uma avaliação detalhada dos artigos selecionados, os quais têm em comum o fato de apresentarem suas pesquisas em estações de tratamento de água que utilizam configurações mais semelhantes ao tratamento realizado no Brasil. Com base na análise feita, é apresentada uma proposta para o tratamento de água em Porto Alegre, visando o aumento de sua eficiência.

4.1 Tratamento de água por ozonização: pesquisas avaliadas

Os artigos selecionados para análise no presente estudo estão apresentados na Tabela 3, os quais estão relacionados à utilização de ozônio como um processo oxidativo avançado aplicado no tratamento de água. Ainda, na Tabela 3, estão descritos os parâmetros utilizados nos estudos, tais como, etapa de aplicação da ozonização (pré-ozonização, ozonização intermediária ou pós-ozonização), dosagem de ozônio aplicada e tempo de contato e os resultados obtidos.

Tabela 3: Relação dos trabalhos avaliados neste estudo que envolvem a aplicação de ozonização no processo de tratamento de água e informações importantes de cada um.

Referência	Contaminante Emergente	POA Aplicado	Dosagem de Ozônio (mg/L)	Tempo de Contato (min)	Resultados Obtidos
Borrull et al., 2021	60 micropoluentes, incluindo fármacos, produtos de cuidados pessoais (PPCP's), pesticidas, per e polifluoralquil (PFAS's)	Pré-ozonização e Pós-ozonização	Pré-ozonização: 0,5 Pós-ozonização: 0,5 a 0,65	Pré-ozonização: 5 Pós-ozonização: 30	31 dos contaminantes estudados foram detectados na água bruta, destes, 14 não foram detectados ao final do tratamento, na água potável, e a soma das concentrações medianas na água da fonte (132,0 ng/L) foi reduzido para 22,4 ng/L no efluente, uma diminuição de 83,0% na concentração após a passagem por meio da estação de tratamento de água.
Lin et al., 2016	39 fármacos e produtos de cuidados pessoais (PPCP's)	Pré-ozonização e Pós-ozonização*	Pré-ozonização: 0,5 a 1,5 Pós-ozonização: 0,5 a 1	Pré-ozonização: 6 Pós-ozonização: 30	Dos 39 PPCP's avaliados, 14 foram detectados na água bruta, sendo que apenas 3 deles foram detectados na água tratada (em concentrações de ng/L). A estação de água, com tratamento avançado, resultou em uma melhor remoção dos PPCP's avaliados no estudo.
Miao et al., 2015	Aminopirina (Aminofenazona)	Pós-ozonização	1,5 a 2,0	12	Os resultados mostraram que a ozonização demonstrou alta eficiência na remoção de aminopirina em matrizes de água real, sendo degradada até uma concentração abaixo dos limites de detecção. Este estudo também avaliou a formação de subprodutos da reação de ozonização. Apenas 3 subprodutos foram formados em concentrações detectáveis para a

					reação de ozonização da aminopirina e estes foram removidos na etapa de adsorção com carvão biológico ativado (BAC).
Song et al., 2019	10 antibióticos	Pré-ozonização e UV	2	3	Foram estudadas duas plantas de tratamento de água, uma delas utilizando técnicas convencionais e uma com técnicas de tratamento avançado. A eficiência total de remoção na estação com tratamento avançado variou entre 40,3% e 70,3% de acordo com o antibiótico avaliado, apresentando resultados melhores do que a estação com o tratamento convencional.
Ullberg et al., 2021	29 micropoluentes, incluindo fármacos e produtos de cuidados pessoais (PPCP's) e químicos industriais	Pós-ozonização	0,75 (+/-0,2)	4,2	A concentração dos micropoluentes reduziu mais de 70% para 21 de 29 compostos, mostrando que a ozonização foi uma medida eficiente, entretanto o carbono orgânico dissolvido sofreu uma redução de apenas 4%. Concluiu-se que se os micropoluentes orgânicos, particularmente substâncias não reativas ao ozônio, estão em água bruta, um eficiente pós-tratamento é importante para a qualidade final da água (como filtração com carvão ativado, no contexto do estudo realizado).
Yang et al., 2017	120 micropoluentes, incluindo odorantes típicos, pesticidas,	Pré-ozonização ou Pós-ozonização	Foram utilizadas diversas dosagens tanto na pré-ozonização quanto na pós-ozonização:	Pré - ozonização: 5 Pós - ozonização: 15	Tanto a pré-ozonização quanto a pós-ozonização e sua combinação com BAC exibiram desempenho semelhante na remoção de produtos farmacêuticos e pesticidas, enquanto a pós-ozonização permitiu um desempenho

