



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Thayza Oliveira Macena de Santana

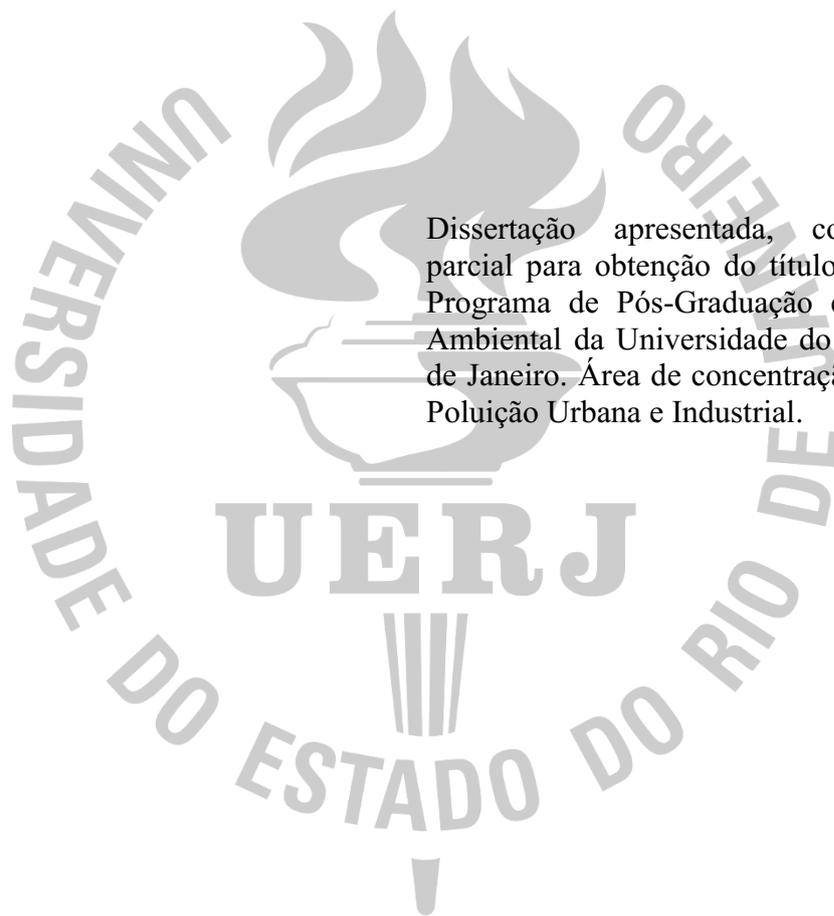
Diagnóstico da qualidade dos efluentes de uma planta de tratamento de esgotos  
sanitários e propostas para produção de água industrial

Rio de Janeiro

2024

Thayza Oliveira Macena de Santana

Diagnóstico da qualidade dos efluentes de uma planta de tratamento de esgotos sanitários  
e propostas para produção de água industrial



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Ronei de Almeida

Coorientadora: Daniele Maia Bila

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S232 Santana, Thayza Oliveira Macena de.  
Diagnóstico da qualidade de efluentes de uma planta de tratamento de esgotos sanitários e propostas para produção de água industrial / Thayza Oliveira Macena de Santana. – 2024.  
100 f.

Orientador: Ronei de Almeida.  
Coorientadora: Daniele Maia Bila.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Esgotos - Teses. 3. Águas residuais - Purificação - Teses. 4. Água - Estações de tratamento - Teses. 5. Água - Reuso - Teses. I. Almeida, Ronei de. II. Bila, Daniele Maia. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 628.32

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Thayza Oliveira Macena de Santana

Diagnóstico da qualidade dos efluentes de uma planta de tratamento de esgotos sanitários  
e propostas para produção de água industrial

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em 27 de junho de 2024.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Ronei de Almeida (Orientador)

Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Daniele Maia Bila (Coorientadora)

Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof<sup>a</sup>. Dr. Alexandre Lioi Nascentes

Instituto de Tecnologia – UFRRJ

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Juacyara Carbonelli Campos

Escola de Química – UFRJ

Rio de Janeiro

2024

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, cujo amor, apoio e compreensão foram fundamentais em todos os momentos desta jornada acadêmica e da minha vida. Em especial, à minha mãe, Angela, aos meus irmãos, João Felipe, Amanda, e Davi, e ao meu marido, Phelipe. Agradeço também à minha falecida avó Elza, que em vida nos deu todo o apoio, carinho e amor. A vocês, que sempre estiveram ao meu lado, dedicando-se e incentivando-me a perseguir meus sonhos, expresso minha mais profunda gratidão.

Este trabalho é também dedicado aos meus professores, mentores e colegas, cujo conhecimento, orientação e colaboração foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa. Em especial, agradeço a orientação do Prof. Dr. Ronei de Almeida e a coorientação da Prof<sup>a</sup>. Dra. Daniele Maia Bila.

Por fim, dedico esta dissertação a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento pessoal e acadêmico, e agradeço a Deus acima de tudo. Que este trabalho possa contribuir de forma significativa para o avanço do conhecimento em nossa área e para o bem-estar da sociedade.

## RESUMO

SANTANA, T. O. M. *Diagnóstico da qualidade dos efluentes de uma planta de tratamento de esgotos sanitários e propostas para produção de água industrial*. 2024. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) define metas de incentivo a produção de água de reúso, promovendo uma mudança cultural na reutilização da água. Este trabalho avalia a qualidade do esgoto bruto e dos efluentes tratados de uma estação de tratamento de esgotos (ETE) (estudo de caso) localizada em Campinas (São Paulo, Brasil) a partir do índice de qualidade de efluente (IQE). Rotas para o tratamento complementar do efluente da ETE, com o intuito de viabilizar a produção de água industrial, foram propostas. A estimativa do IQE foi realizada com base na metodologia proposta por Kothari et al. (2021). O IQE do efluente tratado (IQEf) indicou que a ETE do estudo de caso produziu água de reúso classe A na maioria do período analisado, exceto em abril/2022 (classe B), seguindo os padrões de enquadramento da SVDS/SMS nº 09/2014 (Campinas/ SP). Visando a produção de água industrial a partir do esgoto sanitário tratado, foi proposta a adição de tecnologias como osmose inversa, nanofiltração e um sistema integrado de eletrólise–microfiltração–troca iônica para o tratamento avançado do efluente produzido pela ETE. O reúso de efluentes sanitários das ETE em substituição à captação de água dos mananciais existentes pode ser uma estratégia atrativa tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Destaca-se que a seleção da rota para o polimento final do esgoto tratado requer uma análise criteriosa para atender às necessidades específicas da indústria. Em resumo, o presente estudo ressalta o potencial uso do IQE para categorizar os efluentes das ETE e sua aplicação em uma cadeia de tratamento adicional, com o objetivo de produzir água industrial para atender as indústrias locais.

Palavras-chave: Reutilização da Água; Estação de Tratamento de Esgoto; Índice de Qualidade de Efluente; Tecnologias Avançadas de Tratamento; Água Industrial.

## ABSTRACT

SANTANA, T. O. M. *Diagnosis of the effluent quality from a sanitary sewage treatment plant and proposals for industrial water production*. 2024. 100 f. Dissertation (Master's in Environmental and Sanitary Engineering) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The New Legal Framework for Sanitation (Law No. 14.026/2020) sets goals to incentivize reclaimed water production, promoting a cultural shift in water reuse. This work evaluates the quality of raw sewage and treated effluents from a wastewater treatment plant (WWTP) (case study) located in Campinas (São Paulo, Brazil) based on the effluent quality index (EQI). It proposes routes for the complementary effluent treatment to enable industrial water production. The EQI estimation followed the methodology proposed by Kothari et al. (2021). The final EQI indicated that the treatment plant produced class A reclaimed water for most of the analyzed period, except in April 2022 (class B), following the classification standards of SVDS/SMS No. 09/2014 (Campinas/SP). The addition of technologies such as reverse osmosis, nanofiltration, and an integrated system of electrolysis—microfiltration—ion exchange was proposed for the advanced treatment of the effluent produced by the WWTP. Reusing sanitary effluents from WWTPs instead of capturing water from existing sources can be an environmentally and economically attractive strategy. It is noteworthy that selecting the route for the final polishing of the treated sewage requires careful analysis to meet the industry's specific needs. In summary, this study highlights the potential use of the EQI to categorize the effluents from the WWTP and its application in an additional treatment chain, aiming to produce industrial water to meet local industry demands.

Keywords: Water Reuse; Wastewater Treatment Plant; Effluent Quality Index; Advanced Treatment Technologies; Industrial Water.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físico-químicas dos esgotos sanitários. ....	15
Tabela 2 – Padrão de qualidade recomendado para água de resfriamento e geração de vapor para aplicação industrial. ....	23
Tabela 3 - Modalidades de reúso de água e aplicações. ....	28
Tabela 4 – Documentos reguladores sobre reúso da água no Brasil. ....	29
Tabela 5 – Modalidades previstas para o reúso direto não potável de água pela Resolução Resolução CNRH nº 54 (2005) ....	31
Tabela 6 – Classes e modalidades previstas na Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01, de 13 de fevereiro de 2020. ....	34
Tabela 7 – Padrões de qualidade para as categorias de água de reúso modalidades previstas na Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01, de 13 de fevereiro de 2020. ....	35
Tabela 8 – Padrões de qualidade para as categorias de água de reúso modalidades previstas pela Resolução Conjunta SVDS/SMS nº 09/2014. ....	36
Tabela 9 – Tecnologias avançadas de tratamento de efluentes líqüidos. ....	38
Tabela 10 – Características típicas dos processos de membrana aplicados para tratamento de águas. ....	41
Tabela 11 – Vantagens e limitações das tecnologias de tratamento discutidas nesta secção. ....	44
Tabela 12 – Período e parâmetros físico-químicos e microbiológicos analisados no presente estudo. ....	51
Tabela 13 - Índice de qualidade de efluente e classe de água de reúso correspondente calculado a partir da SVDS/SMS nº 09/2014 (Campinas/SP). ....	53
Tabela 14 - Índice de qualidade de efluente e classe de água de reúso correspondente calculado a partir da SVDS/SMS nº 09/2014 (Campinas/SP). ....	53
Tabela 15 – Caracterização dos efluentes bruto e tratado do estudo de caso no período de janeiro de 2021 a novembro de 2022. ....	58
Tabela 16 – Análise descritiva dos parâmetros de qualidade do esgoto bruto e índice de qualidade do efluente bruto. ....	62
Tabela 17 – Análise descritiva dos parâmetros de qualidade e índice de qualidade do efluente tratado. ....	62
Tabela 18 – IQE dos esgotos bruto e tratado calculados no período de janeiro/ 2021 a novembro/ 2022. ....	63

Tabela 19 – Características, vantagens e limitações das rotas 1, 2 e 3.....	70
Tabela 20 – Caracterização dos efluentes bruto e tratado da estação de tratamento de esgoto sanitário estudo de caso no período de janeiro de 2021 a novembro de 2022. ....	97
Tabela 21 – Caracterização do efluente tratado no período de janeiro de 2021 a novembro de 2022. ....	99

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do tratamento convencional dos efluentes sanitários.....	18
Figura 2 - Usos consultivos setoriais de água no Brasil em 2019.....	20
Figura 3 – Consumo de água industrial no Brasil em 2019.....	21
Figura 4 – Índice de perdas na distribuição (IN049) por macrorregião geográfica dos prestadores de serviços no Brasil.. ..	25
Figura 5 – Partículas e moléculas retidas de acordo com o tipo de processo de separação por membranas.....	40
Figura 6 – Localização da Estação de Tratamento de Esgotos Sanitários.....	47
Figura 7 – Diagrama de blocos com as etapas de tratamento da estação do estudo de caso. ...	48
Figura 8 – Biorreatores com membranas externo/submerso.. ..	49
Figura 9 – Índice de qualidade dos efluentes bruto e tratado no período de janeiro/ 2021 a novembro/ 2022.....	64
Figura 10 – Rota 1. ....	66
Figura 11 – Rota 2. ....	66
Figura 12 – Rota 3. ....	67

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>1 OBJETIVOS</b> .....	13
1.1 Objetivo geral .....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
2.1 Caracterização e Tratamento de Esgotos Sanitários .....	14
2.2 Uso da Água no Setor Industrial .....	19
2.3 Reúso da Água .....	24
2.3.1 Classificação .....	26
2.3.2 Modalidades .....	27
2.4 Aspectos legais .....	28
2.5 Tratamento Avançado de Efluentes Líquidos .....	37
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	46
3.1 Estudo de caso .....	46
3.2 Obtenção dos dados de caracterização dos efluentes bruto e tratado .....	50
3.3 Qualidade dos efluentes da estação de tratamento de esgotos .....	51
3.3.1 Índice de qualidade de efluente (IQE) .....	51
3.3.2 Análise estatística .....	54
3.3.3 Considerações e limitações .....	54
3.4 Propostas para produção de água industrial .....	55
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	57
4.1 Diagnóstico da qualidade dos efluentes da estação de tratamento de esgotos .....	57
4.2 Índice de qualidade dos esgotos bruto e tratado .....	61
4.3 Propostas para polimento final do esgoto tratado .....	65
<b>CONCLUSÕES</b> .....	72
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	75
<b>ANEXOS</b> .....	96
Anexo A .....	97
Anexo B .....	99

## INTRODUÇÃO

O novo marco legal de saneamento, estabelecido pela Lei nº 14.026/2020, promove o reúso de efluentes industriais ao incentivar seu tratamento e utilização segura. A lei visa expandir os serviços de saneamento, fornecendo infraestrutura para o tratamento de efluentes. Além disso, estimula a inovação tecnológica, facilitando o desenvolvimento de novas soluções para o tratamento eficiente dos efluentes líquidos. Essa abordagem não apenas cria novas fontes de receita para as empresas, mas também contribui para a preservação dos recursos hídricos e a redução do impacto ambiental, ao diminuir a descarga de efluentes nos corpos d'água e o consumo de água potável. Em suma, o novo marco legal de saneamento desempenha um papel fundamental na promoção do reúso de efluentes sanitários, impulsionando práticas sustentáveis e favorecendo o desenvolvimento socioeconômico do país (Brasil, 2020).

O crescimento populacional aliado ao processo de urbanização e à expansão das atividades antrópicas contribui para o aumento significativo do uso dos recursos naturais e degradação dos recursos hídricos. A perda da qualidade da água pode ocorrer de várias formas e é influenciada por diversos fatores, tais como, o lançamento de produtos químicos industriais, esgoto sanitário, fertilizantes agrícolas, pesticidas e resíduos sólidos que quando em contato com a água podem torná-la inadequada para o consumo humano, além de prejudicar os ecossistemas aquáticos (Campos e Kuhn, 2021).

A perda da qualidade dos recursos hídricos se deve, dentre outros fatores, ao lançamento do esgoto sanitário sem tratamento adequado no meio ambiente. Tal fato está relacionado, a sua composição físico-química e biológica de caráter poluidor, como elevados teores de matéria orgânica, nutrientes, patógenos, contaminantes utilizados no cotidiano como produtos de limpeza doméstica, higiene pessoal e fármacos (Del-Guercio; Christofolletti; Fontanetti, 2017).

