



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO DE AQUICULTURA
CURSO ENGENHARIA DE AQUICULTURA**

Gustavo Leão Bueno

**Como evitar o acúmulo de geosmina e 2-metilisoborneol em peixes cultivados
em Sistemas de Recirculação Aquícola**

Florianópolis
2025

GUSTAVO LEÃO BUENO

Como evitar o acúmulo de geosmina e 2-metilisoborneol em peixes cultivados em Sistemas de Recirculação Aquícola

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Aquicultura do Centro ou Campus Florianópolis da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Aquicultura.

Orientadora: Dra. Katt Regina Lappa

Florianópolis
2025

Bueno, Gustavo Leão

Como evitar o acúmulo de geosmina e 2-metilisoborneol em peixes cultivados em Sistemas de Recirculação Aquícola / Gustavo Leão Bueno ; orientador, Katt Regina Lapa, 2025. 54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Graduação em Engenharia de Aquicultura, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Aquicultura. 2. "Off-flavor" em RAS. I. Lapa, Katt Regina. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Aquicultura. III. Título.

Gustavo Leão Bueno

Como evitar o acúmulo de geosmina e 2-metilisoborneol em peixes cultivados em Sistemas de Recirculação Aquícola

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Aquicultura e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Aquicultura.

Florianópolis, 26 de junho de 2025.



Coordenação do Curso

Banca examinadora

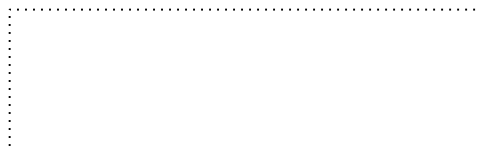


Dra. Katt Regina Lapa

Orientadora



MSc Bruno Augusto Amato Borges
Universidade Federal de Santa Catarina



Dr. Sunshine Avila

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2025.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha gratidão a Deus, por sua bondade infinita, misericórdia e fidelidade comigo. Ele é a minha fonte de força, alegria e paz, pois sem ele, nada do que conquistei teria sido possível. Agradeço aos meus pais, que, tornaram tudo que já fiz possível e pelo apoio incondicional, incentivo e paciência durante todos os momentos de desafio e dedicação a este projeto e a minha graduação. Ao meu irmão e aos demais familiares, meu muito obrigado pelo apoio e pela compreensão ao longo dessa jornada. Agradeço à Prof.^a Dra. Katt R. Lapa pela valiosa orientação e pelo incentivo na criação de novas ideias. À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Centro de Ciências Agrárias, agradeço o ensino de excelência e por fornecerem as ferramentas necessárias para o desenvolvimento de trabalhos que beneficiam a sociedade. E por fim, mas não menos importante, agradeço aos professores e colegas do curso, que enriqueceram minha jornada acadêmica com debates, trocas de experiências e incentivo mútuo.

RESUMO

Nos últimos anos, diversas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de desenvolver tecnologias eficazes para mitigar ou eliminar compostos que causam "off-flavor" em Sistemas de Recirculação Aquícola e nos peixes cultivados nesses sistemas. Esses compostos, 2- metilisoborneol e geosmina, são responsáveis por odores e sabores descritos como terrosos, barrocos ou mofados. Estes são conhecidos por sua resistência aos métodos convencionais de desinfecção e tratamento de água. Esta monografia apresenta uma revisão da literatura técnica e científica no qual foram identificadas as estratégias e sistemas eficientes empregados em escala comercial, assim como métodos promissores em desenvolvimento para a remoção dessas substâncias. As abordagens discutidas incluem: 1) Absorção com carvão ativado e ciclodextrinas; 2) Degradação induzida por processos oxidativos avançados; 3) Eletro oxidação; e 4) Depuração. A eletro oxidação mostrou-se como a tecnologia mais promissora para remoção eficiente de 2- metilisoborneol e geosmina, enquanto estratégias integradas também podem proporcionar resultados bons se aplicados juntamente com pré-tratamento para a remoção de matéria orgânica da água.

Palavras-chave: 2-methylisoborneol, geosmina, mitigar, eliminar, "off-flavor", Sistemas de Recirculação Aquícola.

ABSTRACT

In recent years, numerous studies have been conducted with the aim of developing effective technologies to mitigate or eliminate "off-flavor" compounds in Recirculating Aquaculture Systems and in fish cultivated in these systems. These compounds, 2-methylisoborneol and geosmin responsible for odors and flavors described as earthy, musty, or muddy are known for their resistance to conventional water disinfection and treatment methods. This literature review presents efficient strategies and systems currently employed on a commercial scale, as well as promising methods under development for the treatment of these substances, along with the most innovative and efficient technologies developed for this purpose. The approaches discussed include: 1) Adsorption with activated carbon and cyclodextrins; 2) Degradation induced by advanced oxidative processes; 3) Electrooxidation; and 4) Depuration. Electro-oxidation emerges as the most promising technology for the efficient removal of off-flavor, while integrated strategies can also provide good results if applied alongside pretreatment for the removal of organic matter from water.

Keywords: 2-methylisoborneol, geosmin, mitigate, eliminate, "off-flavor", Recirculating Aquaculture Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da geosmina (esquerda) e de 2-methylisoborneol (direita).....	12
Figura 2 – Perda de biomassa de Salmão Atlântico em 14 dias de depuração e sua influência sobre a conversão alimentar	15
Figura 3 – Tempo extra necessário para atingir 5kg de Salmão Atlântico com a depuração	15
Figura 4 – Esquema de funcionamento de um RAS com Sistema de eletro oxidação da biofishency.	20
Figura 5 – ELOXIRAS Hybrid-3000	21
Figura 6 – ELOXIRAS Mini-150.....	21
Figura 7 – Gerador de ozônio empresa Mat Filtration Technologies.....	23
Figura 8 – Gerador de ozônio empresa Guangzhou Chuanghuan Ozone Electrical Equipment	24
Figura 9 – Formação de radicais de hidroxila e moléculas oxidantes	27
Figura 10 – Ultratron	28
Figura 11 – UV MAT LSS	29
Figura 12 – Mark III-30 da Exciton Clean	31
Figura 13 – Exiton 8000 da Exciton Clean	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Br	Brometo
CDs	Ciclodextrinas
ClO	Hipoclorito
CL	Íons de cloreto
eAOP	<i>“Exciton Advanced Oxidation Process”</i>
GEO	Geosmina
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
HClO	Ácido hipocloroso
MIB	2-methylisoborneol
NAT	Nitrogênio Amoniacal Total
NH ₃ /NH ₄	Amônia tóxica
N ₂	Gás nitrogênio
OF	<i>“Off-Flavor”</i>
OH	Hidroxila
OOH	Hidroperóxidos
O ₃	Ozônio
RAS	Sistemas de Recirculação Aquícola
TiO ₂	Dióxido de titânio
UV	Ultravioleta
VUV	Radiação ultravioleta a vácuo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVOS.....	11
1.1.1	Objetivo geral.....	11
1.1.2	Objetivos específicos.....	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	DEFINIÇÃO DE “OFF-FLAVOR”.....	12
2.2	COMO SE ACUMULAM NO SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO AQUÍCOLAS E NOS PEIXES CULTIVADOS NESSES SISTEMAS?...	13
2.3	PROBLEMAS RELACIONADOS À PRESENÇA DE “OFF-FLAVOR” EM PEIXES COMERCIALIZADOS COM ORIGEM DE SISTEMAS DE RECIRCULAÇÃO AQUÍCOLA.....	13
3	MATERIAIS E MÉTODOS	16
4	TÉCNICAS UTILIZADAS PARA A REMOÇÃO DE “OFF-FLAVOR” ...	17
4.1	PROCESSOS DE ELETRÓLISE.....	17
4.2	OZONIZAÇÃO.....	21
4.3	PROCESSOS DE OXIDAÇÃO AVANÇADA.....	24
4.3.1	Combinação de UV/H₂O₂, UV/O₃ e UV/TiO₂ para a maior formação de radicais de OH.....	25
4.3.2	Ozonização + H₂O₂.....	29
4.3.3	Tecnologia “exciton advanced oxidation process” (eAOP).....	30
4.4	ABSORÇÃO.....	32
4.4.1	Carvão ativado.....	32
4.4.2	Ciclodextrinas.....	33
4.5	DEPURAÇÃO.....	35
5	DISCUSSÃO.....	37
5.1	SÍNTESE CRÍTICA DE TECNOLOGIAS PARA A REMOÇÃO DE COMPOSTOS OFF-FLAVOR EM RAS: CONTRIBUIÇÕES A PARTIR DA LEITURA	41
	CONCLUSÃO.....	45
	REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2024), em sua publicação “O Estado Mundial da Pesca e Aquicultura, 2024”, a produção global de animais aquáticos atingiu um recorde histórico em 2022, alcançando 185 milhões de toneladas. Esse valor representa um aumento de 4% em relação a 2020, com 94 milhões de toneladas provenientes da aquicultura, o equivalente a 51% do total, ultrapassando pela primeira vez na história a quantidade de peixes capturados na natureza.

Esse crescimento ocorre em um contexto de crescente demanda por pescado e declínio dos estoques naturais de peixes em decorrência da pesca excessiva. Nesse cenário, a aquicultura tem ganhado importância estratégica no suprimento alimentar global (FAO, 2024). No entanto, a aquicultura tradicional, baseada em tanques-rede ou tanques escavados, enfrenta desafios significativos, como a alta demanda hídrica, os danos ambientais causados pela atividade e a falta de controle sobre fatores ambientais, o que prejudica a saúde dos animais e reduz as taxas de sobrevivência dos organismos mantidos em cultivo (Summerfelt *et al.*, 2008; Ahmed; Turchini, 2021).

Como alternativa, os Sistemas de Recirculação Aquícola (RAS, do inglês Recirculating Aquaculture Systems) têm se destacado. Esses sistemas permitem economia de 90% a 99% no uso de água e ocupando menos de 1% da área necessária para a aquicultura tradicional, facilitam o tratamento adequado de resíduos e não dependem da proximidade de grandes volumes de água de captação (Timmons *et al.*, 2018; Ahmed; Turchini, 2021). Além disso, os RAS apresentam baixo impacto ambiental e permitem um controle preciso dos fatores ambientais de produção, melhorando a saúde, a sobrevivência, as taxas de crescimento e a biossegurança dos animais cultivados (Timmons *et al.*, 2018; FAO, 2024).

No entanto, a intensificação da produção e a recirculação de água em RAS traz uma desvantagem significativa: o acúmulo de compostos “*off-flavor*” (OF) no sistema e, conseqüentemente, nos peixes (Noguera *et al.*, 2024). Esses compostos, responsáveis por odores e sabores indesejáveis, descritos como terrosos, barrocos ou mofados, podem levar à rejeição do pescado pelos consumidores, reduzindo sua

comercialização e depreciando seu valor de mercado, gerando impactos econômicos negativos para as fazendas que utilizam esse sistema (Noguera *et al.*, 2024).

Apesar dos avanços tecnológicos, a persistência de OF em RAS revela uma lacuna entre as soluções existentes e as necessidades da indústria, especialmente em relação à escalabilidade e custo-efetividade. Diante dessas questões, o presente trabalho de conclusão de curso busca sistematizar o conhecimento atual, destacando tanto técnicas consolidadas quanto abordagens emergentes para propor direcionamentos futuros que garantam a qualidade do pescado sem comprometer a viabilidade econômica dos sistemas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar, através de uma revisão multidisciplinar da literatura, os métodos e tecnologias mais eficientes existentes e também os em desenvolvimento para a mitigar, remover e eliminar o “*off-flavor*” de sistemas de recirculação em aquicultura.

1.1.2 Objetivos específicos

Analisar o que são compostos “*off-flavor*” e como se acumulam nos sistemas de recirculação aquícola e nos peixes cultivados nesses sistemas;

Investigar quais são os problemas relacionados à presença de “*off-flavor*” em peixes comercializados com origem de RAS;

Explorar as estratégias e tecnologias existentes utilizadas para a mitigação, remoção e eliminação desses compostos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

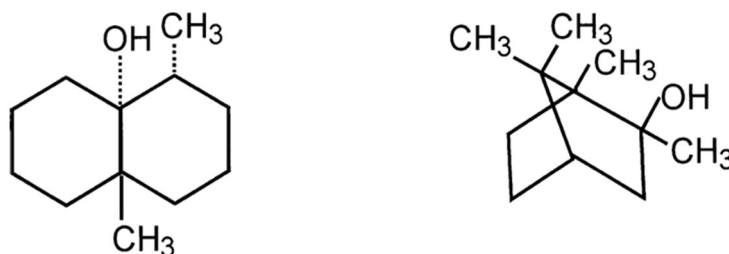
2.1 DEFINIÇÃO DE “OFF-FLAVOR”

Os compostos “*off-flavor*” ou apenas OF são substâncias lipofílicas formadas como subprodutos do metabolismo bacteriano (Lindholm-Lehto; Vielma, 2018). Esses compostos são voláteis e conferem características indesejáveis de odor e sabor a água e aos peixes. Na aquicultura, os compostos OF mais comuns são a Geosmina (GEO) (Figura 1, esquerda) e o 2- metilisoborneol (MIB) (Figura 1, direita), ambos metabólitos altamente odoríferos, com sabores e aromas descritos como terrosos ou de barro, produzidos por microrganismos aquáticos (Tucker, 2000).