	fármacos e compostos perfluorados (PFC's)		0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0		ligeiramente melhor na remoção de odores/odorantes. No entanto, a combinação de ozonização e BAC não foi eficaz na remoção de PFC's. O estudo também avaliou a formação de bromato, um subproduto do processo de ozonização. Nenhum bromato foi produzido durante a pré-ozonização, enquanto aproximadamente 6 µg/L de bromato foi formado durante a pós-ozonização sob uma dose de ozônio de 2,0 mg/L.
Zhang et al., 2016	15 fármacos e produtos de cuidados pessoais (PPCP's)	Pré-ozonização e ozonização intermediária	Sem H ₂ O ₂ : 2 Com H ₂ O ₂ : 2,5 (tanto para pré-ozonização quanto para ozonização intermediária)	Pré-ozonização: 5,33 Ozonização intermediária: 10 min	Os resultados mostraram uma eficiência significativa para a utilização de carvão ativado precedido de flotação por ar dissolvido e ozonização intermediária e para UV/H ₂ O ₂ , onde mais de 12 compostos apresentaram um percentual de remoção superior a 90%. Remoções reduzidas de PPCP's foram observadas utilizando GAC precedido por pré-ozonização e filtração por ar dissolvido. A ozonização intermediária se mostrou mais eficaz do que a pré-ozonização, especificamente, a ozonização intermediária seguida por GAC, que remove todos os compostos em mais de 90%.

* Neste estudo a pós-ozonização foi chamada de ozonização intermediária, entretanto, em outros trabalhos como, Thompson e Drago (2015), é citado que a ozonização intermediária é quando a ozonização ocorre entre o pré-tratamento de água e a filtração. Desta forma no presente trabalho a ozonização do estudo realizado por Lin e colaboradores (2016) foi tratada como pós-ozonização, visto que ocorre após a etapa de filtração.

Os estudos avaliados são relevantes para o presente trabalho, pois todos aplicam ozonização em estações de tratamento de água em escala real ou em escala piloto visando à remoção de contaminantes emergentes. Os resultados obtidos pelos autores, possibilitam

avaliar a eficácia do processo e a variedade de contaminantes que podem ser removidos através do mesmo, sendo, além disso, possível verificar as diferentes configurações em que o ozônio pode ser aplicado no processo de tratamento de água. Dentre os estudos avaliados, 4 deles apresentam processos semelhantes aos aplicados nas estações de água do Brasil, os resultados obtidos pelos mesmos serão discutidos em detalhe no item 4.2.

4.2 Tratamento de água por ozonização: pesquisas avaliadas com o tratamento mais próximo ao realizado no Brasil

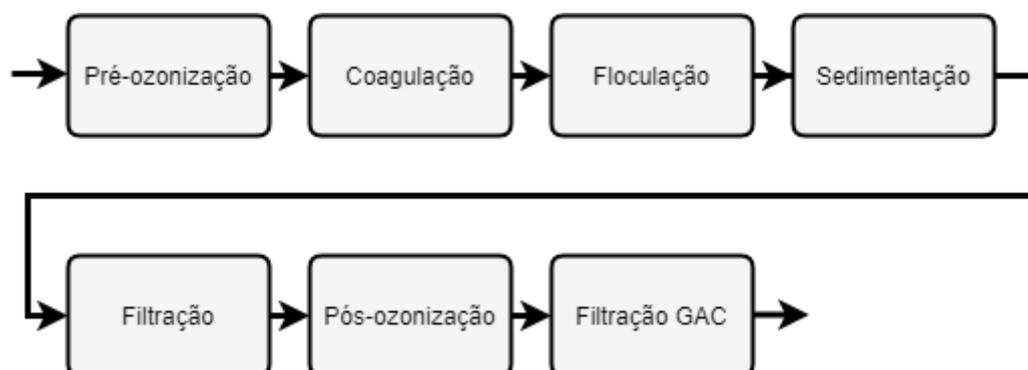
Os estudos apresentados na Tabela 3 relatam o uso de ozonização no processo de tratamento de água, o qual é o tema estudado no presente trabalho. Dentre os estudos avaliados foram selecionados 4 trabalhos para serem estudados em detalhe. Os trabalhos selecionados foram aqueles que abordam os processos de tratamento de água em configurações mais semelhantes ao tratamento de água realizado no Brasil, com exceção da etapa de ozonização. A seguir esses artigos são apresentados e discutidos.

4.2.1 Artigo 1 – Borrull e colaboradores (2021)

Este estudo foi selecionado para ser detalhado devido ao fato de abordar a degradação de contaminantes emergentes em uma estação de tratamento de água, em escala real, utilizando um processo semelhante ao tratamento convencional de água realizado no Brasil com adição das etapas de pré-ozonização e pós-ozonização.