As estações de tratamento de esgotos (ETE) visam adequar o esgoto sanitário para despejo nos corpos hídricos. Essas unidades possuem processos de tratamento convencionais que o adéquam aos padrões estabelecidos pela legislação, cuja finalidade é a preservação da qualidade no corpo receptor (Santana et al., 2020). Isso se deve ao fato dessas unidades

apresentarem uma série de operações unitárias, aplicadas para a remoção dos poluentes de forma a adequar o efluente às condições exigidas pela legislação vigente. Nesse contexto, o índice de qualidade de efluente (IQE), em inglês *Wastewater Quality Index* (WWQI), — representado por um valor numérico que descreve a qualidade geral da água e sua adequação para diferentes fins — é uma ferramenta importante na categorização dos diferentes tipos de águas (Ganguly e Dewan, 2020; Jamshidzadeh e Tavangari Barzi, 2020). A estimativa do IQE permite converter parâmetros físico-químicos e microbiológicos de poluição das águas em um valor numérico que classifica a água, facilitando a tomada de decisão no gerenciamento dos efluentes (Arabzadeh et al., 2023).

Na última década, um aumento exponencial nas atividades de reciclagem e reutilização de água foi registrado (Yang et al., 2020). Vários projetos têm sido iniciados para o tratamento de águas residuais provenientes de diversas indústrias, especialmente de fontes municipais, visando aplicações potáveis ou não potáveis. Em contrapartida, o tratamento adequado dos efluentes sanitários bruto ou tratado para reúso industrial requer considerações técnicas, econômicas e ambientais. Pérez et al. (2021) destacam a importância de integrar esses aspectos para uma produção eficiente de água de reúso. Peiet al. (2020) ressaltam vários fatores a serem considerados na seleção da tecnologia de tratamento, incluindo qualidade e quantidade da água residual, custos de construção e operação, dificuldades de engenharia, condições locais e conflitos potenciais. Os autores enfatizaram a necessidade de identificar o nível de tratamento necessário para atender aos requisitos de qualidade para o uso pretendido. Yanget al. (2020) salientaram que diferentes aplicações de reutilização requerem diferentes especificações de qualidade da água, sugerindo a aplicação de tecnologias de tratamento específicas para cada caso.

O setor industrial consome uma quantidade significativa de água em seu processo produtivo. De acordo com a FIESP (2010), a qualidade da água requerida para os diversos processos industriais varia de acordo com o setor de atividade e a capacidade de produção, possibilitando a utilização de águas com diferentes padrões de qualidade, dependendo da finalidade desejada. Na indústria, a água pode ser empregada em várias funções, tais como, matéria-prima, fluido auxiliar de processo, geração de energia, fluido de aquecimento e resfriamento, transporte e dispersão de contaminantes (Nordell, 1961; Shreve e Brink Jr., 1980; Silva e Simões, 1999; Seneviratne, 2007; Valta et al., 2015). No geral, para atender aos requisitos de reutilização industrial, torna-se necessária a incorporação de tecnologias de tratamento avançado após as etapas de tratamento convencional, com o objetivo de alcançar

os níveis de qualidade exigidos de acordo com a aplicação pretendida para a água (Rodrigues e Bernardes, 2018).

Nakamura et al. (2023) apontaram que os custos associados à obtenção da água de reúso para uso industrial são relativamente baixos quando comparados às tarifas de água fornecidas pelas concessionárias municipais do Estado de São Paulo para esta mesma finalidade (variação de R\$ 13,06/ m<sup>3</sup> a R\$ 26,31/ m<sup>3</sup> para as maiores faixas de consumo). Além disso, o reúso industrial dos efluentes tratados emerge como forma de garantir o planejamento hídrico dos polos industriais e desenvolvimento socioeconômico regional. O uso de esgotos tratados em substituição a compra de água das companhias de abastecimento e/ou captação de água dos mananciais existentes, por vezes em condições de baixa qualidade, pode ser uma estratégia atrativa do ponto de vista ambiental e econômico. Logo, os efluentes sanitários podem representar uma fonte potencial de água para a indústria.

## **1 OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo geral**

Analisar a qualidade do esgoto bruto e tratado de uma estação de tratamento localizada no Município de Campinas (Estado de São Paulo, Brasil) no período de janeiro de 2021 a novembro de 2022 e propor rotas para tratamento complementar com base nos critérios de qualidade de uso de água industrial.

### **1.2 Objetivos específicos**

- a) Avaliar a qualidade do esgoto bruto e tratado de uma estação de tratamento localizada no Município de Campinas, Estado de São Paulo (estudo de caso) a partir do parâmetro índice de qualidade do efluente (IQE);
- b) Confrontar a qualidade do efluente tratado com os padrões de reúso previstos no Município de Campinas (Resolução Conjunta SVDS/SMS nº 09/2014);
- c) Propor rotas de tratamento complementar do efluente tratado da estação estudo de caso visando à produção de água industrial.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são apresentados pontos relacionados à atual conjuntura do saneamento, com foco na caracterização físico-química e tratamento de esgotos sanitários, reúso da água, aspectos legais e parâmetros de qualidade. Por fim, uma revisão da literatura com foco nas principais tecnologias para produção de água industrial é apresentada.

### 2.1 Caracterização e Tratamento de Esgotos Sanitários

A composição físico-química e microbiológica do esgoto sanitário, quando lançado *in natura* no corpo receptor, gera uma perturbação e desequilíbrio no sistema por meio da redução da concentração de oxigênio dissolvido da água, toxicidade, mortalidade dos organismos aquáticos e eutrofização. Consequentemente, a contaminação das águas acarreta riscos à saúde pública quando há contato direto ou ingestão (Braga et al., 2005). Diante de tal cenário, torna-se necessário e fundamental o tratamento dos efluentes sanitários com a finalidade de preservar o ambiente para as presentes e futuras gerações e garantir a qualidade de vida para a população e a promoção da saúde por meio da redução da proliferação de doenças (SNIS, 2020).

Esgotos domésticos (compostos essencialmente da água do banho, urina, fezes, papel, resto de comida, sabão, detergentes e águas de lavagem) são despejos líquidos provenientes principalmente de residências, edificações comerciais, instituições ou qualquer edificação que contém instalações de banhos, lavanderias, cozinhas ou outros dispositivos de utilização de água para fim doméstico (Jordão e Pessôa, 2011). A composição do esgoto sanitário é de aproximadamente 99,9% de água e o restante, 0,1%, é a fração que inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, em suspensão e dissolvidos, bem como os microrganismos (Von Sperling, 2016;

ABES, 2011). A Tabela 1 apresenta a categorização dos esgotos sanitários em função da composição físico-química típica observada por Von Sperling (2005).

Tabela 1 - Características físico-químicas dos esgotos sanitários.

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valores típicos para esgoto doméstico</b>
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	mg/L	200 - 600
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	500 - 1500
Sólidos Totais	mg/L	500 - 1200
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	200 - 700
Nitrogênio Total	mg/L	20 - 85
Fósforo Total	mg/L	04- 15
pH	-	6,5 - 8,0
Temperatura	°C	10 - 25
Coliformes Fecais	NMP/100 mL	10 <sup>6</sup> - 10 <sup>9</sup>

Fonte: Von Sperling (2005).

A tabela 1 de caracterização de esgotos sanitários de Von Sperling é um conjunto de parâmetros que descrevem as características típicas dos esgotos sanitários. Ela é amplamente utilizada no Brasil e foi desenvolvida por Marcos Von Sperling, um dos principais pesquisadores na área de saneamento no país (Von Sperling, 2005). A composição físico-química e a variabilidade dos esgotos sanitários dependem das atividades humanas, industriais, das condições climáticas e das redes de esgotos combinados, nos quais há a contribuição de água de escoamento de telhados e calçadas (Potier e Pons, 2006).

Devido aos impactos causados do lançamento de esgotos sanitários não tratados em corpos d'água, faz-se necessário que seja implementado um sistema de tratamento de efluentes com o intuito de reduzir os efeitos deletérios quando os efluentes são lançados nos corpos receptores (SNIS, 2020). No Brasil, a Lei nº 14.026/2020 (Novo Marco Legal do Saneamento) considera o esgotamento sanitário como o sistema constituído pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais necessárias à coleta, transporte, tratamento e à disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até sua destinação final para produção de água de reúso ou seu lançamento de forma adequada no meio ambiente (Brasil, 2020).

Uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) apresenta como objetivo proporcionar um tratamento eficiente por meio do atendimento dos requisitos específicos das legislações ambientais. Dessa forma, o tratamento convencional de efluentes apresenta uma série de

operações unitárias composta por tratamento preliminar, primário e secundário (Von Sperling, 2016).

A etapa de tratamento preliminar consiste na remoção dos sólidos mais grosseiros por meio do gradeamento. Em seguida, a desarenação e um sistema separador água/óleo para a remoção de partículas inertes de rápida deposição (*e.g.*, areia, cascalho, etc.), óleos e graxas, respectivamente (Von Sperling, 2016; ABES, 2011, Mello, 2007).

O tratamento preliminar visa, basicamente, a remoção de sólidos grosseiros em suspensão e o condicionamento dos esgotos para a etapa posterior, através de processos físicos de separação de fases sem necessidade da adição de produtos químicos. Esta etapa é constituída pelo gradeamento, desarenação e remoção de óleos e graxas. Essas operações são responsáveis por proteger tubulações, válvulas, bombas, evitando obstruções e danos nos equipamentos que fazem parte do sistema de tratamento (Brandão e Castilho. 2001; Crespilho, et al., 2004; Mello, 2007).

Posteriormente, a etapa do tratamento primário é utilizada para a remoção de sólidos sedimentáveis podendo ser por decantação ou flotação. O tratamento físico-químico pode ocorrer com adição de produtos químicos como coagulantes e floculantes que facilitam a coagulação/floculação de partículas coloidais que são posteriormente removidos em um sistema de separação sólido/líquido (Ibrahin; Ibrahin; Cantuária, 2015).

No tratamento primário, pode haver uso de agentes coagulantes e floculantes, utilizando a rota físico-química para a remoção de coloides que apresentam grande estabilidade devido a sua granulometria e a existência de cargas superficiais que favorecem a repulsão entre as partículas. Os processos físico-químicos são utilizados no tratamento de efluentes sanitários e industriais para a remoção eficiente de sólidos suspensos, fósforo, redução da demanda química de oxigênio (DQO) e cor (Kim, 2016).

A etapa de tratamento secundário consiste na remoção da matéria orgânica biodegradável dissolvida ou em suspensão. Essa etapa do tratamento convencional se baseia na aplicação de processos biológicos, os quais são responsáveis pela estabilização da matéria orgânica. A etapa biológica de tratamento ocorre inteiramente por mecanismos biológicos que reproduzem os processos que ocorrem na natureza, porém, de forma otimizada (Von Sperling, 2016b).

Os microrganismos presentes nos sistemas biológicos de tratamento como as bactérias heterotróficas (utilizam a matéria orgânica como fonte de carbono) e autotróficas (retiram energia de compostos inorgânicos do ambiente) são os principais responsáveis pela remoção, estabilização e mineralização dos contaminantes. O tratamento convencional de efluentes sanitários consiste na reprodução das condições naturais de autodepuração, ou seja, um processo natural, no qual cargas poluidoras, de origem orgânica, lançadas em um corpo d'água são mineralizadas, porém, em maior velocidade, devido ao controle dos parâmetros e das condições ambientais dos reatores que favorecem os processos de depuração (Von Sperling, 1996).

Os microrganismos envolvidos no processo de tratamento de efluentes são as bactérias, protozoários, fungos, algas e helmintos. Dentre eles, os que se destacam são as bactérias por assumirem o protagonismo na estabilização das substâncias potencialmente poluidoras. Esta etapa pode ser dividida em dois grandes grupos em função do ambiente bioquímico, processos aeróbios e anaeróbios (Von Sperling, 2016b). No processo aeróbio, os microrganismos degradam a matéria orgânica com a utilização de oxigênio para que ocorra a biodegradação (Von Sperling, 2005). Já no processo anaeróbio, as substâncias orgânicas são degradadas pelos microrganismos na ausência ou em baixas concentrações de oxigênio molecular cujos produtos dessa reação são metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ), sulfetos ( $\text{S}^{-2}$ ) e fosfatos ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) (Von Sperling, 2007).

Em função da técnica de retenção da biomassa nos reatores, os processos biológicos são classificados em biomassa com crescimento fixo ou em suspensão. O primeiro ocorre mediante a formação de um biofilme sobre suportes inertes, enquanto que o segundo se dá pela formação de flocos microbianos suspensos. Dentre os processos aeróbios, o sistema de lodo ativado é o mais utilizado, no qual a biomassa cresce em suspensão no biorreator. Dentre os processos anaeróbios destaca-se o reator de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB, do inglês, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) (Metcalf e Eddy, 2003).

A rota biológica de tratamento de efluente mais utilizada é o sistema de lodo ativado devido a sua versatilidade, eficiência e menor requisito de área. O processo de lodo ativado é caracterizado pela recirculação de parte da corrente de purga do lodo para o tanque de aeração, visando assegurar elevada concentração de biomassa no biorreator. O resultado da interação bioquímica entre os microrganismos e matéria orgânica é a formação dos flocos biológicos sendo estes, os responsáveis pela remoção dos contaminantes. A fim de que o

tratamento alcance as eficiências desejadas, é importante manter sob controle os fatores de influência, tais como, pH, oxigênio dissolvido e temperatura (Von Sperling, 2016; Chen et al., 2022). A Figura 1 ilustra as etapas do tratamento convencional dos efluentes sanitários.

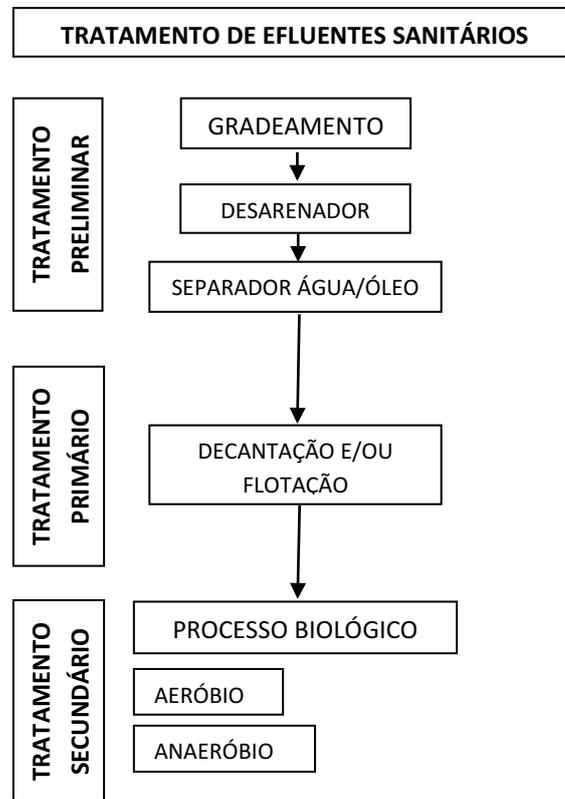


Figura 1 - Etapas do tratamento convencional dos efluentes sanitários. Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2010); Metcalf e Eddy (2003).