Quimicamente, GEO e MIB, pertencem à mesma categoria, sendo classificados como álcoois terciários bicíclicos. Esses compostos são notáveis por sua capacidade de emitir odores perceptíveis mesmo em soluções aquosas extremamente diluídas (Souza; Mathies; Fiovaranzo, 2012).

A produção dessas substâncias está associada a elevadas populações de cianobactérias e actinomicetos presentes nos tanques de cultivo. Dentre as cianobactérias, os principais gêneros envolvidos são *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Planktothrix* e *Oscillatoria*. Já entre os actinomicetos, destacam-se os gêneros *Actinoplanes*, *Micromonospora*, *Rhodococcus*, *Streptomyces*, *Thermoactinomyces* e *Nodularia* (Biato, 2005; Persson, 1995, apud Tucker, 2000).

Figura 1 – Estrutura da geosmina (esquerda) e de 2-methylisoborneol (direita)



Fonte: Tucker, 2000.

2.2 COMO SE ACUMULAM NO SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO AQUÍCOLAS E NOS PEIXES CULTIVADOS NESSES SISTEMAS?

A presença de compostos OF em RAS está diretamente relacionada à proliferação de cianobactérias e actinomicetos em ambientes aquáticos com elevados e desequilibrados níveis de nutrientes (Zhou *et al.*, 2024). Fatores como temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, concentração de nutrientes e vazão influenciam a produção desses compostos, uma vez que afetam a qualidade da água e, conseqüentemente, as espécies de microrganismos presentes no sistema que podem ou não produzir compostos OF, dependendo das condições ambientais (Zhou *et al.*, 2024).

Esses compostos são sintetizados principalmente por microrganismos presentes no biofilme, que se forma nas paredes dos tanques, dos filtros mecânicos e biológicos, e em outras unidades de tratamento de água (Noguera *et al.*, 2024). Além disso, os compostos OF são resistentes aos métodos convencionais de tratamento e esterilização da água, o que leva ao seu acúmulo nos sistemas de recirculação aquícola devido ao alto grau de reuso da água durante o crescimento dos animais (Klausen; Grønborg, 2010). Uma vez presente no sistema, esses compostos químicos podem ser absorvidos pelos peixes por meio do trato gastrointestinal, da pele e das brânquias, entrando rapidamente na corrente sanguínea e posteriormente, acumulam-se no tecido muscular e, principalmente, no tecido adiposo dos peixes devido à sua natureza lipofílica (Noguera *et al.*, 2024).

2.3 PROBLEMAS RELACIONADOS À PRESENÇA DE “OFF-FLAVOR” EM PEIXES COMERCIALIZADOS COM ORIGEM DE SISTEMAS DE RECIRCULAÇÃO AQUÍCOLA

O peixe é cada vez mais valorizado pelo seu valor nutricional, oferecendo uma fonte rica em proteínas, ácidos graxos poli-insaturados, vitaminas e outros nutrientes essenciais. Além disso, o sabor característico do peixe é frequentemente um fator decisivo que influencia a preferência dos consumidores (Liu *et al.*, 2024). Dessa forma, a ocorrência de OF nos peixes é um dos principais desafios enfrentados pela produção

em Sistemas de Recirculação Aquícola (RAS) em todo o mundo. Estes compostos afetam diretamente o sabor do pescado, levando à rejeição por parte dos consumidores e, conseqüentemente, a uma redução significativa na comercialização e no valor de mercado do produto (Noguera *et al.*, 2024). Esse cenário gera prejuízos financeiros para as fazendas que utilizam esse tipo de sistema (Noguera *et al.*, 2024).

Segundo a publicação da *Reviews in Aquaculture* “More than just geosmin and 2-methylisoborneol? Off-flavours associated with recirculating aquaculture systems.”, em 2015 somente na União Européia mais de 8 milhões de Euros foram perdidos por conta da presença de OF no pescado. Além disso, no cultivo de *catfish* em viveiros escavados nos Estados Unidos, estima-se que, em 1998, tenham sido gastos entre US\$ 10 e 60 milhões em decorrência da presença de OF nos peixes (Tucker, 2000). Corrigidos pela inflação, esses valores correspondem, em 2024, a um montante entre US\$ 19 e 116 milhões.

Apesar dos avanços na aquicultura, o problema persistente de OF continua representando um desafio significativo para a indústria (Liu *et al.*, 2024). Atualmente, o sistema de depuração é o método mais utilizado na indústria para eliminar ou reduzir compostos OF dos peixes cultivados em RAS (Davidson *et al.*, 2014; Burr *et al.*, 2012), mas a eliminação de GSM e MIB em peixes geralmente é mais lenta do que a absorção, e a taxa de eliminação é reduzida à medida que a temperatura da água diminui (Kropp *et al.*, 2022). O processo de depuração funciona através da interrupção da recirculação de água, alterando para um sistema de fluxo constante, evitando assim a água rica em GEO e MIB do sistema de tratamento (Schram *et al.*, 2020). Ao mesmo tempo, é feita a interrupção da alimentação dos peixes com o propósito de queimar suas reservas de gordura, ricas em OF (Asher *et al.*, 2024). Durante o processo de depuração normalmente utiliza-se de 3-10 vezes mais água do que um RAS normal, levando de 7-14 dias e causando um aumento do custo de produção entre 5-12% (Asher *et al.*, 2024), como pode ser observado nas figuras 2 e 3. Vale ressaltar que a qualidade do pescado é impactada negativamente durante esse processo de jejum por conta da perda de valor nutricional (Liu *et al.*, 2024)

Associando este contexto com a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias alternativas a depuração, o presente trabalho irá abordar sobre as

estratégias e sistemas atualmente empregados em escala comercial, assim como métodos promissores em desenvolvimento para a remoção de OF.

Figura 2 – Perda de biomassa de Salmão Atlântico em 14 dias de depuração e sua influência sobre a conversão alimentar

Dias de depuração	Perda de peso %	Conversão alimentar	Produção tonelada/ano
14	7,40%	1,27	1000
10	4,30%	1,18	1058
4	2,40%	1,13	1097
0	0	1,1	1151

Fonte: Adaptado de Asher *et al.*, 2024.

Figura 3 – Tempo extra necessário para atingir 5kg de Salmão Atlântico com a depuração

	Engorda		Período de depuração		Total
	Período pós smoltificação	Peso alvo	Período de depuração	Tamanho de mercado (pós depuração)	Duração até o mercado
Unidades	dia	g	dia	g	dia
14 dias de depuração	494	5400	14	5000	508
10 dias de depuração	475	5225	10	5000	485
4 dias de depuração	464	5125	4	5000	468
Abordagem sugerida	450	5000	0	5000	450

Fonte: Adaptado de Asher *et al.*, 2024.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração desta revisão bibliográfica, foram realizadas buscas, a análise e a organização de fontes bibliográficas, com o objetivo de reunir informações a partir de literaturas técnicas e científicas já publicadas. O processo foi conduzido da seguinte forma:

Seleção das fontes: Foram selecionados artigos, livros e outras publicações científicas que abordam as tecnologias e estratégias atualmente disponíveis para a mitigação, remoção e eliminação de compostos causadores de OF em Sistemas de Recirculação em Aquicultura. A escolha das fontes foi baseada na relevância para o tema, priorizando publicações recentes que tratam dos compostos responsáveis pelo OF na aquicultura de forma isolada e em sistemas de tratamento de água.

Busca e análise das fontes: A coleta das fontes foi realizada por meio de bases de dados acadêmicos, Google Acadêmico e Science Direct, utilizando os seguintes descritores: “off-flavor”, “RAS”, “aquaculture”, “geosmin”, “2-methylisoborneol”, “MIB”, “GEO”, “Geosmina” e “Sistemas de Recirculação Aquícola” totalizando 4460 artigos encontrados. As fontes foram submetidas a uma análise crítica, considerando aspectos como metodologia, resultados e contribuições para o tema em questão.

Organização das informações: Após a seleção e análise das fontes, os dados foram agrupados por temas recorrentes, como novas tecnologias e estratégias para a remoção de OF em sistemas de recirculação aquícola RAS. As informações foram sintetizadas para construir a base teórica do TCC, destacando lacunas na literatura e propondo novas direções para futuras pesquisas sobre o tema.

Elaboração da análise: A revisão foi estruturada de forma a discutir as principais abordagens para a remoção de compostos *off-flavor* em RAS, integrando diferentes estudos e destacando as implicações práticas das estratégias adotadas.

4 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA A REMOÇÃO DE “OFF-FLAVOR”

4.1 PROCESSOS DE ELETRÓLISE

Os processos de eletrólise em RAS com água salgada ou salobra representam uma abordagem inovadora para a remoção simultânea de amônia e desinfecção da água, aproveitando o conteúdo natural de cloretos da água do mar para impulsionar reações eletroquímicas (figura 4). O mecanismo envolve a passagem de corrente elétrica pela água, oxidando, no anodo, íons cloreto (Cl), naturalmente presentes na água, para gerar espécies de cloro ativo (HClO, ClO). Além das espécies de cloro ativo, a eletrólise da água pode resultar na formação de outros agentes oxidantes, por exemplo, espécies reativas de oxigênio como OH (hidroxila) e O₃ (ozônio) podem ser formadas (Asher; Gendel; Lahav, 2023). Essas espécies atuam de forma dupla, eliminando patógenos por meio de uma desinfecção eficiente e oxidando a amônia tóxica (NH₃/NH₄⁺) diretamente em gás nitrogênio (N₂), evitando assim o seu acúmulo no sistema (Asher; Lahav, 2016). Esse processo utiliza da salinidade natural da água do mar como fonte dos cloretos necessários para as reações, eliminando a necessidade de aditivos químicos externos. É importante destacar que manter o pH ácido é essencial para o bom funcionamento do sistema, pois, nessas condições predomina a formação de HClO (ácido hipocloroso), que é mais eficiente na desinfecção da água, do que de ClO⁻ (hipoclorito) predominante em pH básico. Além disso, em pH ácido predomina a formação de NH₄⁺ (menos tóxico) ao em vez de NH₃ (Lahav; Asher; Gendel, 2015; Asher; Lahav, 2016; Asher; Gendel; Lahav, 2023).

Como essa abordagem de tratamento de água consiste em uma desinfecção inerentemente agressiva, ela reduz toda a carga microbiana no meio aquoso, incluindo os microrganismos responsáveis pela produção de compostos que causam OF. Além disso, durante o processo de eletrólise da água compostos OF são diretamente eletro-oxidados (Lahav; Asher; Gendel, 2015) e, ao mesmo tempo, os radicais de OH e Cl que se formam, degradam GEO e MIB de forma eficiente na água, sendo demonstrado que ambos os compostos OF podem ser retirados da água em somente um ciclo de tratamento (Asher *et al.*, 2024). Esse mesmo mecanismo mostrou-se eficaz na

remoção de OF em menos de uma semana mesmo na presença de matéria orgânica e sem interromper a alimentação dos peixes, evitando perda de massa corporal (Asher *et al.*, 2024). Um regime alimentar regular resulta em alta excreção de amônia pelos peixes, levando, assim, a uma maior eficiência do sistema. Esse aumento na eficiência da eletro oxidação da amônia resulta em uma remoção mais efetiva de compostos causadores de OF tanto do sistema quanto dos peixes, além de melhorar a desinfecção da água (Asher *et al.*, 2024). Além disso, alimentar peixes com acúmulo de compostos causadores de *off-flavor* acelera a taxa de depuração de GEO e MIB, pois aumenta o teor de lipídios no sangue, o metabolismo e a taxa de ventilação branquial, fatores que promovem uma eliminação mais rápida de OF (Howgate, 2004).