A presença e degradação de 60 micropoluentes, incluindo fármacos e produtos de cuidados pessoais (PPCP's), pesticidas, per e polifluoralquil (PFAS's), foi investigada em um estudo realizado por Borrull e colaboradores (2021). A água bruta utilizada na realização do estudo foi coletada do rio Ebro, situado na Espanha. O processo foi realizado de acordo com as etapas descritas na Figura 8.

Figura 8: Processo de tratamento de água estudado por Borrull e colaboradores (2021)



Fonte: Autor

Dos 60 contaminantes avaliados, 31 foram detectados na água bruta, e, destes, 17 permaneceram presentes após o tratamento. Dos contaminantes detectados, 14 foram pesticidas, 11 PFAS's, 5 fármacos e cafeína.

Na etapa de pré-ozonização já foi possível a remoção de contaminantes como paracetamol, antipirina, carbamazepina e diclofenaco, o que indica que a pré-ozonização foi eficaz na remoção dos fármacos avaliados no estudo. O herbicida isoproturon, que foi detectado em todas as amostras de água bruta coletadas, apresentou uma remoção maior do que 99% nesta etapa, entretanto a remoção de outro herbicida, o diuron, já não foi tão

eficiente, sendo apenas de $28,6 \pm 17,6\%$, a remoção da cafeína apresentou resultados semelhantes, $27,9 \pm 10,2\%$.

Já na etapa de pós-ozonização, a claritromicina, único fármaco remanescente da etapa de pré-ozonização, foi completamente removido. Já em relação ao grupo de pesticidas avaliados, apenas o terbutryn foi removido significativamente durante esta etapa do processo, isso se deve ao fato de que o ozônio é um oxidante seletivo. Comportamentos semelhantes foram observados para o herbicida diuron e a cafeína, os quais apresentaram uma remoção de $62,7 \pm 39,7\%$ e $54,5 \pm 39,2\%$, respectivamente. Os PFAS's não apresentaram grande eficiência de remoção.

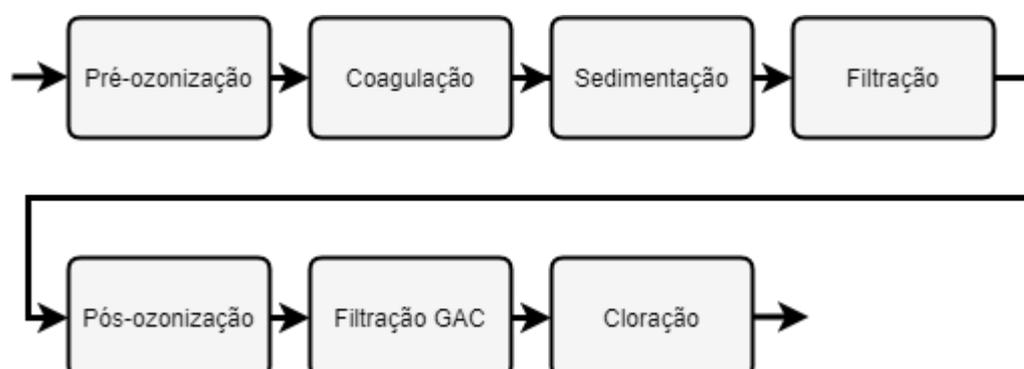
4.2.2 Artigo 2 – Lin e colaboradores (2016)

Este artigo foi selecionado para ser detalhado por abordar a degradação de contaminantes emergentes em uma estação de tratamento de água, em escala real, utilizando um processo semelhante ao tratamento convencional de água realizado no Brasil com adição da etapa de pré-ozonização.

Lin e colaboradores (2016) avaliaram a presença e remoção de 39 fármacos e produtos de cuidados pessoais (PPCP's) em uma estação de tratamento de água situada na China, a qual capta água do lago Taihu. Dos 39 contaminantes estudados, 14 foram encontrados em água bruta. O estudo agrupou os contaminantes removidos em dois grupos (1) abaixo do limite de detecção; (2) moderadamente removidos – remoção maior do que 80%.

Dos 14 contaminantes encontrados, 3 PPCP's foram removidos completamente através do processo de pré-ozonização e 9 foram removidos através da pós-ozonização. Entre os contaminantes removidos na pré-ozonização, um foi detectado novamente no efluente do filtro rápido de areia, porém foi removido na pós-ozonização. Cafeína, indometacina e sulfametoxazol foram removidos com eficiências de 89,5%, 84,2% e 92,2%, respectivamente. O tratamento de água abordado no estudo avaliou a eficiência dos processos de pré-ozonização e pós-ozonização de forma simultânea, de acordo com a Figura 9.