Mesmo após o tratamento primário e secundário de efluentes, existe a possibilidade da remoção dos contaminantes não ser eficaz devido ao grau de exigência do órgão ambiental. A depender do grau de exigência, será necessária uma etapa terciária de tratamento que poderá incluir tecnologias para tratamento avançado de efluentes líquidos (Hespanhol, 2015; Metcalf e Eddy, 2003; Hespanhol, 2019).

Dentre as tecnologias para tratamento avançado de efluentes, a tecnologia de biorreator com membrana (MBR, do inglês, *membrane biological reactor*) tem ganhado espaço no tratamento de esgotos sanitários. Esta tecnologia consiste na união do tratamento biológico com os processos de separação por membranas (PSM), sendo, portanto, um sistema híbrido. A operação se dá através da separação dos sólidos em suspensão do reator biológico por membranas de micro ou ultrafiltração (Metcalf e Eddy, 2003). Este tipo de tecnologia avançada combina as vantagens dos PSM com os benefícios da degradação biológica das

substâncias orgânicas, visto que as membranas atuam como uma barreira semipermeável, permitindo a passagem de água, íons e moléculas de baixa massa molecular, retendo os sólidos e microrganismos (Baker, 2012). No MBR, os poluentes biodegradáveis são degradados pela biomassa ativa em suspensão no biorreator e, após a degradação biológica, o efluente tratado é separado da biomassa por uma membrana de MF ou UF (Germain et al., 2007; Felizatto *et al.*, 2016).

O MBR apresenta inúmeras vantagens como a geração de um efluente final (permeado) com qualidade elevada, devido à ausência de contaminação fecal e de sólidos em suspensão. Por outro lado, o MBR apresenta limitações que podem impactar diretamente no seu desempenho e eficiência, dentre eles destacam-se a polarização por concentração e o fenômeno de *fouling* das membranas (Baker, 2012; Maestri, 2007; Mendret et al., 2009). A capacidade de garantir um fluxo elevado de permeado a uma menor pressão de operação é fundamental para assegurar o bom desempenho do processo a menores custos operacionais (Schneider e Tsutiya, 2001).

## 2.2 Uso da Água no Setor Industrial

O setor industrial utiliza elevada quantidade de água em seu processo produtivo. As águas após utilização são descartadas nas redes de esgoto sanitário ou diretamente nos rios, proporcionando aumento da poluição das cidades (Oliveira, 2011). Dessa forma, o reúso da água é uma opção para esse setor porque proporciona economia no valor a ser pago às companhias de saneamento, evita o desperdício, contribui para a diminuição da poluição dos mananciais e aumenta a competitividade das indústrias, uma vez que os consumidores estão cada vez mais aptos a comprarem de empresas socialmente responsáveis (Oliveira, 2011).

Estima-se um aumento de 42% das retiradas de água nos próximos 20 anos (até 2040), passando de 1.947 m<sup>3</sup>/s para 2770 m<sup>3</sup>/s, um incremento de 26 trilhões de litros ao ano extraídos de mananciais (ANA, 2024). Esses dados reforçam a necessidade de ações de planejamento para que os usos se desenvolvam com segurança hídrica. De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), o uso de águas na indústria foi responsável pelo terceiro

maior consumo de água no Brasil em 2019, representando cerca de 9,7% dos 65 trilhões de litros anuais (ANA, 2024) (Figura 2).

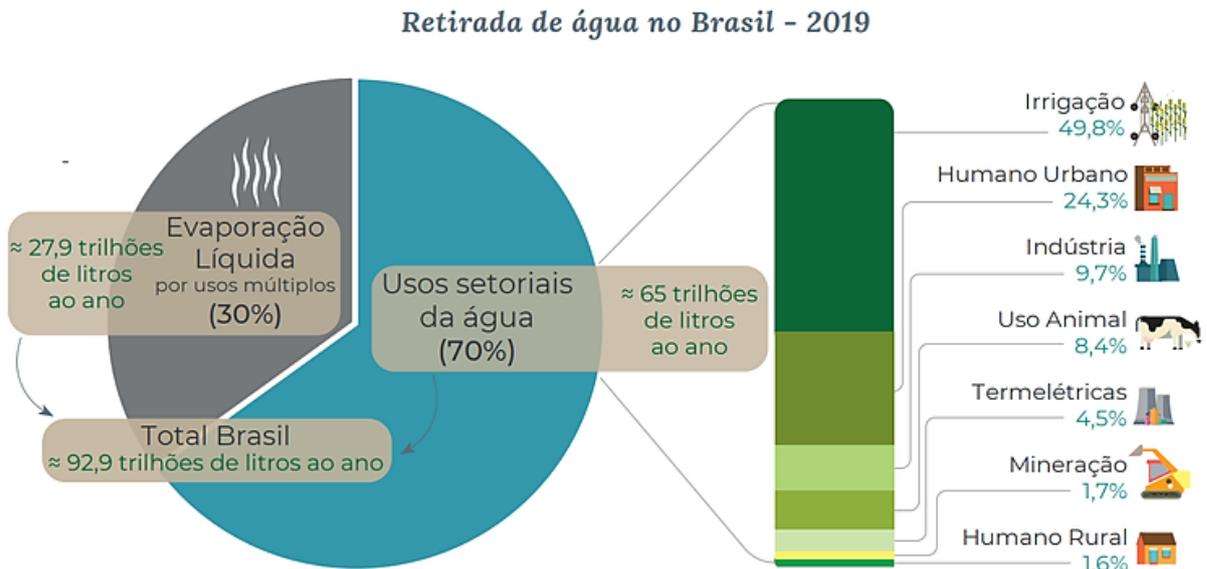


Figura 2 - Usos consultivos setoriais de água no Brasil em 2019. Fonte: ANA (2024).

Porém, considerando as peculiaridades desse setor, como tipologias industriais e processos distintos, as quantidades consumidas podem variar (Figura 3) (ANA, 2024). Assim, do ponto de vista da sustentabilidade, é importante o desenvolvimento de estratégias para racionalizar a utilização dos recursos hídricos e minimizar a geração de efluentes pelas indústrias (FIESP, 2010).

## CONSUMO DE ÁGUA INDUSTRIAL DO BRASIL

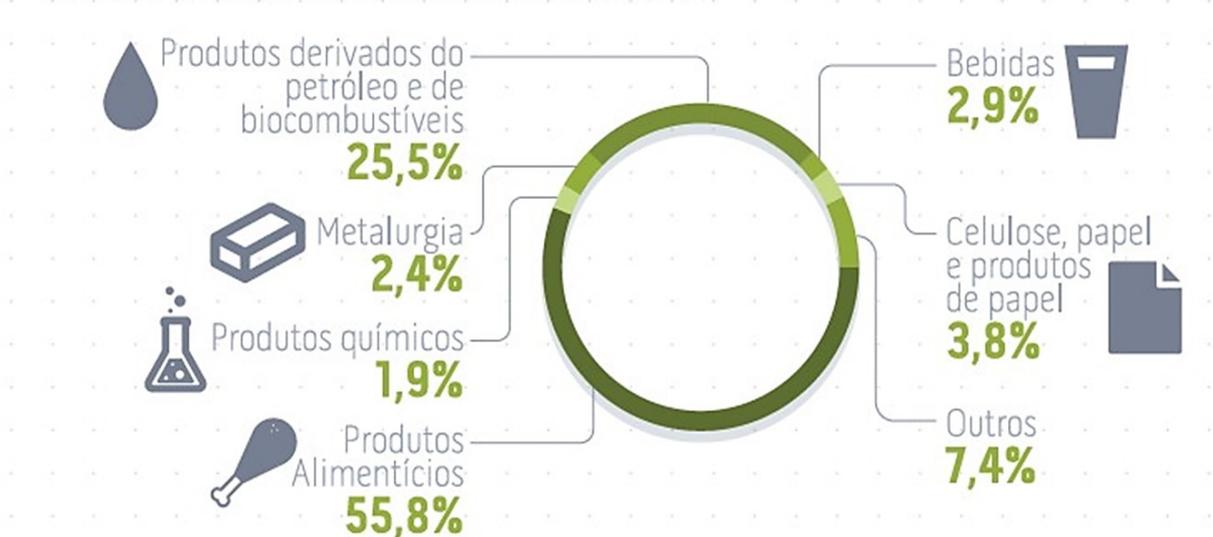


Figura 3 – Consumo de água industrial no Brasil em 2019. Fonte: ANA (2024).

De acordo com Moura (2002), os efluentes líquidos podem ser utilizados em vários processos industriais antes de serem descartados nos corpos d'água, evitando perdas, desperdícios de água tratada e proporcionando redução no volume de água captada dos mananciais pelas indústrias. Segundo a FIESP (2010), a qualidade da água necessária aos diversos processos industriais depende do ramo de atividade e capacidade de produção, podendo ser utilizada águas com diferentes níveis de qualidade, a depender da aplicação pretendida. A indústria em suas várias atividades não precisa de água potável para limpeza do pátio industrial, regas de jardins, pátios e descargas sanitárias (Tomaz, 1998; Valta et al., 2015).

A água na indústria pode ter as seguintes aplicações: matéria-prima, fluido auxiliar, geração de energia, fluido de aquecimento e/ou resfriamento, transporte e assimilação de contaminantes (Nordell, 1961; Shreve e Brink Jr., 1980; Silva e Simões, 1999; Seneviratne, 2007; Valta *et al.*, 2015). Como matéria-prima, a água é incorporada ao produto final. O uso como fluido auxiliar de diversas atividades se dá, por exemplo, através do uso da água em torres de resfriamento, caldeiras e no preparo de suspensões e soluções químicas (Seneviratne, 2007; Valta *et al.*, 2015).

O uso da água para geração de energia envolve a transformação de energia cinética, potencial ou térmica acumulada na água em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. O uso como fluido de aquecimento e/ou resfriamento é quando a água é usada para aquecer ou para remover o calor de misturas reativas ou de dispositivos que exijam

resfriamento devido á geração de calor, já que a elevação da temperatura pode comprometer o desempenho do sistema e danificar o equipamento (Valta et al., 2017).

Embora não seja uma das aplicações mais nobres, o uso da água para transporte e assimilação de contaminantes é utilizado pela maioria das indústrias através das instalações sanitárias, na lavagem de equipamentos e instalações ou para incorporação de subprodutos sólidos, líquidos ou gasosos, gerados pelos processos industriais. Quando os processos em questão não toleram a presença de substâncias químicas e/ou microrganismos, é exigido da água um grau de pureza bem elevado (Ajjero e Campbell, 2018).

A depender da aplicação industrial, será exigido um maior número de parâmetros a serem atendidos, de modo que sejam minimizados os riscos ao processo, produto ou sistema no qual a água será utilizada. Torres de resfriamento de água são sistemas que circulam água para a remoção de calor de fontes quentes das plantas de processo, assim é necessário atingir um padrão de qualidade mínimo para evitar corrosão, incrustação e crescimento microbiano nos tubos e equipamentos (Nalco, 2013; Awad, 2007; Abraco, 2012). A operação segura e eficiente de uma caldeira é extremamente dependente da qualidade da água disponível para a alimentação da mesma, desse modo a presença de impurezas pode causar problemas de incrustação e/ou acelerar os processos corrosivos nos equipamentos (Trovati, 2015). A Tabela 2 apresenta os parâmetros e limites de qualidade recomendados para utilização de água como fluido de resfriamento e geração de vapor em caldeiras.

Tabela 2 – Padrão de qualidade recomendado para água de resfriamento e geração de vapor para aplicação industrial.

Parâmetro*	Água de resfriamento	Geração de Vapor		
		Caldeira de Baixa Pressão (< 10 bar)	Caldeira de Média Pressão (10 a 50 bar)	Caldeira de Alta Pressão (> 50 bar)
Cloretos	500	-	+	+
Sólidos Dissolvidos Totais	500	700	500	200
Dureza	650	350	1	0,07
Alcalinidade	350	350	100	40
pH	6,9 a 9,0	7,0 a 10,0	8,2 a 10	8,2 a 9
DQO	75	5	5	1
Sólidos Suspensos Totais	100	10	5	0,5
Turbidez	50	-	-	-
DBO	25	-	-	-
Compostos Orgânicos++	1	1	1	0,5
Nitrogênio Amoniacal	1	0,1	0,1	0,1
Fosfato	4	-	-	-
Sílica	50	30	10	0,7
Alumínio	0,1	5	0,1	0,01
Cálcio	50	+	0,4	0,01
Magnésio	0,5	+	0,25	0,01
Bicarbonato	24	170	120	48
Sulfato	200	+	+	+
Cobre	-	0,5	0,05	0,05
Zinco	-	+	0,01	0,01
Substâncias Extraídas em Tetracloreto de Carbono	-	1	1	0,5
Sulfeto de Hidrogênio	-	+	+	+
Oxigênio Dissolvido	-	2,5	0,007	0,007

DBO = demanda bioquímica de oxigênio. DQO = demanda bioquímica de oxigênio. \* Limites recomendados em mg/L, exceto para pH e turbidez que são expressos em unidades de pH e unidade nefelométrica de turbidez (NTU), respectivamente.

+ Aceito como recebido, caso sejam atendidos outros valores limites

+ +Substâncias ativas ao azul de metileno

Fonte: Crook (1996).

No Brasil, no que diz respeito a critérios e padrões para o reúso industrial, o documento do Programa Interáguas indica padrões para este fim, além de definir que os critérios são de responsabilidade do empreendedor (Interáguas, 2018). Os valores orientativos do padrão de qualidade de água do Programa Interáguas para fins de reúso industrial indicam Coliformes Termotolerantes menores que  $10^3$  NMP/100 mL para os usos previstos de torres de resfriamento, caldeiras, processo de fabricação, construção civil (Interáguas, 2018).

Nesse mesmo raciocínio, no Brasil, os documentos dos estados do Ceará (Resolução COEMA nº 02/2017) e de Minas Gerais (Deliberação Normativa CERH nº 65/2020) definem que os padrões para reúso industrial são de responsabilidade do empreendedor. Esse aspecto se alinha ao conceito do reúso interno, onde a produção da água para reúso pode ser consequência de atividades que ocorrem nas instalações internas do próprio pátio industrial. O documento do Estado do Rio Grande do Sul (Resolução CONSEMA nº 419/2020) menciona que para o reúso industrial é necessário obedecer às especificações técnicas de acordo com a finalidade e tecnologia do processo industrial a que se destina a água de reúso (Santos e Lima, 2022).