Contudo, é crucial considerar os desafios associados à formação de subprodutos. Além da formação de espécies de cloro ativo, pode ocorrer a formação de íons de brometo (Br^-). Isso acontece porque a água do mar contém naturalmente íons brometo, que são oxidados, formando espécies reativas de bromo, esses agentes também contribuem para a desinfecção e oxidação da amônia, porém a presença deles pode levar à formação de subprodutos indesejados, como bromato BrO_3^- (Asher; Lahav, 2019). É essencial remover as espécies reativas de cloro e bromo antes que atinjam concentrações tóxicas nos tanques de cultivo, uma vez que o cloro residual pode causar danos branquiais, estresse oxidativo e até mortalidade nos peixes, enquanto o bromato é considerado cancerígeno para animais e seres humanos (Powell; Scolding, 2016). Para isso o uso de um degaseificador para a remoção de CO_2 contribui de forma significativa para a eliminação de espécies de cloro ativo, Br, MIB e GEO por meio do processo de “*stripping*” (processo físico no qual compostos voláteis são transferidos da água para o ar através da aeração) (Asher *et al.*, 2024; Romano; Urriaga; Ortiz, 2020), reatores ultravioletas (UV) e carvão ativado (Powell; Scolding, 2016).

Os filtros biológicos de sistemas RAS tradicionais utilizam bactérias autotróficas para realizar a nitrificação, exigindo procedimentos demorados de inicialização e um longo período de recuperação em caso de falhas (Lahav; Asher; Gendel, 2015). Além disso, em climas frios (temperatura da água $<14^\circ\text{C}$), as taxas de nitrificação diminuem consideravelmente, exigindo reatores significativamente maiores para processar a mesma quantidade de amônia (Lahav; Asher; Gendel,

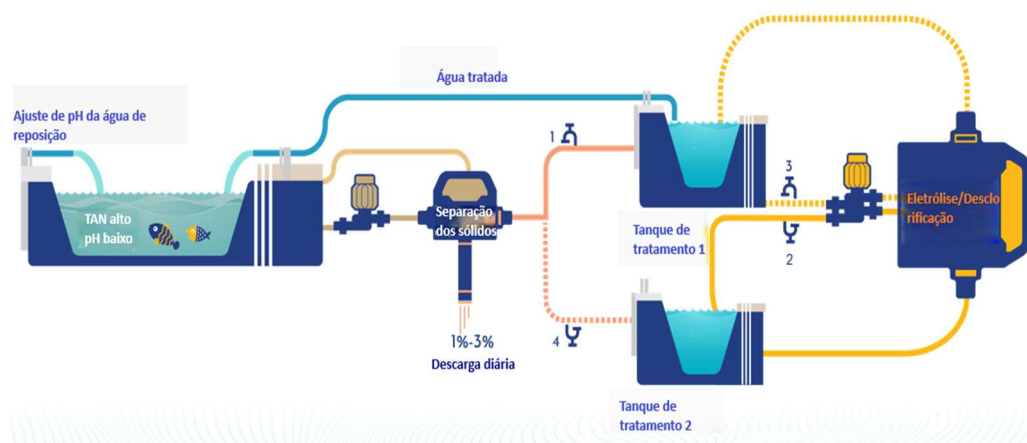
2015). Vale ressaltar também que o filtro biológico é considerado a principal fonte de GEO e MIB do Sistema RAS (Schram et al., 2020). Nessa linha de raciocínio, o mecanismo de oxidação eletrolítica demonstra diversas vantagens sobre o filtro biológico tradicional, sendo elas; 1) Menor sensibilidade a flutuações de temperatura e concentrações de Nitrogênio Amoniacal Total (NAT); 2) Não são necessários períodos de inicialização; 3) Não é necessária operação contínua, podendo o sistema ser ligado e desligado conforme necessário; 4) Não existe sensibilidade a ataques de predadores/doenças bacterianas (Gendel; Lahav, 2013). Além disso, demonstra potencial para eliminar a necessidade de ozonização e reatores UV, podendo também substituir totalmente os filtros biológicos em RAS, reduzindo significativamente a formação de compostos OF (Asher; Lahav, 2016). Do ponto de vista operacional, esse sistema apresenta características mais sustentáveis quando comparada ao RAS tradicional: necessitando apenas de 200 a 300 litros de água de reposição por quilo de peixe produzido (metade do volume de sistemas convencionais) e consome a mesma quantidade de energia que um RAS tradicional (Santos et al., 2022). Além disso, esse sistema demonstrou ser 2,2 vezes mais eficiente energeticamente em escala piloto do que sistemas comuns (Romano; Urtiaga; Ortiz, 2020). Outro ponto importante é que o filtro biológico gera perda de carga do sistema, aumentando a demanda por bombas mais potentes (Timmons et al., 2018). Além disso, a vazão necessária para a operação é sete vezes maior, e o volume total do reator, treze vezes superior ao de um reator de eletro-oxidação (Gendel; Lahav, 2013).

Esse sistema de eletro-oxidação pode ser utilizado de três maneiras diferentes em um sistema de recirculação aquícola, sendo elas; 1) Instalada como um componente adicional a qualquer unidade de depuração já existente, permitindo a realização da depuração durante a alimentação em condições de baixa ou nenhuma descarga de água; 2) Uma outra possível configuração utilizando essa tecnologia consiste em cultivar os peixes em um sistema de produção com filtros biológicos que alternam através de um sistema de válvulas para uma unidade de tratamento de água por eletro-oxidação no início do processo de depuração. Dessa maneira, os peixes permanecem no mesmo tanque de produção, evitando assim o manuseio estressante dos animais. Outra vantagem dessa configuração é sua capacidade de funcionar como um reforço emergencial ao principal sistema biológico de tratamento de água,

reduzindo eficientemente o NAT quando os filtros biológicos não funcionam adequadamente por qualquer motivo; 3) Em outra possível configuração, os peixes são cultivados em um RAS no qual o sistema de tratamento de água é baseado exclusivamente na abordagem eletroquímica. Nesse cenário, nenhuma purga é necessária, uma vez que não se espera a presença de concentrações de MIB ou GEO na água (Asher; Gendel; Lahav, 2023).

A empresa israelense “Biofishency” desenvolve, fabrica e comercializa soluções de tratamento de água eletroquímico para RAS, prometendo 40% a menos de custo de operação e 20% a menos de custo de instalação (figura 4) e a empresa espanhola “Apria Systems”, com o objetivo de resolver os problemas relacionados a OF em RAS desenvolveu sistemas de eletro-oxidação (figuras 5 e 6). Ambas as empresas garantem que podem substituir completamente os reatores biológicos, reatores ultravioletas e a ozonização com as suas respectivas tecnologias.

Figura 4 – Esquema de funcionamento de um RAS com Sistema de eletro oxidação da biofishency.



Fonte: <https://biofishency.com/>,

Figura 5 – ELOXIRAS Hybrid-3000



Fonte: <https://apriasystems.es/en/>.

Figura 6 – ELOXIRAS Mini-150



Fonte: <https://apriasystems.es/en/>.

4.2 OZONIZAÇÃO

A ozonização é utilizada em sistemas de recirculação aquícola como um método eficaz para a desinfecção, oxidação e microfloculação de matéria orgânica na água (Summerfelt *et al.*, 1997), melhorando conseqüentemente o desempenho do filtro biológico e do fracionador de espuma (Schroeder *et al.*, 2015). O ozônio (O_3) atua na decomposição dos compostos orgânicos e inorgânicos através de reações diretas - sendo atraído por substâncias que possuem grupos funcionais ricos em elétrons - e

por reações indiretas, nas quais se decompõe gerando radicais hidroxila. Esses mecanismos são particularmente eficazes na degradação nitrito, microrganismos patogênicos e compostos causadores de *off-flavor* (Schroeder *et al.*, 2015). Em meio líquido o ozônio é relativamente instável, decompondo-se facilmente na forma de oxigênio molecular, a sua estabilidade em solução aquosa aumenta com a redução da temperatura e a acidificação e a sua concentração na água é inversamente proporcional à temperatura e diretamente proporcional à quantidade de gás injetado. O O₃, é o segundo oxidante mais poderoso, sendo superado em seu potencial de oxidação apenas pelo flúor (Chiattonne, 2009).

Como o ozônio se decompõe rapidamente em oxigênio, ele precisa ser produzido no local (Zorzi *et al.*, 2023). A sua produção pode ser realizada principalmente por dois processos: a exposição do oxigênio a radiação ultravioleta com comprimento de onda de 185 nm ou por meio de descarga elétrica (Gonçalves; Gagnon, 2011). Portanto, a ruptura da ligação O-O, etapa essencial para a formação de O₃, demanda uma quantidade significativa de energia. No método de descarga elétrica uma corrente alternada de alta tensão é aplicada em um ambiente contendo oxigênio, causando a dissociação do gás oxigênio (O₂), e resultando em duas moléculas de oxigênio livre que reagem com outro oxigênio diatômico para formar a molécula triatômica de oxigênio, chamada de ozônio (Gonçalves; Gagnon, 2011). No método da radiação ultravioleta, os átomos de oxigênio liberados pela fotodissociação do O₂ sob ação da radiação UV de baixa energia reagem com o O₂ para produzir ozônio. O método de descarga elétrica, é o mais empregado devido à sua maior eficiência na geração de ozônio e menor custo operacional (Gonçalves; Gagnon, 2011).

A aplicação adequada do O₃ requer a consideração de quatro processos unitários: geração do gás ozônio, absorção gás-líquido, tempo de contato para reação e remoção do residual de ozônio (Powell; Scolding, 2016). Além disso, o monitoramento do ozônio tanto no estado gasoso quanto no aquoso é frequentemente necessário, pois o ozônio é tóxico para humanos e organismos aquáticos em quantidades baixas (Sander; Rosenthal, 1975). Na concentração normalmente aplicada em RAS (<1 µg L⁻¹ de água tratada), a ozonização apresenta eficácia limitada na remoção de GSM e MIB. Embora concentrações mais elevadas de ozônio possam

aumentar a eficiência do processo, elas também elevam significativamente a transformação de brometo á, mas é importante ressaltar que esses compostos podem ser removidos posteriormente por carvão ativado e radiação UV (Powell; Scolding, 2016). A baixa eficácia da ozonização na degradação de GSM e MIB deve-se à ausência de uma rota de reação direta a esses compostos, uma vez que eles possuem estrutura alifática e, portanto, carecem de grupos funcionais ricos em elétrons que possam ser atacados pelo ozônio (Zorzi *et al.*, 2023).

Além disso, esse método tem algumas limitações, sendo eles: 1) Alto consumo de eletricidade (Zorzi *et al.*, 2023); 2) Redução de eficiência por conta da presença de grandes concentrações de matéria orgânica na água que atuam como imãs dos radicais de hidroxila (Lei, 2020); 3) Alto custo e aumento do risco de prejudicar a saúde dos peixes e atrapalhar o desenvolvimento sadio do biofilme no sistema de filtração biológica (Gonçalves; Gagnon, 2011).

As empresas “*Guangzhou Chuanghuan Ozone Electrical Equipment*” e a “*Mat Filtration Technologies*”, desenvolveram geradores de O₃ específicos para aplicação em RAS (figuras 7 e 8) aptos a operar em ambientes úmidos e resistentes a corrosão.

Figura 7 – Gerador de ozônio empresa *Mat Filtration Technologies*



Fonte: <https://matlss.com/product/ozone-generators/>.

Figura 8 – Gerador de ozônio empresa *Guangzhou Chuanghuan Ozone Electrical Equipment*



Fonte: <https://ozonemachinefactory.com/collections/ozone-generator>.

4.3 PROCESSOS DE OXIDAÇÃO AVANÇADA

Um processo de oxidação que tem como principal agente o radical hidroxila é classificado como um processo de oxidação avançada. Esse radical possui um elevado potencial de oxidação (2,80 V), sendo um oxidante extremamente forte, porém com duração muito breve (Tang, 2004). Devido à sua alta reatividade, os radicais OH interagem com moléculas orgânicas por meio de três vias principais: remoção de hidrogênio, doação de elétrons e adição de grupos hidroxila (Tang, 2004). O radical de hidroxila age sobre os compostos dissolvidos, desencadeando uma sequência de reações oxidativas que podem resultar na completa mineralização dessas substâncias (Rosenfeldt *et al.*, 2006). Seu mecanismo de ação é inespecífico e eficaz em condições normais de temperatura e pressão (Rosenfeldt *et al.*, 2006). Os processos oxidativos avançados demonstraram resultados promissores na remoção de GSM e MIB em condições laboratoriais com água de sistemas de recirculação aquícola, embora sua eficácia seja reduzida em condições reais de RAS por conta da presença de matéria orgânica (Klausen; Grønborg, 2010).