Figura 9: Processo de tratamento de água estudado por Lin e colaboradores (2016)



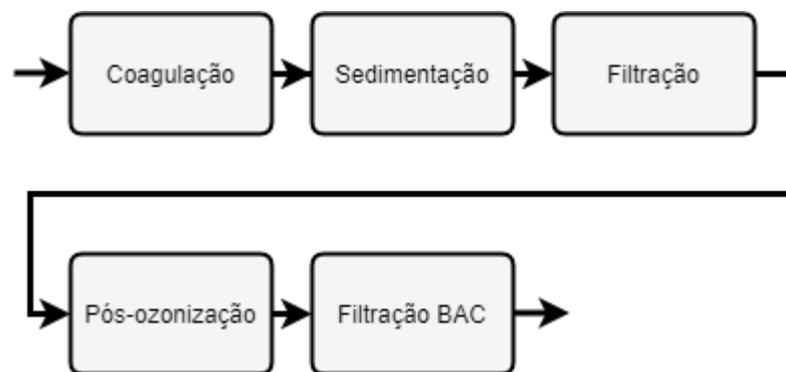
Fonte: Autor

4.2.3 Artigo 3 – Miao e colaboradores (2015)

O terceiro artigo selecionado para ser detalhado estuda a degradação de um fármaco, a aminopirina, em escala piloto, utilizando um processo semelhante ao tratamento convencional de água realizado no Brasil com adição da etapa de pós-ozonização.

Miao e colaboradores (2015) estudaram a degradação de aminopirina através do processo de ozonização, utilizando diferentes abordagens. Um total de 21 intermediários da reação de oxidação da aminopirina foram avaliados. O estudo foi realizado através de experimentos em escala de bancada e escala piloto, tendo em vista o objetivo do presente trabalho, apenas os resultados obtidos através da escala piloto foram detalhados. O processo foi composto pelas etapas descritas na Figura 10.

Figura 10: Processo de tratamento de água estudado por Miao e colaboradores (2015)



Fonte: Autor

A água bruta utilizada na realização dos experimentos foi coletada do lago Taihu (China), e o contaminante estudado foi encontrado com uma concentração de $0,433 \pm 0,013 \mu\text{M}$. Os experimentos utilizaram diferentes abordagens e a aminopirina foi degradada abaixo dos limites de detecção através da pré-ozonização (sem aditivos) e pré-ozonização com adição de H_2O_2 , entretando com adição de HCO_3^- a aminopirina foi detectada na concentração de $0,021 \pm 0,010 \mu\text{M}$.

Os resultados obtidos no estudo mostraram a eficiência da ozonização na remoção da aminopirina, além disso, dos subprodutos da oxidação, apenas 3 apresentaram concentrações detectáveis. Os resultados também evidenciaram que a adsorção com carbono biológico ativado (BAC) foi capaz de reduzir a matéria orgânica após a ozonização, além disso, nenhum subproduto da reação de oxidação foi detectado após a etapa de adsorção com BAC.

4.2.4 Artigo 4 – Yang e colaboradores (2017)

O quarto e último estudo selecionado para avaliação em detalhe no presente trabalho aborda a degradação de contaminantes emergentes, em escala piloto, utilizando um processo semelhante ao tratamento convencional de água realizado no Brasil e comparando a adição das etapas de pré-ozonização ou pós-ozonização.

Yang e colaboradores (2017) avaliaram a eficiência da ozonização na remoção de micropoluentes comparando a pré-ozonização e a pós-ozonização. O estudo foi realizado em escala piloto e 120 micropoluentes, incluindo odorantes típicos, pesticidas, fármacos e compostos perfluorados (PFCs), foram avaliados. A água bruta foi coletada do rio Huangpu, situado em Xangai, na China. Com o objetivo de avaliar a performance tanto da pré-ozonização quanto da pós-ozonização, o sistema de tratamento de água foi operado de duas formas:

- (i) pré-ozonização, coagulação, sedimentação, filtração e adsorção BAC, conforme representado na Figura 11;
- (ii) coagulação, sedimentação, filtração, ozonização e adsorção BAC, conforme representado na Figura 12.