### **2.3 Reúso da Água**

O reúso da água consiste na recuperação de efluentes de modo a utilizá-las em aplicações menos exigentes. Dessa forma, o ciclo hídrico tem sua escala diminuída em favor do balanço energético (Metcalf e Eddy, 2016). A Prolagos (2015) cita que a água de reúso é o produto de uma técnica de refinamento do esgoto tratado e polido. Barros et al. (2015) definem que água de reúso é a reutilização de águas provenientes de efluentes tratados.

A Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 54, de 28 de novembro de 2005, considera que o reúso de água se constitui em prática de racionalização e de conservação de recursos hídricos, conforme princípios estabelecidos na Agenda 21, podendo tal prática ser utilizada como instrumento para regular a oferta e a demanda de recursos hídricos. Além disso, define que a água de reúso é água residuária, que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas (Resolução CNRH nº 54/2005).

Em face da escassez dos recursos hídricos a nível mundial, o reúso da água vem se tornando uma alternativa sustentável em prol da racionalização e conservação da água potável. Como benefício, tem-se a redução da demanda sobre os mananciais de água devido à substituição da água potável por outra água com qualidade adequada ao uso pretendido. Tal

prática é baseada no conceito de “substituição de fontes” em função da qualidade requerida para um uso específico. Sendo assim, elevados volumes de água potável podem ser poupados pelo reúso em substituição a uma água de qualidade inferior (CETESB, 2023).

No Brasil predomina-se uma cultura de desperdício de água frente ao cenário de escassez hídrica. Os custos decorrentes das perdas são repassados diretamente ao consumidor final, o que deveriam ser minimizados e estar sujeitos ao gerenciamento apropriado. A Figura 4 identifica que as macrorregiões Norte e Nordeste apresentam os maiores índices de perdas na distribuição, seguidas das macrorregiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, respectivamente. No Brasil, o índice de perdas na distribuição (IN049) foi estimado em 39,2% em 2019. O (IN049) é um indicador volumétrico da água na distribuição perdida, em relação à água produzida, calculada pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico. (SNIS) (SNIS, 2019).

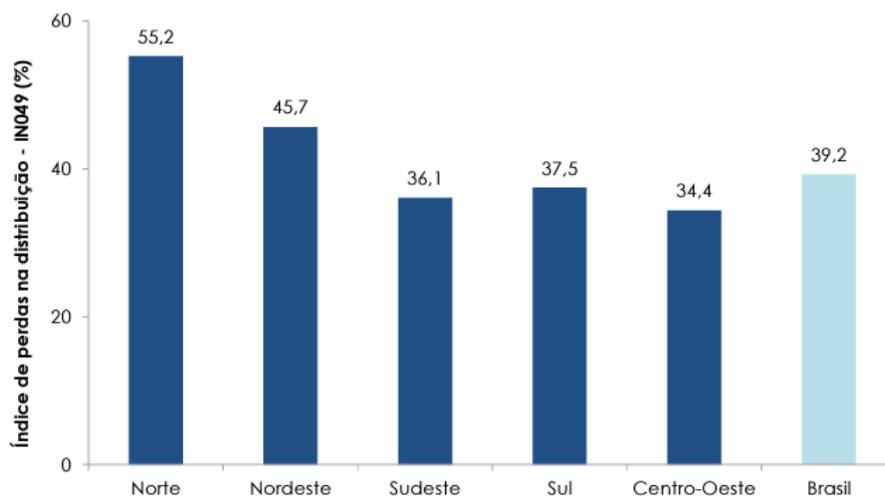


Figura 4 – Índice de perdas na distribuição (IN049) por macrorregião geográfica dos prestadores de serviços no Brasil. Fonte: SNIS (2019).

Segundo Moura et al. (2020), o reúso da água é uma alternativa inteligente cujo intuito de reduzir a dependência da água de consumo humano para fins não potáveis. Além de trazer diversos benefícios de cunho social, econômico e ambiental, contribui para a redução dos custos com água e esgoto, para a conservação dos recursos hídricos e a mitigação dos impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado da água. O reúso da água é uma medida efetiva de controle da poluição da água, além de ser uma alternativa para o aumento da oferta de água em regiões carentes de recursos hídricos (Mota et al., 2007). Assim, o reúso de água planejado torna-se uma prática importante para a redução da exploração de mananciais e, conseqüentemente, para a diminuição da demanda de água bruta na medida em

que muitos dos usos podem ser realizados com uma água de qualidade inferior a água potável. A utilização da água de reúso segura possibilita que a oferta de água potável seja destinada para fins essenciais, e a de água de reúso, para outros fins, tais como atividades agrícolas, irrigação paisagística, limpeza urbana e atividades industriais diversas (Pinto et al., 2014).

Destaca-se que no Brasil, o Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) inclui como metas a expansão dos serviços públicos de saneamento, o reúso de efluentes sanitários e aproveitamento de águas de chuva, em conformidade com os serviços prestados. Os prestadores de serviços devem buscar como fontes de receitas alternativas ou complementares práticas que incluem, dentre outras, a alienação e uso de efluentes sanitários para a produção de água de reúso (Brasil, 2020).

### 2.3.1 Classificação

A Organização Mundial da Saúde (OMS) (1973) (do inglês, *World Health Organization*) define que a água de reúso pode ser classificada como reúso indireto (planejado e não planejado), reúso direto e reciclagem interna. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 13969:1997) classifica o reúso da água quanto à forma de aproveitamento, a saber: reúso local, reúso direto planejado e reúso indireto (planejado e não planejado) (ABNT NBR 13969:1997).

O reúso indireto não planejado da água ocorre quando a água é utilizada em alguma atividade humana, descarregada no meio ambiente e novamente utilizada a jusante, em sua forma diluída, de maneira não intencional e não controlada. O reúso indireto planejado da água é quando os efluentes após o tratamento são descarregados de forma planejada nos corpos de águas superficiais ou subterrâneas, para utilização a jusante, de forma controlada e para o atendimento de algum uso específico. Já o reúso direto planejado da água ocorre quando os efluentes, depois de tratados, são encaminhados diretamente de seu ponto de descarga até o ponto de sua utilização. Esse último caso é comum em indústrias e atividades de irrigação (WHO, 1973; CETESB, 2023). A reciclagem interna envolve a recuperação e o

reaproveitamento da água encontrada nos efluentes líquidos dentro das instalações industriais, visando economizar água e controlar a poluição. Nesse contexto, não ocorre o tratamento dos efluentes, tornando essencial um controle rigoroso dos padrões de qualidade da água e dos processos nos quais ela será utilizada (WHO,1973).

Considerando a classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 13969:1997), o reúso local da água é aquela em que é praticada conforme a necessidade do local e apresenta como vantagem uma maior flexibilidade nos graus de qualidade. Nesse contexto, a Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (Resolução CNRH nº 54/2005), estabeleceu modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água no Brasil, abrangendo as seguintes modalidades: fins urbanos, fins agrícolas e florestais, fins ambientais, fins industriais e aquicultura. Em relação ao reúso da água para fins potáveis, esta prática encontra-se pendente pela regulamentação brasileira, devido aos riscos associados à contaminação por organismos patogênicos e compostos químicos (Carvalho, 2021).

### 2.3.2 Modalidades

A Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 54, de 28 de novembro de 2005 (Resolução CNRH nº 54/2005), estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para regulamentar e estimular a prática do reúso direto não potável da água a nível nacional. Em seu Artigo 3º, a Resolução apresenta as modalidades (e seus componentes) do reúso direto não potável de água, a saber: reúso para fins urbanos; reúso para fins agrícolas e florestais; reúso para fins ambientais; reúso para fins industriais e reúso na aquicultura.

O Projeto de Lei nº 58 de 2016 (Brasil, 2016) dispõe sobre o abastecimento de água por fontes alternativas em todo o território nacional, discriminando as seguintes modalidades de reúso de água: reúso doméstico; reúso doméstico não potável; reúso urbano; reúso agrícola; reúso florestal; reúso industrial; reúso aquícola: para criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos. Além disso, obriga o abastecimento por fontes alternativas para as

novas edificações residenciais, comerciais e industriais e para as edificações, públicas ou privadas, construídas com recursos da União ou das agências federais de crédito. Na Tabela 3 são descritas as principais modalidades de reúso da água e aplicações.

Tabela 3 - Modalidades de reúso de água e aplicações.

<b>Modalidades</b>	<b>Aplicações</b>
<b>Irrigação paisagística</b>	Parques, cemitérios, campos de golfe, faixas de domínio de autoestradas, campus universitários, cinturões verdes, gramados residenciais.
<b>Irrigação de campos para cultivos</b>	Plantio de forrageiras, plantas fibrosas e de grãos, plantas alimentícias, viveiros de plantas ornamentais, proteção contra geadas.
<b>Usos industriais</b>	Refrigeração, alimentação de caldeiras, água de processamento.
<b>Recarga de aquíferos</b>	Recarga de aquíferos potáveis, controle de intrusão marinha, controle de recalques de subsolo.
<b>Usos urbanos não potáveis</b>	Irrigação paisagística, combate ao fogo, descarga de vasos sanitários, sistemas de ar condicionado, lavagem de veículos, lavagem de ruas e pontos de ônibus, etc.
<b>Finalidades ambientais</b>	Aumento de vazão em cursos de água, aplicação em pântanos, terras alagadas, indústrias de pesca.
<b>Usos diversos</b>	Aquicultura, construções, controle de poeira, dessedentação de animais.

Fonte: Adaptado de Brasil (2016).

## 2.4 Aspectos legais

A regulamentação da prática de reúso a nível mundial se iniciou em 1918 na Califórnia (EUA), através da aplicação de efluentes tratados em culturas não consumidas cruas (Angelakis et al., 2018; Shoushtarian e Negahban-Azar, 2020). A Organização Mundial

de Saúde (OMS) publicou as primeiras diretrizes relacionadas ao reúso de água para irrigação em 1973, e em 2006 publicou diretrizes para o reúso de água na agricultura (OMS, 2016). Em 2017, com base na metodologia de avaliação quantitativa de risco microbiológico (do inglês, *Quantitative Microbiological Risk Assessment – QMRA*), a OMS criou um guia para produzir água potável a partir do reúso (OMS, 2017).

No Brasil, as normas técnicas e legislações específicas para o tema reúso da água foram consolidadas a partir da década de 1990. A Tabela 4 apresenta um resumo dos documentos norteadores a nível Federal, Estadual e Municipal que são brevemente abordados nesta secção.

Tabela 4 – Documentos reguladores sobre reúso da água no Brasil.

<b>Documento</b>	<b>Tipo</b>	<b>Âmbito</b>
ABNT NBR 13.969/1997	Norma	Federal
Florencio, Bastos e Aisse (2006) - PROSAB	Norteador	Federal
Resolução CNRH nº 54 (2005)	Legal	Federal
CONAMA nº 430/2011	Legal	Federal
ABNT NBR 16782/2019	Norma	Federal
ABNT NBR 16783/2019	Norma	Federal
ABNT NBR 15527/2019	Norma	Federal
Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020	Legal	Federal
Lei Federal nº 14.546, de 4 de abril de 2023	Legal	Federal
Rio Grande do Sul/2006. Lei nº 12.743 de 2006	Legal	Estadual
Bahia/2010. Resolução CONERH nº 75/2010	Legal	Estadual
Paraná/2012. Lei nº 11.552 de 2012	Legal	Estadual
Ceará/2016. Resolução COEMA nº 02/2017	Legal	Estadual
Rio de Janeiro/2016. Lei nº 7.424 de 2016	Legal	Estadual
Espírito Santo/2016. Lei nº 10.487 de 2016	Legal	Estadual
Campinas/2014. Resolução Conjunta SVDS/SMS nº 09/2014	Legal	Municipal
São Paulo/2015. Lei nº 16.174 de 2015	Legal	Municipal
São Paulo/2015. Lei nº 16.160 de 2015	Legal	Municipal
São Paulo/2021. Lei 17.394 de 15 de setembro de 2021	Legal	Estadual
São Paulo/2020. Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01, de 13 de fevereiro de 2020	Legal	Estadual

Fonte: A autora (2024).

No Brasil, a proposta pioneira de caráter regulador (não mandatória), foi a Norma Brasileira NBR nº 13.969/1997 (ABNT NBR 13969:1997). Os dispositivos técnicos da norma fornecem orientações e critérios para o reúso não potável e direto, bem como o aproveitamento da água da chuva para fins agrícolas, domésticos, ambientais, industriais, entre outros (ABNT NBR 13969:1997). A norma NBR nº 13.969/1997 (ABNT NBR 13969:1997) apesar de considerar o aproveitamento do efluente tratado em reúso local, não é específica pra o tema em questão. O Item 5.6 da presente norma trata especificamente do reúso local da água resultante do tratamento de esgoto tipicamente doméstico e define classes de água de reúso, de acordo com parâmetros de qualidade.

O Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB) se dedicou a fundo sobre a questão do reúso de água e propôs diretrizes voluntárias, além de definir padrões de reúso de água para aplicações urbanas, agrícolas e na piscicultura, conforme documentado por Bastos et al. (2008). O PROSAB priorizou padrões mais flexíveis, condizentes com a realidade nacional e fundamentados em análise de risco, embasadas em evidências epidemiológicas (Bastos et al., 2008; Santos et al., 2020; Florencio, Bastos e Aisse, 2006). Assim, uma das principais premissas do PROSAB foi considerar a capacidade de investimento e o desenvolvimento tecnológico nacional (Santos et al., 2020).

Posteriormente, a Resolução nº 54 de 2005 do Conselho Nacional dos Recursos Hídricos (CNRH) estabeleceu modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. Além disso, a presente resolução considera o reúso de água como prática de racionalização e conservação dos recursos hídricos, podendo tal estratégia ser utilizada como instrumento para regular a oferta e a demanda de recursos hídricos. Definiu, também, as seguintes modalidades de reúso não potável de água: I – reúso para fins urbanos, II – reúso para fins agrícolas e florestais, III – reúso para fins ambientais, IV – reúso para fins industriais e V – reúso na aquicultura (Tabela 5) (Resolução CNRH nº 54/2005).

Tabela 5 – Modalidades previstas para o reúso direto não potável de água pela Resolução Resolução CNRH nº 54 (2005)

<b>Modalidades</b>	<b>Usos previstos</b>
<b>Reúso para fins urbanos</b>	Utilização de água de reúso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações, combate a incêndio, dentro da área urbana.
<b>Reúso para fins agrícolas e ambientais</b>	Aplicação de água de reúso para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas.
<b>Reúso para fins ambientais</b>	Utilização de água de reúso para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente.
<b>Reúso para fins industriais</b>	Utilização de água de reúso em processos, atividades e operações industriais.
<b>Reúso na aquicultura</b>	Utilização de água de reúso para a criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos.

Fonte: Resolução CNRH nº 54 (2005).

Foi promulgada em 2011, a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 430, de 13 de maio de 2011, com o objetivo de estabelecer condições e padrões para lançamento de efluentes (Brasil, 2011). O termo “reúso” foi citado apenas uma vez, no artigo 27, que diz que as fontes poluidoras devem proceder ao reúso sempre que possível e adequado.