Os processos de oxidação avançada podem ser realizados por meio da combinação de diferentes oxidantes como ozônio e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) com catalizadores como fótons de ultravioleta e metais de transição como titânio (Tang, 2004). A eficiência da oxidação depende de vários fatores, incluindo a

quantidade de radicais hidroxila, a disponibilidade de oxigênio, concentração dos poluentes e concentração da matéria orgânica na água, que atua como imã dos radicais de hidroxila (Zorzi *et al.*, 2023). No que diz respeito à formação de radicais, os parâmetros mais influentes são o pH, a temperatura, a quantidade de oxidante utilizado, a presença de íons, a natureza do contaminante e a existência de substâncias que possam inibir a reação (Zorzi *et al.*, 2023).

4.3.1 Combinação de UV/H₂O₂, UV/O₃ e UV/TiO₂ para a maior formação de radicais de OH

O ultravioleta, como método de desinfecção de água em RAS, é amplamente utilizado em praticamente todos os lugares do mundo. O princípio de funcionamento consiste no tratamento da água com radiação ultravioleta ao passar por um reator UV, fazendo com que os micro-organismos presentes nela morram ou percam a capacidade de se reproduzir (Bychkova *et al.*, 2020). Nesse método, ao mesmo tempo que ocorre a desinfecção, alguns compostos orgânicos absorvem a radiação UV diretamente, e esta energia causa a destruição das ligações químicas e, assim, do próprio contaminante, processo esse conhecido como fotólise, que depende da capacidade dos compostos de absorver o comprimento de onda da luz emitida, processo descrito pelo coeficiente de absorção molar (Rosenfeldt *et al.*, 2006).

Tanto a radiação UV-A quanto a UV-B tem o comprimento de onda acima de 254 nm, e os coeficientes de absorção molar de UV para GEO e MIB são baixos nesse espectro, aumentando somente em comprimentos de onda abaixo de 254nm. Isso significa que a GEO e MIB são resistentes à fotólise quando radiação UV-A e UV-B são utilizadas, isso porque sua estrutura não absorve o comprimento de onda dos reatores UV tradicionais com eficiência (Rosenfeldt; Melcher; Linden, 2005). Desse modo, a utilização de reatores UV tradicionais é ineficaz na eliminação de compostos OF da água.

Em contraste com a radiação UV usual, a radiação UV-C a vácuo (VUV), com comprimento de onda entre 200 e 100 nm, é mais eficaz na eliminação dos compostos causadores de gosto e odor no tratamento de água convencional (Zorzi *et al.*, 2023). Portanto o mecanismo que torna a VUV mais eficiente na eliminação de compostos

OF não é a fotólise direta desses compostos, mas sim a degradação indireta devido aos radicais OH formados. Isso ocorre pois sob radiação VUV, as moléculas de água dissociam-se em átomos de hidrogênio e radicais hidroxila, ou seja, ocorre formação de espécies oxidantes que são capazes de degradar MIB e GEO (Zorzi *et al.*, 2023). No entanto, esse método tem a desvantagem de causar a formação de nitrito na água (Kutschera; Börnick; Worch, 2009), algo que pode problematizar a sua utilização na aquicultura. Somado a isso a eficiência da VUV é afetada pela presença de matéria orgânica e turbidez na água. A presença de matéria orgânica afeta o processo por conta da competição com os poluentes-alvo que agem como sequestradores de OH, já a turbidez da água afeta esse processo por limitar a penetração da luz na água, limitando assim a capacidade de fotólise (Zorzi *et al.*, 2023).

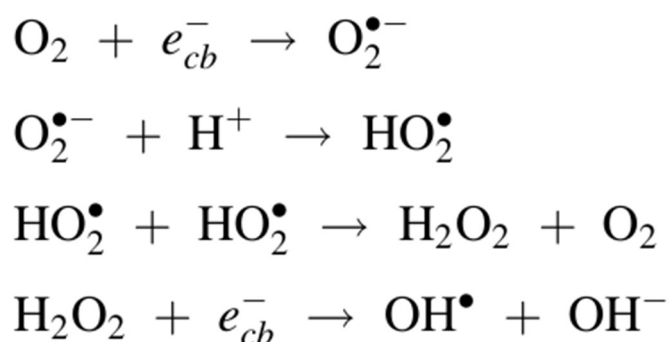
Por outro lado, a remoção de GSM e MIB pode ser melhorada combinando a luz UV com a adição de peróxido de hidrogênio ou ozônio, já que quando o H_2O_2 e O_3 absorvem a luz UV, eles se dissociam e formam radicais de OH, aumentando significativamente a velocidade de degradação dos compostos orgânicos (Rosenfeldt *et al.*, 2006; Klausen; Grønborg, 2010). A adição de peróxido de hidrogênio tem a vantagem da alta solubilidade do H_2O_2 em água, que pode ser adicionado à água de origem em altas concentrações, sem formação de bromato (Mustapha *et al.*, 2021), porém os processos de UV + H_2O_2 exigem fluências de UV (mJ cm^{-2}) significativamente maiores do que as normalmente utilizadas para desinfecção por UV tradicional (Rosenfeldt; Melcher; Linden, 2005). A eficiência desse método cresce proporcionalmente com a quantidade de H_2O_2 adicionada e com a temperatura e parâmetros de qualidade da água, como turbidez, afetam negativamente o tratamento por UV (Rosenfeldt; Melcher; Linden, 2005). No entanto, a adição de H_2O_2 não deve ser excessiva, pois o próprio H_2O_2 pode reagir rapidamente com o radical OH, consumindo e inativando os radicais OH livres e conseqüentemente prejudicando a degradação dos compostos orgânicos na água (Li; Huang; Wang, 2010).

H_2O_2 pode oxidar matéria orgânica, incluindo substâncias húmicas e biofilmes, transformando-os em compostos mais degradáveis. Ele se decompõe em água e oxigênio, seguindo uma cinética de primeira ordem. A decomposição do H_2O_2 depende, por exemplo, da intensidade da luz, da temperatura e da quantidade e tipo de matéria orgânica (Lindholm-Lehto; Kiuru; Hannelin, 2020). Já a combinação UV/ O_3

é ainda menos eficiente que UV/H₂O₂ (Klausen; Grønborg, 2010) e pode causar a formação de brometo na água (Powell; Scolding, 2016).

Outra forma para aprimorar o desempenho de reatores UV consiste em sua combinação com semicondutores, neste caso, o dióxido de titânio (TiO₂). Este material desempenha um papel crucial na produção de espécies reativas de oxigênio através do processo fotocatalítico, o mecanismo de ação ocorre quando a radiação UV excita os elétrons do TiO₂, promovendo-os para níveis energéticos superiores e gerando lacunas positivas na estrutura molecular (Pettit *et al.*, 2014). Esses pares elétron-lacuna desencadeiam reações químicas que produzem radicais hidroxila e outras moléculas altamente oxidantes (Lawton *et al.*, 2003) na superfície do semicondutor (Bamuza-Pemu *et al.*, 2012) conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Formação de radicais de hidroxila e moléculas oxidantes



Fonte: Pettit *et al.*, 2014.

A combinação de UV com TiO₂ apresenta vantagens significativas para a degradação de compostos orgânicos voláteis, principalmente devido ao aumento na produção de radicais hidroxila na superfície do semicondutor (Pettit *et al.*, 2014). Estudos demonstram que a fotocatalise com TiO₂ apresenta potencial significativo para a remoção rápida de compostos causadores de odor, como MIB e GEO. Em ensaios laboratoriais e em campo, mais de 99% desses compostos foram degradados em 60 minutos, utilizando um reator de fluxo contínuo modular, que permite fácil escalonamento para tratamento de grandes volumes (Lawton *et al.*, 2003).

Vale ressaltar que a presença de matéria orgânica na água reduz a eficácia da fotocatalise por duas razões principais: 1) essas substâncias competem com os

poluentes-alvo pelos sítios ativos do catalisador; e 2) absorvem parte da radiação UV, reduzindo sua disponibilidade para ativar o catalisador. Outro fator que influencia a eficácia do método é o pH, sendo que condições moderadamente ácidas potencializam a degradação do MIB (Pettit *et al.*, 2014). Esta característica é particularmente relevante em sistemas RAS, onde o processo de nitrificação reduz naturalmente a alcalinidade da água. O que significa que a implementação da fotocatalise após a etapa de nitrificação, mas antes da correção de pH, pode otimizar significativamente a remoção desses compostos odoríferos (Pettit *et al.*, 2014).

O catalisador de TiO_2 também pode ser aplicado na forma de pellets, resultando também em altas taxas de remoção de GSM e MIB, mas consumindo uma carga elevada de catalisador, no entanto, a aplicação deste método em RAS é problemática, pois nanopartículas residuais do catalisador podem potencialmente afetar a saúde dos peixes (Rodriguez *et al.*, 2019). Vale ressaltar também que muitos estudos devem ser feitos para a validação dessa tecnologia, já que até a data deste trabalho acadêmico nenhum estudo foi realizado em escala real (Rodriguez *et al.*, 2019).

A empresa “*Ultraaqua*”, e a “*Mat Filtration Technologies*” comercializam reatores UV, sendo os reatores das figuras 10 e 11 sistemas utilizados para a combinação de UV + H_2O_2 ou O_3 .

Figura 10 – *Ultratron*



Fonte: <https://ultraaqua.com/pt-br/>.

Figura 11 – UV MAT LSS



Fonte: <https://matlss.com/product/hdpe-uv-sterilizers/>.

4.3.2 Ozonização + H₂O₂

A combinação de O₃ e H₂O₂ reduz as concentrações dos compostos responsáveis pelo OF em sistemas de tratamento de água convencional (Li; Huang; Wang, 2010). Durante a ozonização, os contaminantes orgânicos são oxidados de duas maneiras. O próprio ozônio pode reagir diretamente com os químicos dissolvidos, sendo um oxidante altamente seletivo (Li; Huang; Wang, 2010). Além da oxidação direta, o ozônio decompõe-se através de um mecanismo de reação em cadeia para formar radicais OH, que por sua vez podem oxidar compostos OF (Li; Huang; Wang, 2010). Quando se adiciona peróxido de hidrogênio ao sistema de ozônio, a decomposição do O₃ em radicais OH é acelerada, essencialmente transformando todo o processo em um processo de oxidação avançada. Essa combinação aumenta a eficiência da degradação de OF em 50.5%, mas não eliminando-os completamente (Li; Huang; Wang, 2010).

O H₂O₂ apresenta maior seletividade para compostos causadores de OF em RAS em comparação com o O₃ e a adição de concentrações equimolares de peróxido de hidrogênio ao processo com ozônio aumenta a exigência de energia em 35%, em comparação com apenas O₃ (Pettersson *et al.*, 2022). Vale ressaltar que valor do pH da água é um fator importante que influencia o processo oxidativo avançado de compostos orgânicos. O aumento do pH em solução rica em ozônio ou H₂O₂ aumenta

significativamente a velocidade de geração e a quantidade de hidroperóxidos (OOH^-), e mantem a concentração de OH em um nível relativamente alto. A razão pela qual o pH tem grande influência no sistema $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ é que o pH pode afetar consideravelmente a degradação do O_3 na água e a geração de hidroxila (Li; Huang; Wang, 2010). Quando a solução tem um pH relativamente alto, o H_2O_2 se dissocia mais facilmente em OOH^- , o que promove a reação em cadeia que gera OH . No entanto, se o pH e a concentração dos diversos radicais livres gerados forem muito altos, a probabilidade de colisão mútua e extinção também aumenta (Li; Huang; Wang, 2010).

4.3.3 Tecnologia “exciton advanced oxidation process” (eAOP)

A tecnologia, chamada “*Exciton Advanced Oxidation Process*” (eAOP), desenvolvida pela empresa Exciton Clean (figura 12 e 13), funciona através da combinação de múltiplos mecanismos de oxidação avançada incluindo fotocatalise, fotólise por ultravioleta, eletrólise e processos oxidativos avançados com UV/oxidantes. A tecnologia central consiste em eletrodos fotoativos, criados a partir de um metal revestido com um fotocatalisador nanoestruturado proprietário. Esses fotoânodos são instalados em reatores que também contêm cátodos metálicos e UV germicidas. Quando o fotocatalisador é exposto à luz UV de 254 nm, os elétrons em sua banda de valência são excitados para a banda de condução, gerando elétrons altamente reativos e “lacunas de elétrons”. Essas lacunas agem como uma carga positiva móvel oxidando compostos químicos que entram em contato com a superfície do eletrodo, além de reagir com a água para produzir radicais hidroxila.