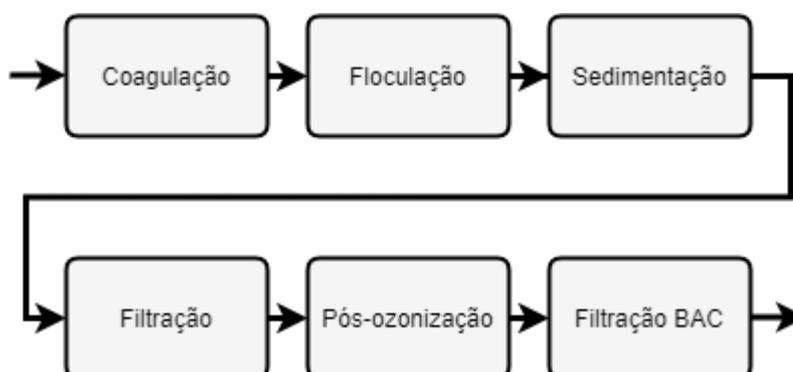
Além disso, 6 variações na dosagem de ozônio foram utilizadas, conforme descrito na Tabela 3.

Figura 11: Processo de tratamento de água (i) estudado por Yang e colaboradores (2017)



Fonte: Autor

Figura 12: Processo de tratamento de água (ii) estudado por Yang e colaboradores (2017)



Fonte: Autor

Dentre os micropoluentes avaliados, 27 foram fármacos, destes, 14 foram detectados na água bruta e tanto a pré-ozonização quanto a pós-ozonização apresentaram desempenhos semelhantes na remoção dos 8 contaminantes principais, sendo que a percentagem de remoção de 6 destes 8 contaminantes foi superior a 88% para uma dosagem de 1,0 mg/L de

ozônio, exceto para cafeína e metoprolol. Ao aumentar a dosagem para 2,0 mg/L a remoção dos contaminantes foi superior a 97,6%, com exceção da cafeína, portanto, o estudo mostra que tanto a pré-ozonização quanto a pós-ozonização são eficientes na remoção de fármacos.

Ainda, 25 dos contaminantes abordados no estudo são pesticidas, destes, 10 foram detectados na água bruta, para estes também tanto a pré-ozonização quanto a pós-ozonização apresentaram uma remoção semelhante quando aplicada 1,5 mg/L de ozônio, uma dose maior de ozônio aumentou o desempenho da pós-ozonização mas não foi muito eficiente para o aumento do desempenho na pré-ozonização.

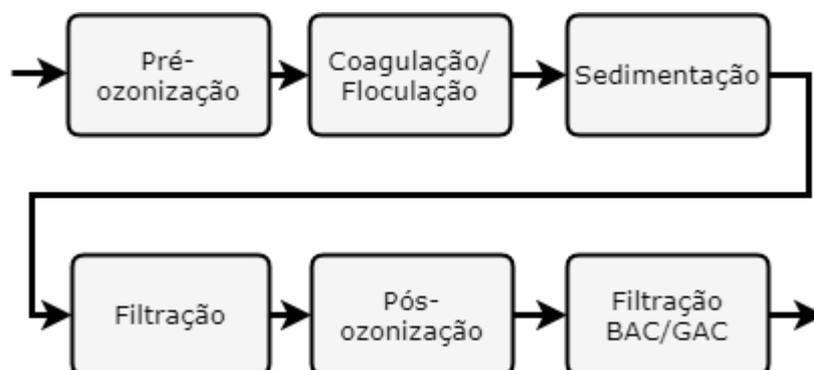
O estudo avalia também a remoção de odores e PFCs, a pós-ozonização apresentou um desempenho ligeiramente melhor na remoção de odores, já na remoção de PFCs nenhuma das duas abordagens foi eficiente. Por fim, o estudo avaliou a formação de bromato, o qual é uma substância cancerígena, e, de acordo com Wang e colaboradores (2014), é gerado em função da dosagem de ozônio aplicada. O composto não foi formado quando aplicada apenas pré-ozonização, nem mesmo com dosagens maiores de ozônio, entretanto, ao aplicar pós-ozonização, aproximadamente 6,0 e 14 mg/L foram formados quando aplicadas as dosagens de 2,0 e 3,0 mg/L de ozônio, respectivamente.

4.3 Tratamento de água por ozonização: proposta de tratamento para a cidade de Porto Alegre

Através dos estudos avaliados no item 4.2 pode-se perceber a alta eficiência do processo de ozonização aplicado ao sistema de tratamento de água, principalmente na remoção de fármacos. Tendo isso em vista, a aplicação do processo de ozonização ao tratamento de água na cidade de Porto Alegre traria benefícios frente ao processo já realizado, considerando a presença de contaminantes emergentes na água bruta captada do lago Guaíba, conforme os dados expostos na Tabela 1, e as evidências de que o processo convencional de tratamento de água não é capaz de removê-los.

Com base nos resultados obtidos nos estudos detalhados no item 4.2, os quais apresentam processos mais semelhantes ao processo de tratamento de água realizado no Brasil, é proposto o processo apresentado na Figura 13 para o tratamento de água em Porto Alegre.