O uso eficiente de água foi contemplado, no ano de 2019, com acréscimo consistente no arcabouço normativo de referência através da publicação das seguintes Normas Técnicas da ABNT: NBR 16782:2019 – Conservação de água em edificações; NBR 16783:2019 - Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações e NBR 15527:2019 - Água de chuva e aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis (ABNT NBR 16782:2019; ABNT NBR 16783:2019; ABNT NBR 15527:2019).

A Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020 atualiza o marco legal do saneamento básico no país. Essa lei aborda o reúso de água de forma importante e destacada, além de colocar a “produção de água para reúso” anteriormente ao “lançamento no meio ambiente” aponta para uma tendência, podendo auxiliar de maneira importante a mudança de cultura em termos de reutilização de água no país (Brasil, 2020).

Avaliando as legislações a nível nacional, na região Nordeste, a Bahia, através do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CONERH), estipulou a Resolução Estadual nº 75 de

2010 (Governo Do Estado Da Bahia, 2010), que estabelece procedimentos para disciplinar a prática de reúso direto não potável de água, na modalidade “reúso para fins agrícolas e/ou florestais: aplicação de água de reúso para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas”. No Estado do Ceará, com a Lei n.º 16.033 de 2016 (Governo Do Estado Do Ceará, 2016), dispõe sobre a política de reúso de água não potável no Estado, estabelecendo critérios com o objetivo de viabilizar e estimular a prática de reúso da água localmente. Essa Lei proíbe o uso de água de reúso para o abastecimento humano e define as modalidades de reúso de água para fins: urbanos, agrícolas, florestais, ambientais, industriais e da aquicultura.

No Sul do país, o Estado do Paraná possui a Lei nº 11.552 de 2012 (Governo Do Estado Do Paraná, 2012), que dispõe sobre a obrigatoriedade do reúso de água no município de Londrina, em edificações residenciais e comerciais, a partir das águas cinzas das próprias edificações (reúso local ou interno). As disposições dessa lei se aplicam às obras novas e de ampliação e/ou reformas que tenham consumo de volume igual ou superior a 20 m<sup>3</sup> de água por dia. Essa Lei apresenta os parâmetros de qualidade definidos pela NBR nº13.969/97 (ABNT NBR 13969:1997).

No Estado do Rio de Janeiro a Lei nº 7.424 de 2016 (Governo Do Estado Do Rio De Janeiro, 2016), define a utilização da água de reúso para as finalidades de agricultura, irrigação de áreas verdes, etc. A Lei nº 7599 de 24 maio de 2017 dispõe sobre a obrigatoriedade das indústrias situadas no Estado de instalarem equipamentos de tratamento e reutilização de água (Governo Do Estado Do Rio De Janeiro, 2017). No Espírito Santo, a Lei nº 10.487 de 2016 (Governo Do Estado Do Espírito Santo, 2016) dispõe sobre o programa de reúso de efluentes das estações de tratamento de esgotos (ETE), reduzindo a utilização de água potável nos processos industriais que não requerem elevadas exigências de potabilidade. Essa Lei cria incentivos que permitem que o Executivo estadual estabeleça mecanismos de estímulo para que as empresas públicas e privadas de grande porte e potencialmente poluidoras invistam na implementação do programa de utilização de água de reúso proveniente de ETE.

Em São Paulo, a Lei nº 16.174 de 2015 estabelece regras e medidas para fomento ao reúso de água para aplicações não potáveis, oriundas do polimento do efluente final do tratamento de esgoto, da recuperação de água de chuva, da drenagem de recintos subterrâneos e de rebaixamento de lençol freático. A Lei determina que a água de reúso seja destinada para: lavagem de pisos, pátios e logradouros públicos; lavagem de lagos e fontes ornamentais;

lavagem de caminhões e carretas de resíduos sólidos e pátios de transbordo de resíduos sólidos urbanos; lavagem de fachadas e jateamento para sua recuperação e envidraçamento; operações de rescaldo após incêndios, realizadas por bombeiros; na construção civil, em perfurações unidirecionais, em serviços de pavimentação asfáltica e lavagem de veículos (Prefeitura Da Cidade De São Paulo, 2015b). A Lei nº 16.174/2015 determina que a qualidade da água de reúso deva seguir os parâmetros de qualidade físico-química e microbiológica compatíveis com as aplicações previstas e normas aplicáveis, porém não indica a legislação ou norma vigente para ser seguida como referencial.

A Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01, de 13 de fevereiro de 2020 – disciplina o reúso direto não potável de água proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário para fins urbanos no Estado de São Paulo (Brasil, 2021). A Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01, de 13 de fevereiro de 2020 (São Paulo, 2020) definiu as seguintes modalidades para a água de reúso para fins urbanos para o estado de São Paulo a exemplo da CNRH nº 54 (Resolução CNRH nº 54/2005) irrigação paisagística, lavagem de logradouros e outros espaços públicos e privados, construção civil; desobstrução de galerias de água de chuva e rede de esgotos, lavagem de veículos e combate a incêndio. Além disso, separa a água de reúso em duas categorias: Classe A – Reúso Irrestrito Não Potável e Classe B – Reúso Restrito Não Potável (Tabela 6). Define, também, padrões de qualidade a serem atendidos de acordo com as categorias de água de reúso, além dos padrões de lançamento de efluentes estabelecidos pelas legislações ambientais específicas (Tabela 7).

Tabela 6 – Classes e modalidades previstas na Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01, de 13 de fevereiro de 2020.

<b>Classe</b>	<b>Modalidades</b>
<b>A - Reúso Irrestrito Não Potável</b>	I - irrigação paisagística;
	II - lavagem de logradouros e outros espaços públicos e privados;
	III - construção civil;
	IV - desobstrução de galerias de água e rede de esgotos;
	V - lavagem de veículos;
	VI - combate a incêndio.
<b>B - Reúso Restrito Não Potável</b>	I - irrigação paisagística;
	II - lavagem de logradouros e outros espaços públicos e privados;
	III - construção civil;
	IV - desobstrução de galerias de água e rede de esgotos;
	V - lavagem de veículos;

Fonte: São Paulo (2020).

Tabela 7 – Padrões de qualidade para as categorias de água de reúso modalidades previstas na Resolução Conjunta SES/SIMA n° 01, de 13 de fevereiro de 2020.

Parâmetro	Unidade de Medida	Categoriais de Água de Reúso	
		Classe A	Classe B
		Reúso Irrestrito Não potável	Reúso Restrito Não Potável
pH	-	6 a 9	6 a 9
DBO <sub>5,20</sub>	mg/L	≤ 10	≤ 30
Turbidez <sup>(1)</sup>	NTU	≤ 2 ≤ 0,2 para sistema de filtração por membrana	-
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	≤ 0,5 para sistema de filtração por membrana	≤ 30
Coliformes termotolerantes ou <i>E.coli</i>	UFC/100mL	Não detectável	≤ 200
Ovos de helmintos ou Ovos viáveis de <i>Ascaris sp.</i>	Ovos/L	Não detectável < 1 < 0,1	≤ 120 1 0,1
Cloro Residual Total (CRT) <sup>(2)</sup>	mg/L	≥ 1 ≥ 0,5 para sistema de filtração por membrana	≥ 1
<i>Giardia e Cryptosporidium</i>	(o) cistos/L	Não detectável	-
Cloreto <sup>(3)</sup>	mg/L	≤ 106	≤ 350
Condutividade elétrica (CE) <sup>(3,4)</sup>	dS/m	≤ 0,7	≤ 3,0
RAS <sup>(3,4)</sup>	-	< 3	3-9
Boro <sup>(3)</sup>	mg/L	≤ 0,7	≤ 2,0

(1) O critério de Turbidez deve ser respeitado antes da desinfecção. Esse critério deve ser baseado na média das medições horárias da Turbidez dentro de um período de 24 horas. Nenhuma medição horária deve exceder 5 NTU. (2) Esse critério aplica-se somente quando o cloro é usado como desinfetante primário, e deve ser atendido após um tempo de contato mínimo de 30 minutos (ou tempo equivalente para atender os critérios microbiológicos). Outros tratamentos que não utilizem o cloro serão aceitos para desinfecção, desde que tenham eficiência semelhante. Para uso em irrigação paisagística, o valor de CRT não deverá ultrapassar 5 mg/L (≤ 5 mg/L). (3) Parâmetros exigidos exclusivamente para uso em irrigação paisagística. (4) A fim de minimizar problemas de permeabilidade dos solos, o critério da RAS deverá ser interpretado em conjunto com a Condutividade Elétrica (CE).

Fonte: São Paulo (2020).

Especificamente, no Município de Campinas/ São Paulo, a Resolução Conjunta SVDS/SMS n° 09/2014 estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para o reúso direto não potável de água proveniente de estações de tratamento de esgoto de sistemas

públicos para fins de usos múltiplos no município. Tal resolução estabelece sete modalidades de reúso direto não potável da água para fins urbanos e industriais e divide as águas de reúso em duas classes: Classe A e Classe B (Tabela 8).

Tabela 8 – Padrões de qualidade para as categorias de água de reúso modalidades previstas pela Resolução Conjunta SVDS/SMS nº 09/2014.

Parâmetro	Unidade de Medida	Categorias de Água de Reúso	
		Classe A	Classe B
<b>Coliformes termotolerantes ou <i>E.coli</i></b>	UFC/100mL	100	200
<b><i>Giardia e Cryptosporidium</i></b>	(o) cistos/L	-	0,05
<b>Ovos de helmintos</b>	Ovos/L	-	< 1
<b>Turbidez</b>	NTU	1	5
<b>DBO<sub>5,20</sub></b>	mg/L	5	30
<b>Sólidos Suspensos Totais</b>	mg/L	5	30
<b>Cloreto Total</b>	mg/L	250	250
<b>Sódio</b>	mg/L	200	200
<b>Cloro Residual Total (CRT)*</b>	mg/L	Mínimo de 1,5	Máximo de 3,0
<b>Cloro Residual Livre (CRL)*</b>	mg/L	Mínimo de 1,0	Máximo de 2,0

(\*) Após 30 min de tempo de contato  
Fonte: Campinas (2014).

## 2.5 Tratamento Avançado de Efluentes Líquidos

A fim de que os efluentes tratados atinjam uma qualidade necessária para reúso se faz necessário, muitas vezes, adicionar técnicas de tratamento avançado após as etapas de tratamento convencional (Rodrigues e Bernardes, 2018). Diversas são as tecnologias disponíveis para a obtenção de água de reúso/efluente tratado com elevada qualidade. A definição da tecnologia irá depender do tipo de água que se deseja obter. Contudo, a que for adotada deve seguir os requisitos mínimos de qualidade da água, com o objetivo principal de reduzir o risco de contaminação, seja física, química e/ou microbiológica (Brasil, 2013). Segundo Santos e Cruz (2008), a qualidade da água está diretamente subordinada ao tipo de tratamento empregado. A Tabela 9 apresenta as principais tecnologias empregadas no tratamento avançado (ou terciário) de efluentes líquidos.

Tabela 9 – Tecnologias avançadas de tratamento de efluentes líquidos.

<b>Tratamento Avançado de Efluentes Líquidos</b>		
<b>Tecnologia</b>	<b>Tipos</b>	<b>Descrição</b>
Processos de Oxidação Avançada (POA)	1 - Ozonização; 2 - Fotocatálise; 3 - Fenton e Fenton-like; 4 - H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV 5 - Ozonização Catalítica; 6 - Eletro-oxidação.	Utiliza oxidantes altamente reativos para degradar contaminantes orgânicos e inorgânicos.
Processos de separação por membranas	1 - Microfiltração (MF); 2 - Ultrafiltração (UF); 3 - Nanofiltração (NF); 4 - Osmose inversa (OI).	Utiliza membranas semipermeáveis para separar contaminantes.
Processos de adsorção	1 - Carvão ativado; 2 - Resinas de troca iônica; 3 - Zeólitas; 4 - Argilas ativadas; 5 - Materiais poliméricos.	Utiliza materiais adsorventes para remover contaminantes.
Troca iônica	1- Resinas quelantes 2 - Resinas seletivas 3 - Resinas macroporosas 4 - Adsorventes poliméricos 5 - Adsorventes híbridos à base de polímeros	Utiliza resinas para remover impurezas carregadas positivamente ou negativamente.

Fonte: Adaptado de Oller; Malato e Sánchez-Pérez (2011); Amorim *et al.* (2009); Aziz *et al.* (2004); Schneider e Tsutiya (2001); Chen *et al.* (2000).

Os Processos Oxidativos Avançados (POA) são tecnologias consolidadas e efetivas de tratamento de água e efluentes para a remoção de poluentes orgânicos não removidos em técnicas convencionais de tratamento de efluentes, devido a sua elevada estabilidade química e/ou baixa biodegradabilidade (Oller; Malato e Sánchez-Pérez, 2011). Os POA são processos de degradação de contaminantes via geração *in situ* de espécies radicalares à base de oxigênio, como radical hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ) (Jovic *et al.*, 2013). Nos POA, os radicais hidroxilas podem ser produzidos utilizando agentes oxidantes como o ozônio (O<sub>3</sub>) e o peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) combinado ou não com a radiação ultravioleta (UV). Além das combinações desses agentes oxidantes e uso da radiação UV (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>/UV, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV), bem como utilização do peróxido de hidrogênio com íons ferrosos no processo denominado reagente de Fenton (Amorim; Leão; Moreira, 2009).

A elevada reatividade do  $\bullet\text{OH}$  é a principal vantagem atribuída a sua utilização, uma vez que ele é prontamente consumido por meio da degradação de um amplo espectro de poluentes. Entretanto, essa vantagem é também um inconveniente, pois, como os radicais hidroxilas são não seletivos, eles também reagem com espécies não poluentes. Dessa forma, uma vez formados, esses radicais podem ser perdidos por meio da reação com espécies matriciais. Matrizes comuns incluem ácidos húmicos e fúlvicos presentes em águas naturais, assim como espécies inorgânicas presentes nos efluentes. Devido às concentrações relativamente elevadas dessas espécies, a reação com os poluentes requer, geralmente, a formação de uma grande quantidade de radicais. Este fato é a maior limitação da degradação dos poluentes pelo POA, principalmente pelo Fenton, aumentando a demanda por peróxido de hidrogênio e resultando no aumento dos custos do processo (Lindsey *et al.*, 2003).

Além da cloração, os processos de ozonização e radiação ultravioleta vêm sendo empregados na desinfecção de efluentes devido ao seu caráter fortemente oxidante e elevada atividade antimicrobiana (Camilo Júnior *et al.*, 2019; Masschelein *et al.*, 1989; Guo *et al.*, 2009; Zewde *et al.*, 2019), o que permite o ajuste dos parâmetros do efluente. A desinfecção é comumente empregada durante a produção de água industrial. A presença de microrganismos na água tende a levar a formação de biofilmes, ou seja, populações bacterianas fixadas nas superfícies de equipamentos, tubulações, etc. capazes de diminuir a eficiência do processo, afetar negativamente e provocar perdas econômicas (Sauer, 2007; Machado, 2004).