A eficiência desse processo fotocatalítico é ainda maior quando uma pequena tensão elétrica positiva é aplicada ao fotoânodo, pois isso reduz a recombinação dos elétrons e lacunas gerados pela luz. Se a água contiver íons cloreto, eles podem ser transformados em cloro por eletrólise, e esse cloro, ao ser exposto à luz UV, gera ainda mais radicais hidroxila diretamente na água. Além disso, dependendo da composição da água, o desempenho do sistema eAOP pode ser otimizado pela adição de ozônio, peróxido de hidrogênio ou outros oxidantes antes do reator (Kropp *et al.*, 2022).

Em testes sem peixes, o eAOP removeu quase completamente os compostos GSM e MIB de tanques em menos de duas horas. Um experimento de 10 dias com salmão-do-atlântico em tamanho de mercado comparou a depuração entre o método tradicional e o tratamento com eAOP. Nos peixes tratados com eAOP, a concentração de GSM nos filés diminuiu 60% mais rápido, e os peixes atingiram o sabor desejado em menos de 6 dias, contra 10 dias no método tradicional (Kropp *et al.*, 2022).

O eAOP reduz significativamente o tempo de depuração em RAS, economizando água e minimizando a perda de biomassa dos peixes. Estima-se que seu uso pode gerar uma economia de US\$ 0,12 a US\$ 0,22 por kg de salmão produzido. Essas economias têm impacto econômico positivo para produtores comerciais, além de benefícios ambientais e para o bem-estar dos peixes (Kropp *et al.*, 2022).

Dessa forma, o eAOP é uma tecnologia inovadora que combina múltiplos mecanismos de ação, incluindo fotocatalise, fotólise por UV, eletrólise e diferentes processos avançados de oxidação, tornando-o altamente eficaz no tratamento de água.

Figura 12 – Mark III-30 da Exciton Clean



Fonte: <https://excitonclean.com/aquaculture.php>.

Figura 13 – Exiton 8000 da Exciton Clean



Fonte: <https://excitonclean.com/aquaculture.php>.

4.4 ABSORÇÃO

4.4.1 Carvão ativado

De acordo com Kim *et al.* (2014), o carvão ativado é considerado a melhor forma atualmente existente e a mais praticada para a remoção de OF em estações de tratamento de água. O carvão ativado é uma substância carbonácea inerte com alta porosidade e área superficial interna, comportando-se como excelente adsorvente usado para purificar, desintoxicar, desodorizar, filtrar, descolorir, desclorificar e remover vários materiais líquidos e gasosos, podendo ser obtido de vários materiais com alto teor de carbono, como o osso, casca de coco, madeira e betume (Juliano *et al.*, 2010).

Sua estrutura porosa e grande área superficial (geralmente entre 500 e 1500 m²/g) permite a captura de moléculas orgânicas, como GEO e MIB, com taxas de remoção superiores a 70% por meio de adsorção (He *et al.*, 2016), principalmente através da adsorção física pela estrutura de poros e a carga superficial do carvão (Hepplewhite; Newcombe; Knappe, 2004). Existem duas formas principais de carvão ativado aplicáveis nesse contexto: o carvão ativado em pó e o carvão ativado granular. O carvão ativado em pó é adicionado diretamente à água, sendo útil para situações que demandam remoção rápida, como picos de contaminação, mas requer uma etapa posterior de filtração ou sedimentação para sua remoção (Juliano *et al.*, 2010). Já o carvão ativado granular é empregado em filtros de leito fixo, oferecendo maior durabilidade e a possibilidade de regeneração (Juliano *et al.*, 2010).

A adsorção por carvão ativado é o método mais utilizado, considerado simples e econômico para a remoção de micro poluentes, especialmente compostos hidrofóbicos, em estações de tratamento de água. A eficiência da remoção depende de fatores como tempo de contato (geralmente entre 10 e 30 minutos), dosagem (variando de 5 a 50 mg/L conforme a carga de contaminantes), pH (idealmente neutro, entre 6 e 8) e temperatura (com melhor desempenho em águas mais frias) (Matsui et al., 2015). A eficiência na remoção de micro poluentes pelo carvão ativado está relacionada às propriedades do carvão: tamanho das partículas, estrutura interna dos poros (distribuição do tamanho dos poros) e química da superfície dos poros (grupos funcionais superficiais) (Matsui et al., 2015).

No entanto, a matéria orgânica dissolvida compete pelos sítios de adsorção, reduzindo a eficiência do processo, já que a matéria orgânica se encontra em muito maior quantidade do que os compostos OF (Juliano et., al 2010). A maior parte da competição entre matéria orgânica e compostos OF pode ser atribuída à semelhança de tamanho e estrutura ao composto alvo (Hepplewhite; Newcombe; Knappe, 2004).

Em um nível prático, um carvão ativado em pó com uma distribuição de tamanho de poros extremamente estreita, permitindo o acesso a compostos OF e acesso mínimo a matéria orgânica é difícil e, portanto, caro de fabricar, além de poder apresentar propriedades cinéticas muito ruins (Hepplewhite; Newcombe; Knappe, 2004). Um carvão ideal para a adsorção de OF teria uma distribuição de poros bimodal, com um alto volume de microporos primários (representando uma grande capacidade de adsorção) e um volume moderado de mesoporos (permitindo acesso rápido aos sítios de adsorção), minimizando ao mesmo tempo o bloqueio e a restrição de poros por matéria orgânica de baixo peso molecular (Hepplewhite; Newcombe; Knappe, 2004).

4.4.2 Ciclodextrinas

O carvão ativado tem sido frequentemente utilizado na adsorção de compostos OF. No entanto, observou-se que a remoção de GEO e MIB, especialmente em baixas concentrações, por carvão ativado não é eficiente, essa redução no desempenho pode ser atribuída à presença matéria orgânica natural

(Hepplewhite; Newcombe; Knappe, 2004). Conseqüentemente, isso torna o carvão ativado ineficaz na remoção dos compostos odoríferos. Em outras palavras, a matéria orgânica compromete significativamente a eficiência de adsorção do carvão ativado, resultando em altos custos no tratamento de água (Hepplewhite; Newcombe; Knappe, 2004). Outra desvantagem do carvão ativado é que ele perde sua eficácia de absorção uma vez saturado com umidade, o que faz com que os poluentes adsorvidos sejam liberados (Mamba *et al.*, 2009).

Tendo em vista as limitações do uso de carvão ativado, a ciclodextrina foi desenvolvida para contornar essas limitações e buscar remover eficazmente compostos OF. As ciclodextrinas (CDs) são oligossacarídeos cíclicos, formados por moléculas de D-glicose unidas por ligações glicosídicas produzidos a partir da degradação enzimática do amido pela ação da *Bacillus-macerans* (Mamba *et al.*, 2007).

Uma característica física notável das CDs é sua cavidade central, que fornece um sítio excelente para moléculas hidrofóbicas, como MIB e GEO (Mamba *et al.*, 2007). A cavidade da ciclodextrina é formada por unidades de glicose ligadas por átomos de oxigênio glicosídicos, enquanto a superfície externa é revestida por grupos hidroxila primários de um lado e grupos hidroxila secundários do outro. A cavidade interna é apolar em relação à superfície externa. Essa cavidade fornece um microambiente no qual compostos apolares de tamanho adequado podem entrar e formar complexos de inclusão com a ciclodextrina. A remoção de poluentes orgânicos da água ocorre por meio da formação de complexos de inclusão (Mamba *et al.*, 2009). A molécula de ciclodextrina encapsula a molécula orgânica, resultando na formação de um complexo. No entanto, as CDs são altamente solúveis em água, o que limita sua aplicação na remoção de poluentes orgânicos da água (Mamba *et al.*, 2014). Para torná-las insolúveis, elas são convertidas em polímeros reticulados por meio da polimerização do monômero de ciclodextrina com agentes de ligação bifuncionais, possibilitando assim o seu uso em ambientes aquáticos (Mamba *et al.*, 2007; Mamba *et al.*, 2009). O tratamento das amostras de água contaminadas com OF e repleta de matéria orgânica mostrou que os polímeros absorveram até 90% em experimentos em laboratório (Mamba *et al.*, 2014).

Apesar de ser uma tecnologia promissora para remoção de OF, é importante ressaltar que nenhum dos estudos envolvendo CDs apresentados neste trabalho foram feitos com água vinda de RAS ou aquicultura, deixando uma lacuna aberta para futuros estudos sobre o tema.

4.5 DEPURAÇÃO

Para evitar danos econômicos resultantes da entrada de produtos pesqueiros contaminados de OF no mercado, os piscicultores utilizam a capacidade de eliminação natural dos peixes para purgar os sabores e odores desagradáveis dos animais, mantendo-os em tanques de fluxo constante contendo água limpa pouco antes da despesca (Schram et al., 2020).

Atualmente o sistema de depuração é o método mais utilizado na indústria para eliminar ou reduzir compostos OF dos peixes cultivados em RAS (Davidson et al., 2014, Burr et al., 2012). O método de depuração funciona interrompendo a recirculação da água, substituindo-a por um sistema de fluxo contínuo, o que impede a entrada de água com presença de GEO e MIB no sistema de tratamento e conseqüentemente o impede o seu contato com os animais cultivados no sistema (Schram et al., 2020).

Ao mesmo tempo existem algumas complicações relacionadas a utilização dessa técnica, sendo elas; 1) O processo de depuração nem sempre é confiável. Seus resultados podem ser variáveis e imprevisíveis, e peixes com OF continuam a entrar no mercado (Schram et al., 2020); 2) A eliminação de GSM e MIB em peixes geralmente é mais lenta do que a absorção, levando a grandes períodos de depuração (Kropp et al., 2022); 3) Durante o processo de depuração normalmente utiliza-se de 3-10 vezes mais água do que um RAS normal, levando de 7-14 dias e causando um aumento do custo de produção entre 5-12% (Asher et al., 2024); 4) A alimentação dos peixes é suspensa com o objetivo de reduzir suas reservas de gordura, que contêm altas concentrações de OF (Asher et al., 2024), mas vale ressaltar que a qualidade do pescado é impactada negativamente durante esse processo de jejum por conta da perda de valor nutricional (Liu et al., 2024). Deve ser buscada a otimização da

depuração por meio de melhorias no tratamento da água durante a operação do RAS (Azaria; Van Rijn, 2018).

Nessa linha de raciocínio, existem formas de melhorar o desempenho da depuração de GEO e MIB em RAS. Sistemas com maior vazão causam o exercício forçado nos peixes, podendo reduzir o tempo necessário de depuração em até 60% (Schram *et al.*, 2016). Os efeitos do exercício na excreção de geosmina ocorrem principalmente através de dois mecanismos inter-relacionados. O exercício físico aumenta a demanda energética dos peixes, elevando conseqüentemente sua necessidade de oxigênio para manter o metabolismo aeróbico (Randall; Daxboeck, 1982). Essa maior exigência de oxigênio desencadeia uma série de adaptações fisiológicas que visam otimizar a captação branquial de oxigênio e sua distribuição pelo organismo (Randall; Holeyton; Stevens, 1967). Um dos principais efeitos é o aumento do fluxo de água sobre as brânquias, que ocorre paralelamente à elevação do batimento cardíaco durante a atividade física. Essas mudanças resultam em maior pressão sanguínea, que por sua vez melhora a perfusão das lamelas secundárias das brânquias (Randall; Daxboeck, 1982). O fluxo sanguíneo torna-se mais uniforme e as lamelas mais rígidas, resultando em uma significativa ampliação da capacidade de difusão branquial e captação de oxigênio (Randall; Holeyton; Stevens, 1967). Como as brânquias representam a principal via de absorção de compostos lipofílicos nos peixes, esse princípio também se aplica aos processos de excreção (Randall; Daxboeck, 1982). A absorção de compostos lipofílicos está diretamente relacionada ao aumento do consumo de oxigênio induzido pelo exercício. Estudos abrangentes com diversas espécies de peixes e compostos lipofílicos confirmam que a taxa de excreção aumenta proporcionalmente ao consumo de oxigênio, estabelecendo uma relação direta entre atividade física e eliminação dessas substâncias (Schram *et al.*, 2016).