Figura 13: Processo de tratamento de água proposto para aplicação na cidade de Porto Alegre



Fonte: Autor

Este processo envolve, primeiramente, uma etapa de pré-ozonização, seguida das etapas convencionais do tratamento de água do Brasil, coagulação, floculação e filtração, sendo esta última seguida de pós-ozonização e filtração GAC. De acordo com Borrul e colaboradores (2021) e Lin e colaboradores (2016), o processo de pré-ozonização aliado à pós-ozonização apresenta alta eficiência, tendo em vista que a pós-ozonização consegue reduzir ou eliminar contaminantes remanescentes da pré-ozonização, aumentando a eficácia do tratamento de água.

Ainda, levando em consideração os contaminantes presentes na Tabela 1, há 4 contaminantes em comum no estudo realizado por Lin e colaboradores (2016), sendo eles: atenolol, cafeína, sulfametoxazol, trimetoprima. A remoção alcançada ao final da pós-ozonização alcançou os valores de 100% para o atenolol, 61,7% para a cafeína, 50,34% para o sulfametoxazol e 55,2 % para o trimetoprima. Os outros estudos não abordaram contaminantes em comum com a água de Porto Alegre, com exceção da cafeína, a qual está presente em todos os estudos abordados. Este fator evidencia a necessidade de um estudo quanto à eficiência da remoção dos contaminantes presentes na água local através da ozonização.

Os estudos apontam que um ponto de atenção quanto ao uso de ozonização está relacionado à formação de subprodutos da reação de oxidação. Yang e colaboradores abordaram a formação de bromato, a qual, segundo Wang e colaboradores (2014), varia em função da dosagem de ozônio aplicada, logo, deveria ser estudada a dosagem ideal de ozônio a ser aplicada, para evitar a formação de bromatos.

Segundo Yang e colaboradores (2017) a filtração com carvão ativado pode ser uma solução para a formação de bromato, ainda, Miao e colaboradores (2015) sugerem também a utilização de carvão ativado para a remoção de subprodutos do processo de ozonização, com isso, na última etapa descrita na Figura 13, é proposto o processo de filtração com adição de carvão biológico ativado (GAC/BAC).

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

No decorrer deste estudo avaliou-se a ozonização aplicada em processos de tratamento de água visando a remoção de contaminantes emergentes. Com base nos resultados obtidos, é possível verificar que a ozonização pode estar presente em diferentes etapas do processo de tratamento de água, pré-ozonização, ozonização intermediária e pós-ozonização, ou até mesmo, em mais de uma etapa. A degradação completa ou parcial dos contaminantes avaliados foi alcançada, evidenciando a eficiência da técnica aplicada.

Considerando os artigos abordados no item 4.2, pode-se observar que a ozonização é aplicada em processos muito semelhantes às configurações do processo convencional de tratamento de água realizado no Brasil e apresenta alta eficiência quanto à remoção de contaminantes emergentes, atestando desta forma que a ozonização seria um processo eficaz se aplicado em Porto Alegre. Com base nos resultados obtidos nos artigos abordados neste item, foi elaborada uma proposta de aplicação de ozonização no tratamento de água de Porto Alegre, tendo como base as configurações utilizadas nos processos e a eficiência alcançada.

Para trabalhos futuros é proposto:

- Análise de todos os parâmetros operacionais não avaliados no presente estudo, assim como o tempo de contato ideal visando a remoção dos contaminantes presentes na água de Porto Alegre;
- Avaliação da combinação de ozonização com outras técnicas de tratamento avançado;
- Estudo da viabilidade econômica de aplicação do processo, tendo em vista o alto custo envolvido;
- Estudo experimental para complementar os resultados obtidos no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: Desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 115–122, 2013.
- ALVARENGA, J. A. Avaliação da formação de subprodutos da cloração em água para consumo humano. p. 101, 2010.
- ANA. **Usos da água — Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/usos-da-agua>>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- ANA. **Panorama do Saneamento no Brasil — Português (Brasil)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/saneamento-basico/a-ana-e-o-saneamento/panorama-do-saneamento-no-brasil-1>>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- BAI, X.; LUTZ, A.; CARROLL, R.; KETELES, K.; DAHLIN, K.; MURPHY, M.; NGUYEN, D. Occurrence, distribution, and seasonality of emerging contaminants in urban watersheds. **Chemosphere**, v. 200, n. February, p. 133–142, 2018.
- BITTENCOURT, C.; PAULA CO-AUTOR, M. A. S. DE. **Tratamento de água e efluentes: fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos**. 1 ed. ed. São Paulo – SP: Érica, 2014.
- BORRULL, J.; COLOM, A.; FABREGAS, J.; BORRULL, F.; POCURULL, E. Presence, behaviour and removal of selected organic micropollutants through drinking water treatment. **Chemosphere**, p. 130023, 22 fev. 2021.
- BOTERO, W. G.; SANTOS, A. DOS; OLIVEIRA, L. C. DE; ROCHA, J. C. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2018–2022, 2009.
- CEVS - RS. **ANEXO XX DA PORTARIA DE CONSOLIDAÇÃO Nº 5 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE, DE 28 DE SETEMBRO DE 2017**. Disponível em: <<https://www.cevs.rs.gov.br/upload/arquivos/202006/10140757-anexo-xx-28-de-setembro-1.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- CHOY, S. Y.; PRASAD, K. M. N.; WU, T. Y.; RAGHUNANDAN, M. E.; RAMANAN, R. N. Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 26, n. 11, p. 2178–2189, 2014.
- DA CRUZ, L. H.; HENNING, F. G.; DOS SANTOS, A. B.; PERALTA-ZAMORA, P. Photocatalytic degradation of sulfametoxazole, trimethoprim and diclofenac in aqueous solutions. **Química Nova**, v. 33, n. 6, p. 1270–1274, 2010.
- DE ARAÚJO, K. S.; ANTONELLI, R.; GAYDECZKA, B.; GRANATO, A. C.; MALPASS, G. R. P. Processos oxidativos avançados: Uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de