O uso de processos de separação por membranas (PSM) no tratamento de efluentes tem aumentado significativamente nas últimas décadas, sendo que nos países europeus essa tecnologia tem sido amplamente empregada como tratamento e/ou pós-tratamento de efluentes. Os PSM utilizam como barreira seletiva membranas sintéticas semipermeáveis. Conceitualmente, a membrana é definida como uma barreira semipermeável que separa duas fases homogêneas e restringe parcial ou totalmente o transporte de uma ou mais espécies químicas presentes nas fases (Habert *et al.*, 2006).

As membranas podem ser classificadas de acordo com a sua estrutura, em duas grandes categorias: densas ou porosas, sendo a classificação definida a partir da característica da superfície da membrana que está em contato com a solução. Nos processos que utilizam membranas porosas, como microfiltração (MF), ultrafiltração (UF) e nanofiltração (NF), a força motriz é o gradiente de pressão através da membrana e o transporte é fundamentalmente convectivo. A capacidade seletiva da membrana, neste caso, depende das relações entre o

tamanho das espécies e as dimensões dos poros da membrana. Nos processos que utilizam membranas densas, como pervaporação e osmose inversa (OI), o transporte das espécies ocorre por mecanismo difusivo e a força motriz é o gradiente de concentração ou de pressão de vapor através da membrana. A seletividade é função da afinidade das espécies com o material da membrana e de seus coeficientes de difusão (Baker, 2012). Os PSM apresentam inúmeras vantagens, tendo em vista que as membranas têm eficiência para separar partículas sólidas de dimensões pequenas e compostos orgânicos e inorgânicos dissolvidos. Na Figura 5 são apresentados os processos de MF, UF, NF e OI em função da magnitude da pressão operacional e dimensão das moléculas e partículas separadas.

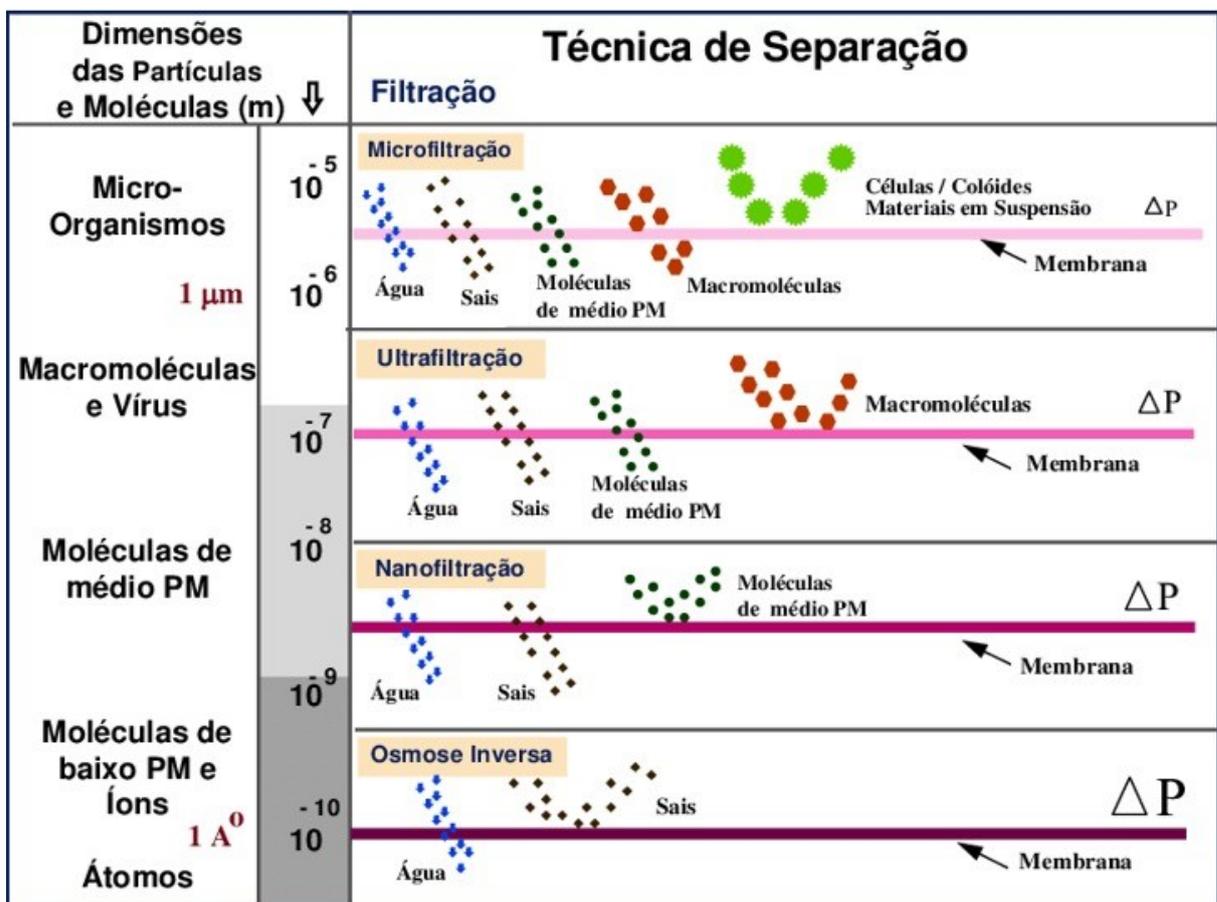


Figura 5 – Partículas e moléculas retidas de acordo com o tipo de processo de separação por membranas. Fonte: Habert et al. (2006).

Os principais processos de membranas na área de tratamento de águas residuárias consistem na aplicação da MF, UF, NF e OI. Esses processos podem ser classificados por: (1) tipo de material que a membrana é fabricada, (2) natureza da força externa aplicada, (3) mecanismo de separação, (4) diâmetro dos poros da membrana e (5) tamanho nominal das partículas que são separadas (Metcalf e Eddy, 2016) (Tabela 10).

Tabela 10 – Características típicas dos processos de membrana aplicados para tratamento de águas.

Tipo de Processo	Diâmetro de poros	Pressão de Operação (bar)	Fluxo de permeado (L. m <sup>-2</sup> . h <sup>-1</sup> )	Tipos de elementos removidos	Empresas Fornecedoras
Microfiltração	Macroporos (>50 nm)	< 2	17-67	Sólidos Suspensos Totais, turbidez, protozoários, cistos, algumas bactérias e vírus	<i>Osmonics, Dow, Pall, Koch, USfilter</i>
Ultrafiltração	Mesoporos (2-50 nm)	1 – 10	17-33	Macromoléculas, coloides, a maioria das bactérias, alguns vírus e proteínas	<i>Dow, Hydranautics, Koch, Norit, Pall e Zenon</i>
Nanofiltração	Microporos (<2 nm)	5 – 35	10-35	Pequenas moléculas (íons bivalentes), dureza e vírus	<i>Dow, Film Tec, Hydranautics, Tripsep, Osmonics, Toyobo</i>
Osmose Inversa	Densa (< 2nm)	15 – 150	12-20	Moléculas muito pequenas (íons monovalentes), cor, dureza, sulfatos, nitratos, sódio e outros íons	<i>Dow, Film Tec, Hydranautics, Tripsep, Osmonics, Koch, Trisep, Toray</i>

Fonte: Metcalf e Eddy (2003) (Adaptado).

Para a utilização dos sistemas de tratamento por PSM é necessária a utilização de módulos de membranas. De acordo com Schneider e Tsutyia (2001), o módulo é um sistema básico que possibilita a utilização das membranas como unidade de separação. Os constituintes de um módulo de membrana incluem: membranas, estruturas de suporte de pressão (vácuo ou corrente elétrica) e canais de alimentação e remoção do concentrado e do permeado (Schneider e Tsutyia, 2001).

A escolha do melhor tipo de membrana, módulo e configuração mais adequados é analisada caso a caso, sendo baseada, geralmente, em estudos com plantas pilotos de modo a minimizar o efeito de deterioração da membrana. O desempenho das membranas é avaliado pela seletividade, propriedades mecânicas, químicas e estabilidade térmica do material. Além disso, a morfologia e a natureza do material que a constitui definem o tipo de aplicação e a eficiência da separação (Baker, 2012; Habert et al., 2006).

O uso de tecnologias de membrana, como MF, UF, NF e OI nos processos terciários para reciclagem e reutilização de água aumentou ao longo dos anos. Essas tecnologias de membrana têm sido bem recebidas por muitas indústrias devido a elevada eficiência de remoção de contaminantes, construção modular e alta produtividade (Yang et al., 2020). É notório o uso de tecnologias de membrana em combinação com outros processos para

reciclagem e reutilização de água em diferentes indústrias, como petróleo e gás (Zolghadr et al., 2021), celulose e papel (Manttari et al., 2015), processamento de laticínios e soja (Wang e Serventi, 2019) e drenagem ácida de minas (Naidu et al., 2019).

As tecnologias de MF, UF e NF são utilizados como pré-tratamento da água de alimentação da OI para a redução dos problemas de incrustação das membranas e remoção da matéria coloidal e substâncias orgânicas dissolvidas (Yu, 2017; Venzke et al., 2018b; Qasim et al., 2019). A OI é uma das tecnologias mais adequadas para alcançar a qualidade requerida para reuso industrial devido ao seu alto desempenho na remoção de sais (Tang, 2014; Jafarinejad, 2019). O processo combinado de UF e OI é muito utilizado no tratamento de águas residuais, devido a sua alta eficiência para a remoção de compostos orgânicos e sais presentes nos efluentes industriais (Haidari, 2018; Kamali, 2019).

No tratamento de efluentes, a adsorção é aplicada na etapa de polimento final, utilizada quando há necessidade de tratamento com qualidade mais elevada, após tratamento biológico ou tratamento físico-químico à base de coagulação/floculação/sedimentação e filtração (Silva Filho, 2009). De acordo com Foust et al. (1982), o processo de adsorção envolve mecanismos de transferência de massa de uma substância/polvente (adsorvato ou adsorbato) de um fluido (gás ou líquido) para a superfície de um sólido (adsorvente ou adsorbente). O carvão ativado é um material adsorvente largamente utilizado na etapa de polimento final na produção de água de reuso industrial (Danish, 2018; Adin e Asano, 1998). A adsorção com carvão ativado é um processo utilizado para a remoção de material orgânico solúvel residual (Teodusiu et al., 1999), quando são requeridos água com elevado grau de pureza (Mancuso, 2007).

O processo de troca iônica (TI) também é utilizado na indústria para a produção de água com elevado grau de pureza, tratando efluentes que contenham espécies iônicas dissolvidas, como metais ( $Al^{+3}$ ,  $Pb^{+2}$ ,  $Sr^{+2}$ , entre outros), ânions ( $F^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $CN^-$ ) e ácidos orgânicos (fenóis, compostos carboxílicos, etc.) (Mierzwa e Hespanhol, 2005; Flynn, 2009). A TI é baseada no fenômeno da troca de íons de mesma carga entre um meio e uma solução eletrolítica. O meio pode ser uma resina, que geralmente é feita de uma matriz polimérica complexa entrelaçada (Kitchener, 1957; Helfferich, 1962). As resinas de troca iônica (RTI) são utilizadas para abrandamento da água e produção de água ultrapura (Osborn, 1961; Zagorodni, 2007). As vantagens das RTIs incluem a simplicidade de operação e o fato de não haver necessidade de energia para que o fenômeno de troca ocorra. As limitações das

RTIs incluem a capacidade limitada de troca da resina e o consumo de produtos químicos para a sua regeneração (Goldemberg e Johansson, 2004; ExxonMobil, 2004).

Nos últimos anos, o interesse por processos híbridos ou uso combinado de resinas de troca iônica e processos de membranas aumentou substancialmente, derivado da necessidade de otimização geral do processo e/ou redução de custos. Além disso, uma combinação de várias tecnologias de tratamento de água é promovida um alto nível de tratamento e purificação da água (Stoquart et al., 2012; Gao et al., 2011; Chen et al., 2007). Vários estudos no final da década de 1970 destacaram o forte potencial das resinas de troca aniônica (RTA) e encontraram que RTA superou o carvão ativado (Boening, Beckmann, Snoeyink, 1980) e as resinas não iônicas (Anderson e Maier, 1979) na redução de compostos orgânicos. A alta eficiência das RTA para a redução de compostos orgânicos e matéria orgânica dissolvida indica que a integração de RTA com processos de membrana pode ser uma solução eficaz para melhorar a qualidade da água tratada e a durabilidade das membranas (Humbert et al., 2005; Bolto et al., 2002; Boyer e Singer, 2005).

Destaca-se que para definir o melhor método para o tratamento de efluentes e produção de água de elevada qualidade é necessário realizar análises que levem em consideração a caracterização da água residuária, os requisitos regulatórios, análise de viabilidade técnica e econômica, análise do desempenho operacional e entre outros (Von Sperling, 1996; Metcalf e Eddy, 2003; Tao e Hills, 1999, Wukovits; Harasek e Friedl, 2003). A Tabela 11 apresenta as principais vantagens e limitações das tecnologias de tratamento de comumente usadas como polimento na remoção de poluentes remanescentes.

Tabela 11 – Vantagens e limitações das tecnologias de tratamento discutidas nesta secção.