5 DISCUSSÃO

A presença de compostos OF em peixes cultivados é um dos grandes problemas econômicos enfrentados atualmente pela aquicultura continental (Vallod *et al.*, 2007, Robin *et al.*, 2006), e a produção de peixes com sabores e odores desagradáveis em RAS tem sido cada vez mais relatada em estudos recentes. Esses sistemas de reuso de água, frequentemente operados com altas densidades de peixes e filtros microbiológicos altamente povoados, são propensos ao desenvolvimento de bactérias produtoras de GEO e MIB. Sabe-se que produção de compostos OF na aquicultura é influenciada por diversos fatores ambientais, que podem aumentar ou diminuir sua concentração. Compreender esses fatores é crucial para desenvolver estratégias de eliminação desses compostos (Lukanssen *et al.*, 2017). Trabalhos científicos realizados nos últimos anos vêm demonstrando que o acúmulo de sólidos orgânicos, NAT e fosfato em RAS estimulam o crescimento de microrganismos produtores de OF (Poddaturi *et al.*, 2025; Rurangwa; Verdegem, 2014; Auffret *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2008). Ao mesmo tempo entende-se que a limpeza dos filtros biológicos e unidades de desnitrificação causam grandes liberações de GEO e MIB no sistema, sendo importante desviar os fluxos de lavagem para fora do RAS ou evitar a limpeza do sistema próximo da despesca para evitar esse problema (Poddaturi *et al.*, 2019). Embora nos últimos anos novas descobertas sobre as fontes de produção desses compostos em RAS tenham sido feitas, ainda faltam dados sobre as condições que favorecem ou suprimem a síntese desses metabólitos secundários (Azaria; Van Rijn, 2018).

De acordo com os estudos abordados neste trabalho, existem diversos métodos, cada um com mecanismos e aplicações específicas, para a remoção de GEO e MIB da água, mas a maioria desses métodos não são eficientes em RAS pois são afetados pela presença de matéria orgânica que acumula no sistema. Vale ressaltar também que a maior parte dos estudos sobre a remoção ou mitigação de compostos OF foram feitos em escala piloto e ainda não tem comprovação prática em escala comercial (Lindholm-Lehto; Kiuru; Hannelin, 2020).

Dentro das tecnologias apresentadas neste trabalho, a eletrooxidação surge como a alternativa mais promissora, particularmente em sistemas de água salgada e

salobra, utilizando a corrente elétrica para gerar radicais de OH e oxidar íons cloreto presentes na água, gerando compostos de cloro ativo que não apenas desinfetam, mas também eliminam amônia tóxica, transformando-a diretamente em gás nitrogênio (Asher *et al.*, 2024). Sua capacidade de remover geosmina e 2-metilisoborneol em um único ciclo de tratamento, associada à redução da dependência de filtros biológicos, principal fonte de produção de OF, justifica seu crescente interesse comercial. No entanto, a necessidade de controle rigoroso do pH e o risco de formação de subprodutos como cloraminas exigem sistemas de monitoramento contínuo (Asher *et al.*, 2024).

A ozonização, embora amplamente utilizada para desinfecção em RAS, demonstra eficácia limitada na remoção direta dos compostos causadores de OF quando aplicada em concentrações normais e seguras (Zorzi *et al.*, 2023). Seu mecanismo de ação indireto, através da geração de radicais hidroxila, é frequentemente comprometido pela presença de matéria orgânica dissolvida, que compete pelos sítios de reação de GEO e MIB (Zorzi *et al.*, 2023). Embora melhore a qualidade da água, a potencial formação de bromato em concentrações elevadas impõe restrições operacionais que devem ser cuidadosamente consideradas (Zorzi *et al.*, 2023).

Os processos de oxidação avançada combinam diferentes agentes oxidantes, como ozônio e peróxido de hidrogênio, com UV ou catalisadores para gerar radicais hidroxila, capazes de degradar os compostos responsáveis pelos compostos OF. Dependendo da técnica utilizada, particularmente as combinações UV/H₂O₂ e fotocatalise com TiO₂, apresentam os melhores índices de remoção em condições controladas, superando 90% de eficiência (Lawton *et al.*, 2003). No entanto o bom funcionamento destas tecnologias está atrelado a qualidade de água, no qual a presença de matéria orgânica e turbidez pode comprometer o desempenho e tornar o processo mais caro (Zorzi *et al.*, 2023). Uma alternativa inovadora dentro dos processos de oxidação avançada é o eAOP, que funciona através da combinação de múltiplos mecanismos de oxidação avançada incluindo fotocatalise, fotólise por ultravioleta, eletrólise e processos oxidativos avançados com UV/oxidantes para gerar radicais de OH e oxidar compostos OF (Kropp *et al.*, 2022). Esse método reduz significativamente o tempo de depuração (60%) dos peixes e permite economia de

água e energia, viabilizando sua aplicação em larga escala, mas, mesmo assim não solucionando o problema por completo (Kropp *et al.*, 2022).

O uso de carvão ativado também é uma técnica relevante, pois seus poros permitem a adsorção dos compostos causadores de OF (Hepplewhite *et al.*, 2004). Ele pode ser utilizado na forma de pó para remoção rápida ou granular em filtros de leito fixo. No entanto, sua simplicidade operacional é contrabalançada pela redução progressiva de eficiência devido ao bloqueio dos poros por matéria orgânica, além dos custos elevados para reposição frequente em sistemas de grande porte (Juliano *et al.*, 2010).

As ciclodextrinas emergem como uma alternativa promissora ao carvão ativado, especialmente em sistemas com alta carga de matéria orgânica. Esses oligossacarídeos cíclicos formam complexos de inclusão com moléculas hidrofóbicas como GEO e MIB, encapsulando-as em sua cavidade apolar. Estudos demonstram que polímeros de ciclodextrina reticulada podem adsorver até 90% de compostos OF na água, mesmo na presença de matéria orgânica dissolvida (Mamba *et al.*, 2014). Essa eficiência se deve à seletividade estrutural das CDs, que priorizam moléculas pequenas e voláteis como MIB e GEO, minimizando a competição por sítios ativos. Além disso, ao contrário do carvão ativado, as CDs não sofrem dessorção significativa quando saturadas, mantendo sua capacidade de remoção por mais tempo (Mamba *et al.*, 2007). No entanto, a aplicação prática em RAS ainda não foi comprovada ou testada. (Mamba *et al.*, 2009).

A depuração é uma estratégia mais tradicional, que consiste na interrupção da recirculação da água e no jejum dos peixes para que eles consumam as reservas de gordura que é o principal tecido onde os compostos responsáveis pelo OF se acumulam (Noguera *et al.*, 2024). Apesar de ser amplamente utilizada, esse processo pode levar de 7 a 14 dias, aumentando o consumo de água, afetando a qualidade final do pescado e aumentando o custo de produção (Noguera *et al.*, 2024). Algumas técnicas, como a indução de exercício nos peixes por meio do aumento da velocidade do fluxo de água e aumento da temperatura e oxigenação da água, podem acelerar a eliminação dos compostos OF dos peixes em até 60% (Schram *et al.*, 2020).

Cada uma dessas técnicas apresenta vantagens e desafios, e a escolha do método depende das características do sistema de recirculação, espécie cultivada e

dos objetivos produtivos, econômicos e ambientais. A análise comparativa revela que a solução ideal deve considerar três eixos principais ao mesmo tempo, atacando os compostos OF através da prevenção da produção microbiana, remoção contínua dos compostos da água e otimização dos processos de depuração.

Persistem, contudo, lacunas importantes no conhecimento, particularmente quanto aos mecanismos exatos de produção microbiana desses compostos em RAS e sua relação com parâmetros operacionais específicos. Investimentos em pesquisa aplicada são necessários para desenvolver tecnologias acessíveis e adaptáveis às diversas realidades na produção de peixes em RAS, especialmente na ampliação do uso de RAS nas produções brasileiras. A integração de sistemas de monitoramento em tempo real, associada a protocolos de tratamento dinâmicos, pode representar o próximo salto tecnológico no controle eficiente desse desafio que persiste na aquicultura moderna.

Os principais entraves na remoção de MIB e GEO de RAS é o acúmulo de matéria orgânica no sistema devido às limitações das tecnologias atuais (Fossmark et al., 2020). As partículas finas de matéria orgânica podem ser removidas através do uso de fracionadores de espuma, enquanto a fração solúvel permanece no sistema. A matéria orgânica é proveniente das excretas dos peixes, alimentos não consumidos e resíduos metabólicos microbianos, ela não só serve como substrato para a prospecção de microrganismos, incluindo os produtores de OF (Blancheton et al., 2013; Kovács *et al.*, 2023), mas também atrapalha a ação dos métodos de oxidação avançada e a utilização de carvão ativado (Hepplewhite et. al 2004; Klausen; Grønborg, 2010). A matéria orgânica dissolvida, composta por proteínas, carboidratos e ácidos húmicos, compete com os compostos OF pelos sítios ativos em processos de oxidação avançada ou também pelos poros de materiais adsorventes, como o carvão ativado. Como sua concentração é muito maior do que a dos compostos OF (Juliano et. al 2010), ela acaba consumindo os oxidantes ou bloqueando os espaços de adsorção, reduzindo drasticamente a eficiência desses métodos de tratamento.

Apesar dos muitos benefícios da produção de peixes em RAS, ainda existe um certo ceticismo em relação aos peixes provenientes deste sistema entre os consumidores, em parte devido à associação com sabores desagradáveis (Noguera *et al.*, 2024). Essa percepção negativa está diretamente ligada à presença de

compostos OF em sistemas de recirculação aquícola, que representam um desafio significativo para a aquicultura moderna, comprometendo não apenas a qualidade do produto, mas também gerando prejuízos econômicos significantes para os produtores.

As diversas estratégias de controle e remoção de OF em RAS podem ser compreendidas em três abordagens principais, sendo elas; 1) Prevenção da produção: evitar a acumulação de NAT, fosfato e sólidos orgânicos no sistema, evitando assim a proliferação de organismos produtores de OF; 2) Remoção da água: remover os compostos causadores de sabores e odores indesejados da água de cultivo, evitando a bioacumulação de OF nos peixes; 3) Remoção dos peixes: purgar os peixes antes da despesca evitando a venda de peixes com sabor alterado.

Em síntese, a solução ideal para o controle de OF em RAS deve considerar uma abordagem integrada, combinando prevenção, remoção contínua dos compostos da água e otimização dos processos de depuração. Estratégias preventivas, como o controle de nutrientes, remoção de matéria orgânica e a manipulação do metabolismo microbiano, são fundamentais para reduzir a produção de OF (Zhou *et al.*, 2024). Tendo isso em vista, o pré-tratamento antes da utilização de processo de oxidação avançada com o intuito de remover sólidos suspensos e matéria orgânica da água pode melhorar a performance de oxidação (Klausen; Grønberg, 2010).

Nessa linha de raciocínio, uma maneira de evitar o acúmulo de GEO e MIB em RAS seria combinando diversas tecnologias ao mesmo tempo, seguindo a mesma lógica de funcionamento do eAOP. A eficiência do sistema pode ser maximizada com unidades de pré-tratamento dedicadas à remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos, fosfato e NAT da água. Isso reduziria a competição por sítios de absorção no carvão ativado e por radicais hidroxila nos métodos de oxidação avançada, além de prevenir o acúmulo de substâncias que promovem a formação de compostos odoríferos no sistema.

5.1 SÍNTESE CRÍTICA DE TECNOLOGIAS PARA A REMOÇÃO DE COMPOSTOS OFF-FLAVOR EM RAS: CONTRIBUIÇÕES A PARTIR DA LEITURA

Um hipotético sistema poderia funcionar da seguinte forma: antes de tudo, as densidades de produção devem ser rigorosamente controladas e mantidas dentro dos

padrões estabelecidos no projeto para evitar o acúmulo de NAT, matéria orgânica e fosfato na água. Em relação ao tratamento, a água proveniente do reator biológico passaria por fracionadores de espuma combinados de ozonização (Kovács *et al.*, 2023) seguidos de sistemas de microfiltração para remover o máximo da matéria orgânica presente na água. Em seguida a água passaria por um reator UV/TiO₂ para oxidar os compostos OF e posteriormente por um processo intenso de aeração e degaseificação, assegurando que nenhum subproduto indesejado formado durante o tratamento seja reintroduzido no sistema. Por fim, um sistema de medição analisaria a concentração residual desses compostos após o tratamento. Caso necessário, seria possível aplicar H₂O₂ no reator UV/TiO₂ para aumentar a eficiência do processo ou, como última alternativa, adicionar carvão ativado em pó antes que a água retorne aos tanques de cultivo.