águas residuais urbanas e efluentes industriais. **Revista Ambiente e Água**, v. 11, n. 2, p. 387–401, 2016.

FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de água : concepção, projeto e operação de estações de tratamento**, 2017. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788595153851>>

FRANCISCO, A.; POHLMANN, P.; FERREIRA, M. Tratamento Convencional de Águas para Abastecimento Humano: Uma Abordagem Teórica dos Processos Envolvidos e dos Indicadores de Referência. **II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, n. 1, p. 1–9, 2011.

GOGOI, A.; MAZUMDER, P.; TYAGI, V. K.; TUSHARA CHAMINDA, G. G.; AN, A. K.; KUMAR, M. Occurrence and fate of emerging contaminants in water environment: A review. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 6, n. January, p. 169–180, 2018.

HOMEM, V.; SANTOS, L. Degradation and removal methods of antibiotics from aqueous matrices - A review. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 10, p. 2304–2347, 2011.

HOWE, KERRY J., HAND, DAVID W., CRITTENDEN, JOHN C., TRUSSELL, R. RHODES, TCHOBANOGLIOUS, G. **Princípios de tratamento de água**. São Paulo – SP: Cengage Learning, 2016.

JIANG, J. Q. The role of coagulation in water treatment. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 8, p. 36–44, 2015.

LIN, T.; YU, S.; CHEN, W. Occurrence, removal and risk assessment of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP) around Taihu Lake in China. **Chemosphere**, v. 152, p. 1–9, 2016.

MACHADO, K. C.; GRASSI, M. T.; VIDAL, C.; PESCARA, I. C.; JARDIM W. F.; FERNANDES, A. N.; SODRÉ, F. F.; ALMEIDA, F. V.; SANTANA, J. S.; CANELA, M. C.; NUNES, C. R. O.; BICHINHO, K. M.; SEVERO, F. J. R. A preliminary nationwide survey of the presence of emerging contaminants in drinking and source waters in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 572, p. 138-146, 2016.

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

MATILAINEN, A.; VEPSÄLÄINEN, M.; SILLANPÄÄ, M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 159, n. 2, p. 189–197, 2010.

MIAO, H. F.; ZHU, X. W.; XU, D. Y.; LU, M. F.; HUANG, Z. X.; REN, H. Y.; RUAN, W. Q. Transformation of aminopyrine during ozonation: Characteristics and pathways. **Chemical Engineering Journal**, v. 279, p. 156–165, 2015.

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: Cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Química Nova**, v. 40, n. 9, p. 1094–1110, 2017.

MURAKAMI, M. F. **Avaliação do desempenho de uma unidade em escala real para tratamento de água pluvial empregando a filtração rápida por meio de filtro de pressão e amido natural de milho como coagulante primário.** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2011.

O2 ENGENHARIA. **O2 Engenharia.** Disponível em: <<http://o2engenharia.com.br/index.php/atuacao/projetos>>. Acesso em: 28 out. 2020.

PAINEL SANEAMENTO. **Painel Saneamento Brasil - Indicadores.** Disponível em: <<https://www.painelsaneamento.org.br/localidade?id=431490>>. Acesso em: 8 out. 2020.

PESCARA, I. C. **Ocorrência e remoção de contaminantes emergentes por tratamentos convencionais de água e esgoto.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2014.

PREFEITURA DE PORTO ALEGRE. **Prefeitura de Porto Alegre - DMAE.** Disponível em: <<http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/>>. Acesso em: 5 out. 2020.