Tecnologia	Vantagens	Limitações
<b>Microfiltração (MF)</b> <b>Ultrafiltração (UF)</b> <b>Nanofiltração (NF)</b> <b>Osmose inversa (OI)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande variedade de membranas comerciais disponíveis de vários fabricantes, grande número de aplicações e configurações de módulo;</li> <li>• Construção modular;</li> <li>• Elevada eficiência de separação de uma ampla gama de contaminantes;</li> <li>• Possibilidade de ser seletivo para metais;</li> <li>• Ampla gama de aplicações reais: clarificação ou filtração estéril (MF), separação de polímeros (UF), íons multivalentes (NF), dessalinização e produção de água pura (osmose inversa).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método não destrutivo;</li> <li>• Custo de capital elevado para pequenas e médias indústrias;</li> <li>• Demanda energética, operação e manutenção (<i>fouling</i> das membranas);</li> <li>• Pouco atrativo para baixas concentrações de soluto na alimentação;</li> <li>• Requer destinação do concentrado de membrana.</li> </ul>
<b>Processos de oxidação avançado (POA) e ozonização</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralização dos poluentes;</li> <li>• Não há produção de lodo (exceto reagente Fenton);</li> <li>• Eficiente para moléculas recalcitrantes (corantes, hormônios, fármacos, etc.);</li> <li>• Aumento da biodegradabilidade de compostos recalcitrantes;</li> <li>• Destruição eficiente de cianeto e sulfetos (ozonização);</li> <li>• Desinfecção da água (radiação UV e ozonização)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requer produtos químicos;</li> <li>• Requer pré-tratamento da água residuária;</li> <li>• Economicamente inviável para indústrias de pequeno e médio porte;</li> <li>• Riscos inerentes a manipulação de reagentes químicos;</li> <li>• Formação de subprodutos de maior ecotoxicidade;</li> <li>• Produtividade limitada.</li> </ul>
<b>Oxidação química (Cl<sub>2</sub>, ClO<sub>2</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efetividade na desinfecção das águas;</li> <li>• Garanti presença de residual desinfectante;</li> <li>• Aceitação pública;</li> <li>• Flexibilidade e custo-benefício.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencial formação de subprodutos;</li> <li>• Requer ajuste do pH da água;</li> <li>• Exigências de armazenamento e riscos de manuseio.</li> </ul>
<b>Oxidação química (Cl<sub>2</sub>, ClO<sub>2</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efetividade na desinfecção das águas;</li> <li>• Garanti presença de residual desinfectante;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencial formação de subprodutos;</li> <li>• Requer ajuste do pH da água;</li> </ul>

**Troca iônica**  
**Resinas quelantes**  
**Resinas seletivas**  
**Resinas macroporosas**  
**Adsorventes poliméricos**  
**Adsorventes híbridos à base de polímeros**

- Aceitação pública;
  - Flexibilidade e custo-benefício.
- 
- Ampla gama de produtos comerciais disponíveis de vários fabricantes;
  - Tecnicamente simples (equipamento simples);
  - Procedimentos bem estabelecidos e testados;
  - Fácil controle e manutenção;
  - Fácil de usar com outras técnicas (por exemplo precipitação e filtração em um processo integrado de processo integrado de águas residuais);
  - Pode ser aplicado a diferentes regimes de fluxo (contínuo e em batelada);
  - Processo rápido e eficiente;
  - Produz um efluente tratado de alta qualidade;
  - Eficiente para remoção de metais tóxicos;
  - Seletivo para determinados metais (com resinas adequadas) e redução da concentração na ordem de ppb;
  - Atrativo para a recuperação de metais valiosos.
- 
- Exigências de armazenamento e riscos de manuseio.
  - Método não destrutivo;
  - Restrições econômicas (custo inicial da resina seletiva, custos de manutenção, regeneração, entre outros);
  - Grande volume de efluente requer colunas de maiores dimensões;
  - Saturação e entupimento das colunas de troca iônica;
  - Saturação do trocador de cátions antes da resina aniônica (precipitação de metais e entupimento da coluna);
  - Requer pré-tratamento do efluente – físico-químico (*e.g.*, filtração com areia ou adsorção com CA) para remoção de componentes potencialmente obstrutores das colunas de troca iônica;
  - Desempenho sensível ao pH do efluente;
  - Resinas convencionais não são seletivas;
  - Resinas seletivas têm uso comercial limitado;
  - Não são eficazes para certos poluentes-alvo (corantes dispersos, medicamentos, entre outros);
  - Requer destinação das resinas.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste tópico são apresentados os materiais e métodos que foram utilizados para a elaboração do presente trabalho. Inicialmente, a estação de tratamento de esgoto sanitário (estudo de caso) é apresentada. Em seguida, a metodologia para cálculo do índice de qualidade de efluente é descrito. Por fim, o procedimento utilizado para a proposição de rotas de tratamento complementar do efluente líquido visando a produção de água para uso industrial é exposta.

#### **3.1 Estudo de caso**

A estação de tratamento de esgotos sanitários (estudo de caso) está localizada no município de Campinas, São Paulo (SP) ( $22^{\circ}57'24.28''\text{S}$ ,  $47^{\circ}13'17.75''\text{O}$ ) (Figura 6). A ETE do estudo de caso atende a região centro-oeste do município de Campinas pertencente à bacia do Rio Capivari. O município de Campinas possui aproximadamente 1,2 milhões de habitantes. O atual sistema de esgotamento sanitário é administrado pela Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S.A (SANASA), responsável pelo atendimento de 99,84% da população com água potável encanada, coleta e tratamento do esgoto de 96,42% da população e tratamento de 90,04% do esgoto da cidade (SANASA, 2023).

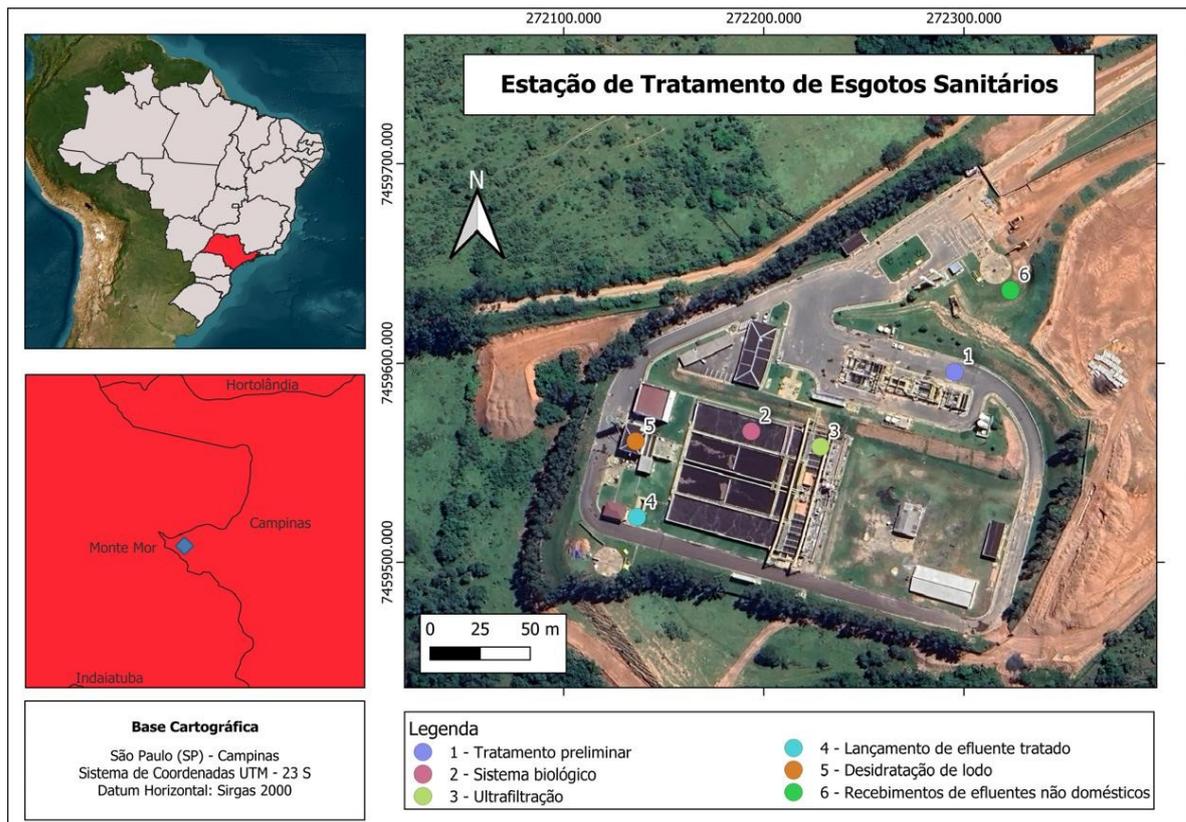


Figura 6 – Localização da Estação de Tratamento de Esgotos Sanitários. Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A ETE do estudo de caso atende diretamente 72 bairros, com população de aproximadamente de 175 mil habitantes, possui vazão média de captação de esgoto bruto de 365 L/s e tem a capacidade de receber até 5 L/s de contribuição referente a efluentes líquidos industriais. A estação de tratamento do presente estudo de caso é dividida nas seguintes operações unitárias: (1) tratamento preliminar; (2) sistema biológico; (3) ultrafiltração; (4) lançamento do efluente tratado; (5) desidratação de lodo e (6) recebimento de efluentes não domésticos (Figura 6).

A Figura 7 representa um diagrama de blocos com as etapas de tratamento de esgotos da estação do estudo de caso. Na Figura 7 é possível observar em mais detalhes as operações e processos unitários do tratamento, a ordem de cada etapa, a entrada do esgoto bruto, assim como a saída do efluente final.

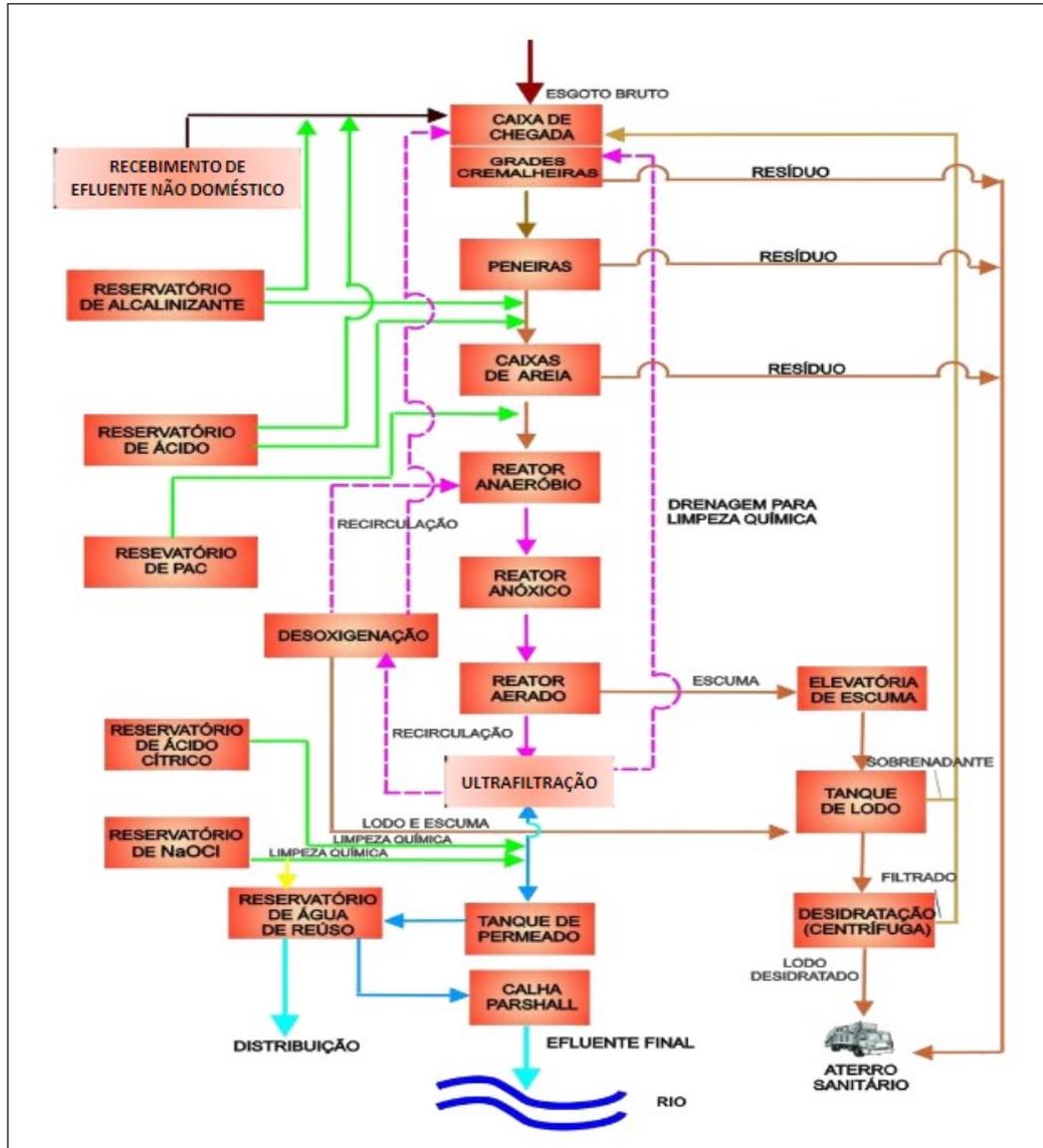


Figura 7 – Diagrama de blocos com as etapas de tratamento da estação do estudo de caso. Fonte: SANASA, 2023.

Assim que o esgoto chega à unidade, ele passa por um pré-tratamento que é constituído de três etapas, respectivamente, as grades cremalheiras, seguida de peneiras rotativas e por fim o desarenador. As grades cremalheiras possuem uma malha de 15 mm de espaçamento para a remoção de partículas grosseiras. Isso só é possível, pois a ETE recebe o esgoto de estações elevatórias, onde nelas já foi realizada toda a etapa de remoção de sólidos grosseiros em grades com espaçamento de 20 a 30 mm (médio a grosseiro) (SANASA, 2023).

Após o peneiramento, há duas linhas de peneiras rotativas cuja abertura da malha é de 2 mm para a remoção de qualquer partícula que possa seguir para as próximas etapas e vir a prejudicar os sistemas de tratamento posteriores. A última etapa do pré-tratamento é o processo de desarenação (5,0 x 5,0 m) com raspador de fundo e parafuso classificador.

Após o pré-tratamento, o esgoto é direcionado para o processo de tratamento secundário, composto por sistema de biorreatores com membranas (MBR) do tipo externo/submerso. Isto é, no processo MBR, as membranas são acopladas externamente ao tanque de aeração e submersas no efluente líquido. Inicialmente, o esgoto pré-tratado é direcionado para uma câmara anaeróbia para a remoção do fósforo, depois segue para a câmara anóxica e, posteriormente, para a câmara aeróbia (Figura 8). O lodo biológico é recirculado do tanque de aeração para o tanque anaeróbio e, em seguida, para o anóxico. A idade do lodo é de aproximadamente 21 dias, o tempo de retenção hidráulica (TRH) da câmara aerada é de aproximadamente 10 horas (SANASA, 2023).