Em um cenário onde o sistema já esteja em operação e não exista flexibilidade orçamentária, é possível fazer ajustes ao sistema de produção, reduzindo as perdas relacionadas a presença de OF no pescado sem custos adicionais. Já que para reduzir significativamente o tempo necessário para a depuração em sistemas aquícolas, pode-se implementar um aumento controlado da vazão da água, induzindo assim um exercício forçado nos peixes durante a depuração (Randall; Daxboeck, 1982). Essa estratégia pode alcançar reduções de até 60% no período de depuração (Schram *et al.*, 2020). O mecanismo de ação baseia-se no fato de que a atividade física intensifica os processos fisiológicos relacionados à eliminação de compostos como GEO e MIB (Randall; Daxboeck, 1982). O exercício promove um incremento na demanda de oxigênio pelos peixes, decorrente da aceleração metabólica, o que por sua vez estimula uma maior eficiência na função branquial (Randall; Holeyton; Stevens, 1967). Esse processo é potencializado pela otimização da circulação nas brânquias, onde o aumento simultâneo do fluxo hídrico e da pressão sanguínea resulta em trocas gasosas mais eficazes (Randall; Daxboeck, 1982). Como as brânquias também atuam como principal via de excreção de substâncias lipofílicas, a elevação proporcional no consumo de oxigênio correlaciona-se diretamente com o incremento na taxa de depuração desses compostos.

Dentre as tecnologias analisadas, a eletro oxidação se destaca como o único método testado que de forma individual é capaz de eliminar GEO e MIB do sistema,

oferecendo versatilidade em diferentes configurações de RAS (Asher *et al.*, 2024). Funciona especialmente bem em sistemas de água salgada ou salobra, devido à sua capacidade de gerar radicais de OH e CL, gerando compostos ativos que desinfetam a água e eliminam amônia tóxica (Asher; Lahav, 2016). Além disso, esse método elimina a dependência de filtros biológicos, que são a principal fonte de produção de OF, e demonstra eficácia na remoção de GEO e MIB em um único ciclo de tratamento (Asher *et al.*, 2024). Ela pode ser integrada a sistemas existentes como complemento a unidades de depuração, atuar em conjunto com filtros biológicos convencionais ou mesmo substituí-los completamente os filtros biológicos reduzindo o tempo ou eliminando a necessidade de purgas (Asher; Gendel; Lahav, 2023). Contudo, esse processo exige rigoroso controle de pH, monitoramento e desgaseificação para evitar subprodutos indesejáveis, como cloraminas (Lahav; Asher; Gendel, 2015). A primeira possibilidade consiste em integrar o sistema como um complemento a unidades de depuração já existentes. Essa abordagem seria mais atrativa para sistemas que já estão em operação, já que grandes obras e reestruturações não seriam necessárias.

Nessa configuração a reposição de água na depuração não seria necessária, já que a tecnologia consegue manter água livre de NAT e OF. Uma segunda configuração possível seria a integração desta tecnologia com sistemas de produção que utilizam filtros biológicos convencionais. Nesse caso, a eletro oxidação atua como uma etapa adicional no tratamento, acionada por um sistema de válvulas que direciona a água para a unidade eletroquímica no início do processo de depuração. Essa alternativa evita a necessidade de transferir os peixes para os tanques de purga, reduzindo o estresse causado pelo manejo, já que a depuração seria feita nos próprios tanques de engorda (Asher; Gendel; Lahav, 2023). Além disso, o sistema funciona como um reserva eficiente em situações em que os filtros biológicos apresentam falhas, ajudando a controlar rapidamente os níveis de NAT e mantendo a qualidade da água (Asher; Gendel; Lahav, 2023). Por fim, a terceira configuração possível é um sistema de recirculação que opera exclusivamente com tratamento eletroquímico, eliminando a dependência de filtros biológicos tradicionais. Nesse modelo, não há necessidade de depuração, já que a tecnologia impede o acúmulo de compostos responsáveis por sabores e odores indesejados na água (Asher; Gendel; Lahav, 2023).

Outra possível forma de remover compostos OF de RAS é a utilização de ciclodextrinas. As CDs surgem como alternativa promissora ao carvão ativado para remoção eficiente de compostos odoríferos, superando suas limitações relacionadas à presença de compostos OF (Mamba *et al.*, 2009). Estas moléculas cíclicas, derivadas da degradação enzimática do amido pela bactéria *Bacillus macerans*, apresentam uma estrutura única com cavidade central hidrofóbica capaz de formar complexos de inclusão com moléculas apolares como MIB e GEO (Mamba *et al.*, 2007). Sua arquitetura molecular, composta por unidades de glicose com superfície externa hidrofílica e cavidade interna apolar, permite a encapsulação seletiva de contaminantes orgânicos (Mamba *et al.*, 2009). Entretanto, a alta solubilidade em água das CDs naturais levou a necessidade da polimerização com agentes de ligação bifuncionais, que mantêm a capacidade de complexação enquanto se tornam insolúveis (Mamba *et al.*, 2014). Estudos laboratoriais demonstraram eficiência de até 90% na remoção de OF, embora a ausência de pesquisas em RAS indique a necessidade de investigações adicionais para validar sua aplicabilidade nestes ambientes específicos (Mamba *et al.*, 2009).

Somente quando o problema relacionado a OF nos peixes for solucionado por todos os produtores de RAS será possível conquistar o público para consumir o pescado oriundo de RAS. Isso porque uma minoria da produção pode comprometer a reputação da indústria inteira. Por isso é de extrema importância garantir a qualidade do pescado produzido em RAS, superando as barreiras de aceitação do mercado e consolidando esses sistemas como uma alternativa sustentável e economicamente viável para a aquicultura.

6 CONCLUSÃO

Diante do exposto, o objetivo desta monografia foi atingido ao investigar os métodos e tecnologias mais eficientes existentes e os em desenvolvimento para a mitigação, remoção e eliminação de OF em RAS. A revisão sistemática das técnicas e tecnologias de remoção e mitigação desses compostos destacou métodos consolidados e abordagens emergentes, evidenciando suas vantagens, limitações e potencial de aplicação em escala comercial. Os métodos e tecnologias aqui apresentados são alguns dos mais recentes da literatura e estão em constante pesquisa para aperfeiçoamento em diversos países.

Dentre as tecnologias analisadas nesta monografia, concluiu-se que a eletro-oxidação se mostrou a alternativa inovadora mais promissora para aplicação futura em sistemas de recirculação aquícola intensiva no Brasil e no mundo, especialmente em água salobra ou salgada, devido à sua capacidade de remover GEO e MIB em um único ciclo de tratamento, reduzir a dependência de filtros biológicos e permitir a depuração com alimentação contínua, diminuindo perdas de biomassa e consumo de água. Embora outras estratégias, como o uso de carvão ativado, e processos de oxidação avançada (como UV/H₂O₂ UV/TiO₂), apresentem resultados promissores em laboratório, todas enfrentam limitações práticas em função da alta carga de matéria orgânica presente nos sistemas comerciais. Além disso, as ciclodextrinas demonstraram grande potencial de MIB e GEO, mas ainda não foram testadas em RAS. Assim, a combinação de pré-tratamento da água, controle rigoroso da matéria orgânica e tecnologias mais robustas como a eletro-oxidação, processos de oxidação avançada e ciclodextrinas podem representar, no futuro, uma solução viável, escalável e economicamente adaptável à realidade da aquicultura intensiva no Brasil.

REFERÊNCIAS

- AHMED, N.; TURCHINI, G. M. Recirculating aquaculture systems (RAS): Environmental solution and climate change adaptation. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 297, p. 126604, maio 2021.
- ASHER, R. B.; LAHAV, O. Electrooxidation for simultaneous ammonia control and disinfection in seawater recirculating aquaculture systems. **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 72-73, p. 77–87, maio/jul. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144860916300656>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- ASHER, R. B.; GENDEL, Y.; LAHAV, O. Electrochemical applications in RAS: a review. **Reviews in Aquaculture**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 86-105, 24 abr. 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/raq.12822>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- ASHER, R. B.; LAHAV, O. Minimization of THM formation in seawater-fed recirculating aquaculture systems operated with electrochemical NH₄⁺ removal. **Aquaculture**, [s. l.], v. 502, p. 162–175, mar. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848618316545>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- ASHER, R. B.; ZOHAR, Y.; STROMBERG, M.; LAHAV, O. A new approach for eliminating off-flavors from RAS fish, as part of the normal grow-out period. **Water Research**, [s. l.], v. 249, p. 121015, 1 fev. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135423014550>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- AUFFRET, M.; YERGEAU, É.; PILOTE, A.; PROULX, É.; PROULX, D.; GREER, C. W.; VANDENBERG, G.; VILLEMUR, R. Impact of water quality on the bacterial populations and off-flavours in recirculating aquaculture systems. **FEMS Microbiology Ecology**, [s. l.], v. 84, n. 2, p. 235–247, 8 jan. 2013.
- AZARIA, S.; VAN RIJN, J. Off-flavor compounds in recirculating aquaculture systems (RAS): production and removal processes. **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 83, p. 57–64, nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144860918301316>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- BURR, G. S.; WOLTERS, W. R.; SCHRADER, K. K.; SUMMERFELT, S. T. Impact of depuration of earthy-musty off-flavors on fillet quality of Atlantic salmon, *Salmo salar*, cultured in a recirculating aquaculture system. **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 50, p. 28–36, set. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860912000192>. Acesso em: 10 jul. 2025.

BYCHKOVA, L. I.; NIKIFOROV-NIKISHIN, D. L.; PONOMAREV, A. K.; BUGAEV, O. G. Evaluating the UV radiation effectiveness in industrial aquaculture. **IOP Conference Series Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 548, n. 4, p. 042046, 1 ago. 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/548/4/042046/meta>. Acesso em: 10 jul. 2025.

DAVIDSON, J.; SCHRADER, K.; RUAN, E.; SWIFT, B.; AALHUS, J.; JUÁREZ, M.; WOLTERS, W.; BURR, G.; GOOD, C.; SUMMERSENTIU, S. T. Evaluation of depuration procedures to mitigate the off-flavor compounds geosmin and 2-methylisoborneol from Atlantic salmon *Salmo salar* raised to market-size in recirculating aquaculture systems. **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 61, p. 27–34, 1 jul. 2014.

FAO. **The state of world fisheries and aquaculture 2024**: blue transformation in action. Estados Unidos: ONU, 2024.

GENDEL, Y.; LAHAV, O. A novel approach for ammonia removal from fresh-water recirculated aquaculture systems, comprising ion exchange and electrochemical regeneration. **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 52, p. 27–38, jan. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144860912000623>. Acesso em: 10 jul. 2025.

GONÇALVES, A. A.; GAGNON, G. A. Ozone Application in Recirculating Aquaculture System: An Overview. **Ozone: Science & Engineering**, [s. l.], v. 33, n. 5, p. 345–367, set. 2011. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01919512.2011.604595>. Acesso em: 10 jul. 2025.

HE, X.; LIU, Y. L. CONKLIN, A.; WESTRICK, J.; WEAVERS, L. K.; DIONYSIOU, D. D.; LENHART, J. J.; MOUSER, P. J.; SZLAG, D.; WALKER, H. W. Toxic cyanobacteria and drinking water: Impacts, detection, and treatment. **Harmful Algae**, [s. l.], v. 54, p. 174–193, abr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568988316300038>. Acesso em: 10 jul. 2025.

HEPPLEWHITE, C.; NEWCOMBE, G.; KNAPPE, D. R. U. NOM and MIB, who wins in the competition for activated carbon adsorption sites? **Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research**, Londres, v. 49, n. 9, p. 257–265, maio 2004. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/49/9/257/11334/NOM-and-MIB-who-wins-in-the-competition-for>. Acesso em: 10 jul. 2025.

HOWGATE, P. Tainting of farmed fish by geosmin and 2-methyl-iso-borneol: a review of sensory aspects and of uptake/depuration. **Aquaculture**, [s. l.], v. 234, n. 1-4, p. 155–181, maio 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848603006598>. Acesso em: 10 jul. 2025.

KIM, C.; LEE, S. I.; HWANG, S.; CHO, M.; KIM, H. S.; NOH, S. H. Removal of geosmin and 2-methylisoborneol (2-MIB) by membrane system combined with powdered activated carbon (PAC) for drinking water treatment. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], v. 4, p. 91–98, dez. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714414001081>. Acesso em: 10 jul. 2025.

KLAUSEN, M. M.; GRØNBORG, O. Pilot scale testing of advanced oxidation processes for degradation of geosmin and MIB in recirculated aquaculture. **Water Science & Technology Water Supply**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 227-225, 1 abr. 2010. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article-abstract/10/2/217/25034/Pilot-scale-testing-of-advanced-oxidation>. Acesso em: 10 jul. 2025.