PUCKOWSKI, A.; MIODUSZEWSKA, K.; ŁUKASZEWICZ, P.; BORECKA, M.; CABAN, M.; MASZKOWSKA, J.; STEPNOWSKI, P. Bioaccumulation and analytics of pharmaceutical residues in the environment: A review. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, v. 127, p. 232–255, 2016.

QUERO-PASTOR, M.; VALENZUELA, A.; QUIROGA, J. M.; ACEVEDO, A. Degradation of drugs in water with advanced oxidation processes and ozone. **Journal of Environmental Management**, v. 137, p. 197–203, 2014.

RONCALLI, A. G.; NORO, L. R. A.; CURY, J. A.; ZILBOVICIUS, C.; PINHEIRO, H. H. C.; ELY, H. C.; NARVAI, P. C.; FRAZÃO, P. Fluoretação da água no Brasil: distribuição regional e acurácia das informações sobre vigilância em municípios com mais de 50 mil habitantes. **Cadernos de saúde pública**, v. 35, n. 6, p. e00250118, 2019.

SHIN, S.; YOON, H.; JANG, J. Polymer-encapsulated iron oxide nanoparticles as highly efficient Fenton catalysts. **Catalysis Communications**, v. 10, n. 2, p. 178–182, 15 nov. 2008.

SONG, Z.; ZHANG, X.; NGO, H. H.; GUO, W.; WEN, H.; LI, C. Occurrence, fate and health risk assessment of 10 common antibiotics in two drinking water plants with different treatment processes. **Science of the Total Environment**, v. 674, p. 316–326, 2019.

SOUZA, F. S.; FÉRIS, L. A. Degradation of caffeine by advanced oxidative processes: O₃ and o₃/UV. **Ozone: Science and Engineering**, v. 37, n. 4, p. 379–384, 2015.

TEIXEIRA, C. P. D. A. B.; JARDIM, W. D. F. Processos Oxidativos Avançados: conceitos teóricos. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2004, v. 3, 83 p. **Caderno Temático**, v. 03, p. 83, 2004.

THOMPSON, C. M.; DRAGO, J. A. North American installed water treatment ozone systems. **Journal - American Water Works Association**, v. 107, n. 10, p. 45–55, 2015.

ULLBERG, M.; LAVONEN, E.; KÖHLER, S. J.; GOLOVKO, O.; WIBERG, K. Pilot-scale removal of organic micropollutants and natural organic matter from drinking water using ozonation

followed by granular activated carbon. **Environmental Science: Water Research & Technology**, 2021.

UNIP - UNIVERSIDADE PAULISTA. **Capítulo 7 - Captação de águas superficiais**. Disponível em: <https://adm.online.unip.br/img_ead_dp/60905.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2021.

United States Environmental Protection Agency | US EPA. Disponível em: <<https://www.epa.gov/>>. Acesso em: 12 abr. 2021.

VERLICCHI, P.; AL AUKIDY, M.; ZAMBELLO, E. **What have we learned from worldwide experiences on the management and treatment of hospital effluent? - An overview and a discussion on perspectives** *Science of the Total Environment*, 2015.

WANG, Y.; YU, J.; ZHANG, D.; YANG, M. Addition of hydrogen peroxide for the simultaneous control of bromate and odor during advanced drinking water treatment using ozone. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 26, n. 3, p. 550–554, 2014.

YANG, K.; YU, J.; GUO, Q.; Wang, C.; Yang, M.; Zhang, Y.; Xia, P.; Zhang, D.; Yu, Z. Comparison of micropollutants' removal performance between pre-ozonation and post-ozonation using a pilot study. **Water Research**, v. 111, p. 147–153, 2017.

ZHANG, S.; GITUNGO, S.; AXE, L.; DYKSEN, J. E.; RACZKO, R. F. A pilot plant study using conventional and advanced water treatment processes: Evaluating removal efficiency of indicator compounds representative of pharmaceuticals and personal care products. **Water Research**, v. 105, p. 85–96, 2016.

ZHOU, G.; LIN, L.; LI, X. MEI, K.; LEUNG, Y. Removal of emerging contaminants from wastewater during chemically enhanced primary sedimentation and acidogenic sludge fermentation. **Water Research**, v. 175, p. 115646, 2020.

ZOUMPOULI, G. A.; SIQUEIRA SOUZA, F.; PETRIE, B.; FÉRIS, L. A.; KASPRZYK-HORDERN, B.; WENK, J. Simultaneous ozonation of 90 organic micropollutants including illicit drugs and their metabolites in different water matrices. **Environmental Science: Water Research and Technology**, v. 6, n. 9, p. 2465–2478, 2020.