KROPP, R.; SUMMERFELT, S. T.; WOOLEVER, K.; JOHNSON, S. A.; KAPSOS, D. W.; HAUGHEY, C.; BARRY, T. P. A novel advanced oxidation process (AOP) that rapidly removes geosmin and 2-methylisoborneol (MIB) from water and significantly reduces depuration times in Atlantic salmon *Salmo salar* RAS aquaculture. **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 97, p. 102240, maio 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144860922000164>. Acesso em: 10 jul. 2025.

KUTSCHERA, K.; BÖRNICK, H.; WORCH, E. Photoinitiated oxidation of geosmin and 2-methylisoborneol by irradiation with 254 nm and 185 nm UV light. **Water Research**, [s. l.], v. 43, n. 8, p. 2224–2232, 1 maio 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135409000931>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LAHAV, O.; ASHER, R. B.; GENDEL, Y. Potential applications of indirect electrochemical ammonia oxidation within the operation of freshwater and saline-water recirculating aquaculture systems. **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 65, p. 55–64, mar. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144860914001010>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LAWTON, L. A.; ROBERTSON, P. K. J.; ROBERTSON, R. F.; BRUCE, F. G. The destruction of 2-methylisoborneol and geosmin using titanium dioxide photocatalysis. **Applied Catalysis B: Environmental**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 9–13, 8 ago. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337303000055?via%3DiHub>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LEI, Y.; LEI, X.; WESTERHOFF, P.; ZHANG, X.; YANG, X. Reactivity of Chlorine Radicals (Cl• and Cl₂•-) with Dissolved Organic Matter and the Formation of Chlorinated Byproducts. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 55, n. 1, p. 689–699, 21 dez. 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.0c05596>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LI, X.; HUANG, Y.; WANG, D. Efficiency and Mechanism of Degradation of 2-Methylisoborneol(2-Mib) by O₃/H₂O₂ in Water. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOINFORMATICS AND BIOMEDICAL ENGINEERING*, 4., 2010, Chengdu.

Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 1 jun. 2010. p. 1–4. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5516282>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LINDHOLM-LEHTO, P. C.; VIELMA, J. Controlling of geosmin and 2-methylisoborneol induced off-flavours in recirculating aquaculture system farmed fish—A review. **Aquaculture Research**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 9–28, 30 out. 2018.

Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/are.13881>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LINDHOLM-LEHTO, P. C.; KIURU, T.; HANNELIN, P. Control of off-flavor compounds in a full-scale recirculating aquaculture system rearing rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. **Journal of Applied Aquaculture**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 469–488, 29 dez. 2020. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10454438.2020.1866733>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LIU, S.; GIRMA, B. T.; WANG, H.; YONG, Y. H.; QU, B.; ZHAO, H.; CHEN, S.; LIU, Y. Metabolic Pathways in Off-Flavor Mitigation within Recirculating Aquaculture Systems. **SSRN**, [s. l.], p. 1-23, 6 set. 2024. Disponível em:

https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4949062. Acesso em: 10 jul. 2025.

KOVÁCS, B. D.; JESUS, K. J.; RÜPPEL, F.; DANWITZ, A. V.; PEDERSEN, L. F. Evaluating protein skimmer performance in a commercial seawater recirculating aquaculture system (RAS). **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 103, p. 102369, 1 nov. 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860923000560>. Acesso em: 10 jul. 2025.

MAMBA, B. B.; KRAUSE, R. W.; MALEFETSE, T. J.; MHLANGA, S. D.; SITHOLE, S. P.; SALIPIRA, K. L.; NXUMALO, P. T. Removal of geosmin and 2-methylisoborneol (2-MIB) in water from Zuikerbosch Treatment Plant (Rand Water) using β -cyclodextrin polyurethanes. **Water SA**, [s. l.], v. 33, n. 2, abr. 2007. Disponível em:

<https://www.ajol.info/index.php/wsa/article/view/49066>. Acesso em: 10 jul. 2025.

MAMBA, B. B.; KRAUSE, R. W.; MALEFETSE, T. J.; SITHOLE, S. P.; NKAMBULE, T. I. Humic acid as a model for natural organic matter (NOM) in the removal of odorants from water by cyclodextrin polyurethanes. **Water SA**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 117-120, 1 jan. 2009. Disponível em:

<https://www.ajol.info/index.php/wsa/article/view/76648>. Acesso em: 10 jul. 2025.

MAMBA, B. B.; MALEFETSE, T. J.; SITHOLE, S. P.; NKAMBULE, T. I. Removal of geosmin and 2-MIB in the presence of humic acid using cyclodextrin polyurethanes. [S. n., s. l.], maio 2014.

MUSTAPHA, S.; TIJANI, J. O.; NDAMITSO, M. M.; ABDULKAREEM, A. S.; SHUAIB, D. T.; MOHAMMED, A. K. A critical review on geosmin and 2-methylisoborneol in water: sources, effects, detection, and removal techniques. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 193, n. 4, 22 mar. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-021-08980-9>. Acesso em: 10 jul. 2025.

NOGUERA, P. M.; EGIDDI, M.; SÖDERGREN, J.; SILVA, M. R.; BEAUCHAMP, J.; PETERSEN, M. A.; BUETTNER, A.; JØRGENSEN, N. O. G. More than just geosmin and 2-methylisoborneol? Off-flavours associated with recirculating aquaculture systems. **Reviews in Aquaculture**, [s. l.], v. 16, n. 19, 3 jul. 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/raq.12949>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PETTERSSON, S. J.; LINDHOLM-LEHTO, P. C.; PULKKINEN, J. T.; KIURU, T.; VIELMA, J. Effect of ozone and hydrogen peroxide on off-flavor compounds and water quality in a recirculating aquaculture system. **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 98, p. 102277, ago. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014486092200053X>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PETTIT, S. L.; RODRIGUEZ-GONZALEZ, L.; MICHAELS, J. T.; ALCANTAR, N. A.; ERGAS, S. J.; KUHN, J. N. Parameters Influencing the Photocatalytic Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol Utilizing Immobilized TiO₂. **Catalysis Letters**, [s. l.], v. 144, n. 8, p. 1460–1465, 4 jun. 2014.

PODDUTURI, R.; PETERSEN, M. A.; VESTERGAARD, M.; JØRGENSEN, N. O. G. Geosmin fluctuations and potential hotspots for elevated levels in recirculated aquaculture system (RAS): a case study from pikeperch (*Stizostedion lucioperca*) production in Denmark. **Aquaculture**, [s. l.], v. 514, p. 734501, 10 set. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848619315522>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PODDUTURI, R.; PETERSEN, M. A.; STOUGAARD, P.; JØRGENSEN, N. O. G. Seasonal fluctuations in geosmin and terpenes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in an outdoor commercial recirculated aquaculture system facility. **Fishes**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 80–80, 17 fev. 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2410-3888/10/2/80>. Acesso em: 10 jul. 2025.

POWELL, A.; SCOLDING, J. W. S. Direct application of ozone in aquaculture systems. **Reviews in Aquaculture**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 424–438, 1 ago. 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/raq.12169>. Acesso em: 10 jul. 2025.

RANDALL, D. J.; DAXBOECK, C. Cardiovascular changes in the rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson) during exercise. **Canadian Journal of Zoology**, [s. l.], v. 60, n. 5, p. 1135–1140, 1 maio 1982. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/z82-158>. Acesso em: 10 jul. 2025.

RANDALL, D. J.; HOLETON, G. F.; STEVENS, E. D. The exchange of oxygen and carbon dioxide across the gills of rainbow trout. **Journal of Experimental Biology**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 339–348, 1 abr. 1967. Disponível em: <https://journals.biologists.com/jeb/article-abstract/46/2/339/21204/The-Exchange-of-Oxygen-and-Carbon-Dioxide-Across>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ROBIN, J.; CRAVEDI, J. P.; HILLENWECK, A.; DESHAYES, C.; VALLOD, D. Off flavor characterization and origin in French trout farming. **Aquaculture**, [s. l.], v. 260, n. 1-4, p. 128–138, 1 set. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848606004480>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ROMANO, A.; URTIAGA, A. M.; ORTIZ, I. Optimized energy consumption in electrochemical-based regeneration of RAS water. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 240, p. 116638, jun. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586619358812>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ROSENFELDT, E. J.; LINDEN, K. G.; CANONICA, S.; VON GUNTEN, U. Comparison of the efficiency of •OH radical formation during ozonation and advanced oxidation processes O₃/H₂O₂ e UV/H₂O₂. **Water Research**, [s. l.], v. 40, n. 20, p. 3695-3704, dez. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135406005148>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ROSENFELDT, E. J.; MELCHER, B.; LINDEN, K. G. UV and UV/H₂O₂ treatment of methylisoborneol (MIB) and geosmin in water. **Journal of Water Supply: research and Technology-Aqua**, [s. l.], v. 54, n. 7, p. 423–434, nov. 2005. Disponível em: <https://iwaponline.com/aqua/article-abstract/54/7/423/30707/UV-and-UV-H2O2-treatment-of-methylisoborneol-MIB>. Acesso em: 10 jul. 2025.

RURANGWA, E.; VERDEGEM, M. C. Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management. **Reviews in Aquaculture**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 117–130, 24 fev. 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/raq.12057>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SANDER, E.; ROSENTHAL, H. Application of ozone in water treatment for home aquaria, public aquaria and for aquaculture purposes. **Aquatic Applications of Ozone, International Ozone Institute**, Stamford, CT, p. 103-114, 1975.

SCHROEDER, J. P.; KLATT, S. F.; SCHLACHTER, M.; ZABLOTSKI, Y.; KEUTER, S.; SPIECK, E.; SCHULZ, C. Impact of ozonation and residual ozone-produced oxidants on the nitrification performance of moving-bed biofilters from marine recirculating aquaculture systems. **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 65, p. 27–36, mar. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144860914001009>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SCHRAM, E.; SCHRAMA, J.; KUSTERS, K.; KWADIJK, C.; PALSTRA, A. Effects of exercise and temperature on geosmin excretion by European eel (*Anguilla anguilla*). **Aquaculture**, [s. l.], v. 451, p. 390–395, jan. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848615301836>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SOUZA, S. M. G.; MATHIES, V. D.; FIORAVANZO, R. F. Off-flavor por geosmina e 2-Metilisoborneol na aquicultura. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 835-846, abr. 2012. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4457/445744112040.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SUMMERFELT, S. T.; HANKINS, J. A.; WEBER, A. L.; DURANT, M. D. Ozonation of a recirculating rainbow trout culture system II. Effects on microscreen filtration and water quality. **Aquaculture**, v. 158, n. 1-2, p. 57–67, dez. 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848697000641>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SUMMERFELT, S. T.; VINCI, B. J. Better management practices for recirculating aquaculture systems. *In*: TUCKER, C. S.; HARGREAVES, J. A. (eds.). **Environmental best management practices for aquaculture**. [S. l.]: Wiley, 2008. p. 389–426. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780813818672#page=397>. Acesso em: 10 jul. 2025.

TANG, W. Z. **Physicochemical treatment of hazardous wastes**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2004.

TIMMONS, et al. *Recirculating Aquaculture*, 4a edição 2018

VALLOD, D.; CRAVEDI, J. P.; HILLENWECK, A.; ROBIN, J. Analysis of the off-flavor risk in carp production in ponds in Dombes and Forez (France). **Aquaculture International**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 287–298, 3 abr. 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10499-007-9080-7>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ZHANG, T.; LI, L.; SONG, L.; CHEN, W. Effects of temperature and light on the growth and geosmin production of *Lyngbya kuetzingii* (Cyanophyta). **Journal of Applied Phycology**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 279–285, 7 ago. 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-008-9363-z>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ZHOU, Y. M.; LIU, L.; WU, W. X.; SHEN, Y.; DAI, Y. J. Earthy-musty odorants in recirculating aquaculture systems: generation mechanism, influencing factors, and removal processes. **Aquaculture International**, [s. l.], v. 32, 9565–9586, 24 jul. 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10499-024-01629-7>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ZORZI, V.; BERTINI, A.; ROBERTSON, A.; BERARDINELLI, A.; PALMISANO, L.; PARRINO, F. The application of advanced oxidation processes including photocatalysis-based ones for the off-flavours removal (GSM and MIB) in recirculating aquaculture systems. **Molecular Catalysis**, [s. l.], v. 551, p. 113616, 1 dez. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468823123006995>. Acesso em: 10 jul. 2025.