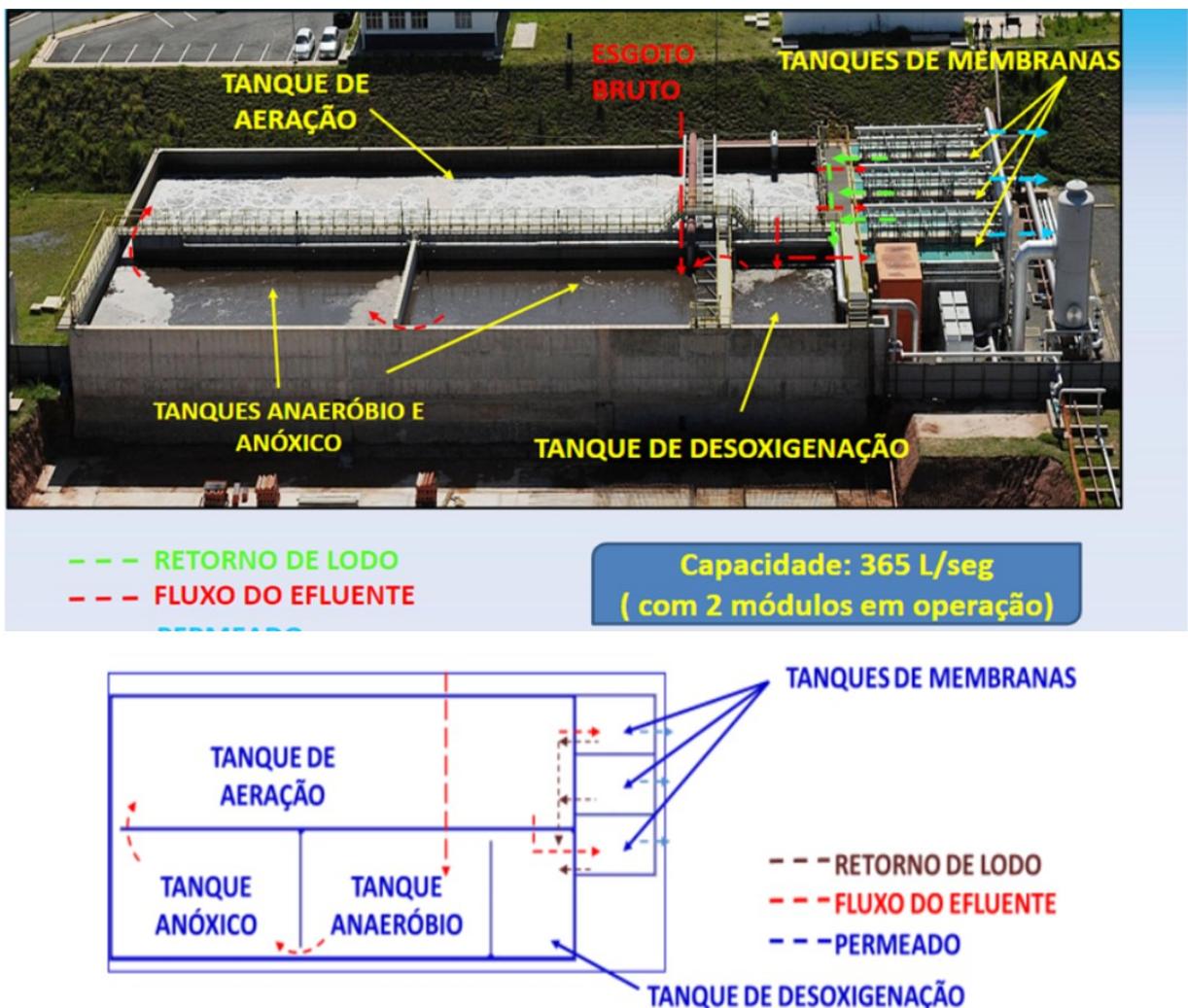


Figura 8 – Biorreatores com membranas externo/submerso. Fonte: Adaptado de SANASA, 2023.

Após o tratamento biológico aeróbio, o efluente é direcionado para tanques com membranas de ultrafiltração submersas. O lodo excedente do processo biológico é desidratado em centrífugas que são responsáveis pelo processo de deságue do lodo. Por fim, o lodo

desidratado é encaminhado para disposição final em aterro sanitário. Diariamente são realizados ensaios de pH, cor, turbidez, sólidos sedimentáveis e sólidos totais, uma vez que a ETE requer o monitoramento de todos esses parâmetros para o funcionamento adequado (SANASA, 2023).

Após o processo de tratamento do esgoto, parte do efluente tratado é direcionado para um reservatório subterrâneo. Posteriormente, a água subterrânea é bombeada para um reservatório elevado. No reservatório, ocorre a dosagem de cloro. Após desinfecção, a água é utilizada para apagar incêndios, irrigação de parques, praças e jardins, limpeza de ruas, entre outros usos menos restritivos (SANASA, 2023). O excedente da água é descartado no Rio Capivari, manancial superficial de água doce Classe II de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005.

### **3.2 Obtenção dos dados de caracterização dos efluentes bruto e tratado**

Os dados de caracterização físico-química do efluente sanitário bruto e tratado foram disponibilizados, com autorização prévia de uso para fins acadêmicos, pela companhia de saneamento básico que administra a estação de tratamento de esgoto (ETE) – SANASA. Destaca-se que o presente estudo de caso foi selecionado com base na robustez do sistema de tratamento de esgotos adotado na estação, o qual é capaz de fornecer água com grau de qualidade superior a outros sistemas de tratamento convencional, além da confiabilidade e disponibilidade dos dados.

O período de análise foi de janeiro de 2021 a novembro de 2022. Os dados disponibilizados representam os resultados de caracterização mensal dos efluentes. Pelo menos dois resultados mensais dos parâmetros analisados foram disponibilizados para avaliação no presente estudo (Apêndices A e B).

Segundo comunicação pessoal (2024), a caracterização dos efluentes da ETE é realizada com base nos parâmetros de poluição de efluentes líquidos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, publicado pela *American Public Health Association* (APHA), *American Water Works Association* (AWWA) e *Water Environment*

*Federation* (WEF) (2012), a saber: potencial hidrogeniônico (pH) (Método 4500-H+), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO<sub>5</sub>) (Método 5210-B), Demanda Química de Oxigênio (DQO) (Método 5220-D), nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) (Método 4500-NH<sub>3</sub>), Nitrogênio Total de Kjeldahl (NTK) (Método 4500-Norg), fósforo total (P-total) (Método 4500-P), nitrato (Método 4500-NO<sub>3</sub>) e turbidez (Método 2130-B) (APHA; AWWA; WEF, 2012). A Tabela 12 resume os parâmetros físico-químicos do esgoto bruto e tratado avaliados no presente estudo.

Tabela 12 – Período e parâmetros físico-químicos e microbiológicos analisados no presente estudo.

Período de análise	Parâmetros físico-químicos	
	Esgoto sanitário	Efluente tratado
Mensal – janeiro/2021 a novembro/2022	pH, DBO <sub>5</sub> , DQO, N-NH <sub>3</sub> , NTK, P-total,	pH, DBO <sub>5</sub> , DQO, N-NH <sub>3</sub> , NTK, P-total, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , turbidez

DBO<sub>5</sub> = Demanda bioquímica de oxigênio (5 dias). DQO = Demanda química de oxigênio. N-NH<sub>3</sub> = Nitrogênio amoniacal. NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = nitrato. NTK = Nitrogênio total Kjeldahl. pH = potencial hidrogeniônico. P-total = fósforo total.

### 3.3 Qualidade dos efluentes da estação de tratamento de esgotos

#### 3.3.1 Índice de qualidade de efluente (IQE)

Vários índices de qualidade de efluentes foram desenvolvidos para avaliar o desempenho das estações de tratamento e adequação da água para determinado uso (Ganguly and Dewan 2020; Jamshidzadeh and Tavangari Barzi 2020). O índice de qualidade de efluente (IQE), em inglês Wastewater Quality Index (WWQI), é representado por um valor numérico que descreve a qualidade geral da água e sua adequação para diferentes fins. A estimativa do IQE permite converter parâmetros físico-químicos e microbiológicos de poluição das águas em um valor numérico que categoriza a água, facilitando a tomada de decisão no gerenciamento dos efluentes (Arabzadeh et al. 2023).

Neste trabalho, o cálculo do IQE foi realizado com base no método do índice aritmético ponderado (Brown et al., 1972; Kothari et al., 2021). No total, seis parâmetros

físico-químicos de caracterização do efluente bruto e tratado no período de janeiro/2021 a novembro/2022 foram considerados no cálculo do IQE, a saber: demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>3</sub>), fósforo total (P-total), nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e turbidez.

A Equação 1 foi utilizada para estimativa do IQE (Brown et al., 1972; Kothari et al., 2021).

$$IQE = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times Q_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Onde  $w_i$  denota o peso unitário do  $i$ -ésimo parâmetro,  $Q_i$  denota a classificação de qualidade da água do  $i$ -ésimo parâmetro e  $(n)$  denota o número de parâmetros envolvidos no cálculo.

A classificação da qualidade da água ( $Q_i$ ) foi calculada de acordo com a Equação 2.

$$Q_i = 100 \times \left( \frac{V_i - V_{id}}{S_i - V_{id}} \right) \quad (2)$$

$V_i$  é o valor determinado experimentalmente do  $i$ -ésimo parâmetro;  $V_{id}$  refere-se ao valor típico do  $i$ -ésimo parâmetro em água pura; o valor típico para todos os parâmetros é zero (0), exceto para o parâmetro pH, que é 7 (Brown et al., 1972; Kothari et al., 2021).  $S_i$  denota o valor padrão de descarte permitido para o  $i$ -ésimo parâmetro.

O  $w_i$  é inversamente proporcional ao valor padrão de descarte ( $S_i$ ) para cada parâmetro (Equação 3).

$$w_i = \frac{K}{S_i} \quad (3)$$

Onde  $K$  é a constante de proporcionalidade, calculada de acordo com a Equação 6.

$$K = \frac{1}{\sum 1/S_i} \quad (4)$$

No presente estudo, o valor padrão ( $S_i$ ) adotado para DBO<sub>5</sub> e N-NH<sub>3</sub> foram 120 mg/L e 20 mg/L – limites de descarte para esgoto sanitário de acordo com a Resolução CONAMA nº 430/2011, apesar de não ser exigível o parâmetro nitrogênio amoniacal total (art. 21, § 1º) (Brasil, 2011). Na ausência de limites específicos para o parâmetro  $i$ -ésimo ( $S_i$ ) na Resolução CONAMA nº 430/2011, consideraram-se os limites para condições de água doce classe 1, especificados na Resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005). Isso ocorreu porque o

lançamento de efluentes em corpos d'água não pode exceder as condições e padrões de qualidade da água estabelecidos para as respectivas classes (Art. 12) (Brasil, 2011). A categoria classe 1 foi escolhida por possuir parâmetros mais restritivos de qualidade. Especificamente, adotaram-se os limites de turbidez (40 NTU) e coliformes termotolerantes (200 NMP/100 mL). Para DQO,  $\text{NO}_3^-$  e P-total, os valores de Si adotados foram 200 mg/L, 5 mg/L e 6 mg/L, respectivamente (Ganguly and Dewan 2020; Jamshidzadeh and Tavangari Barzi 2020).

O critério de qualidade foi estabelecido a partir da classificação de água de reúso da SVDS/SMS nº 09/2014 (Campinas/SP). Os parâmetros  $\text{DBO}_5$ , turbidez e coliformes termotolerantes foram considerados para cálculo do IQE (Tabela 13).

Tabela 13 - Índice de qualidade de efluente e classe de água de reúso correspondente calculado a partir da SVDS/SMS nº 09/2014 (Campinas/SP).

$\text{DBO}_5$ mg/L	Turbidez (NTU)	Coliformes termotolerantes	<b>Categoria</b>	<b>IQE</b>
		(NMP/100 mL)		
120 (Si)	40 (Si)	200 (Si)		
5	1	100	Classe A	$\leq 9$
30	5	200	Classe B	$\leq 27$

Si = valor-padrão de referência.

O cálculo do IQE dos efluentes bruto e tratado foi realizada no período de janeiro/2021 a novembro/2022 e a qualidade das águas foi confrontada com os padrões de reúso urbano Classe A ( $\text{IQE} \leq 9$ ) e Classe B ( $\text{IQE} \leq 27$ ). Observou-se que os valores de IQE obtidos e definidos como critério de classificação de água de reúso Classe A e B, seguindo os padrões de enquadramento da SVDS/SMS nº 09/2014 (Campinas/SP), foram condizentes com as faixas de valores de classificação das águas da literatura (Tabela 14) (Ibrahim 2019).

Tabela 14 - Índice de qualidade de efluente e classe de água de reúso correspondente calculado a partir da SVDS/SMS nº 09/2014 (Campinas/SP).

<b>Faixa</b>	<b>Qualidade</b>
$\text{IQE} \leq 25$	Excelente
$25 < \text{IQE} \leq 50$	Boa
$50 < \text{IQE} \leq 75$	Ruim
$75 < \text{IQE} \leq 100$	Péssima
$\text{IQE} > 100$	Água inadequada para uso, sendo necessário o seu tratamento.

Fonte: Adaptado de Ibrahim (2019).

### 3.3.2 Análise estatística

O teste Shapiro-Wilk foi utilizado para analisar a normalidade dos dados, isto é, os valores dos parâmetros de qualidade das águas e do índice de qualidade de efluente (IQE) calculado no período de janeiro/2021 a novembro/2022. O teste de Mann-Whitney U foi preferido para dois grupos independentes (IQE<sub>i</sub> e IQE<sub>f</sub>), verificando a diferença significativa ao empregar o teste de hipótese.

Os dados obtidos foram analisados de forma descritiva pelo cálculo das médias, mínimos, máximos e desvio padrão. Foram elaborados gráficos e tabelas para facilitar a visualização e a interpretação dos resultados. Empregaram-se gráficos do tipo *boxplot* para a análise visual da dispersão do conjunto de resultados obtidos para o índice de qualidade do efluente (IQE) dos esgotos bruto e tratado.

As análises estatísticas foram realizadas no *software* JAMOVI (versão 2.3.18) com nível de significância ( $\alpha$ ) igual a 5% ( $\alpha = 0,05$ ).

### 3.3.3 Considerações e limitações

As seguintes considerações foram assumidas para a avaliação proposta:

- No presente estudo, os parâmetros de qualidade das águas utilizados na estimativa do índice de qualidade do efluente (IQE) das classes de água de reúso da SVDS/SMS nº 09/2014 (Campinas/SP) foram demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>), turbidez e coliformes termotolerantes. Os parâmetros utilizados no cálculo do IQE do esgoto bruto foram DBO<sub>5</sub>, demanda química de oxigênio (DQO) e nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) e fósforo total (P-total). Os parâmetros nitrato (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) e turbidez foram incluídos no cálculo do IQE do efluente tratado. A metodologia proposta por Brown et al. (1972) faz uso de nove parâmetros de qualidade de água (pH, temperatura, oxigênio dissolvido, DBO<sub>5</sub>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, P-total, sólidos totais, turbidez e coliformes termotolerantes). A abordagem adotada no presente estudo foi fundamentada na disponibilidade de

dados de caracterização dos efluentes e existência de valor-padrão de referência (Si) para estimativa dos índices.

- Os valores de pH dos efluentes bruto e tratado não foram incluídos no cálculo dos índices de qualidade de efluente devido à baixa periodicidade de análise desse parâmetro pela estação estudo de caso, uma vez que não há variação dos valores dentro da faixa típica para esgotos sanitários. Assim, não foram disponibilizadas no período de análise (jan./2021 – nov./2022), um número de observações do parâmetro pH suficiente para a sua inclusão na estimativa dos índices. Em contrapartida, outros parâmetros de qualidade das águas, tais como, DQO e N-NH<sub>3</sub>, foram considerados no presente estudo.
- Destaca-se que a dificuldade de padronizar os parâmetros de qualidade da água para calcular os valores dos IQE neste trabalho deve-se ao fato de que os parâmetros definidos na normativa de reúso do Município para a estação de tratamento de esgoto do estudo de caso não coincidem com os parâmetros monitorados. Além disso, conforme destacado por Ganguly e Dewan (2020), a maioria das estações de tratamento de esgoto monitora apenas um número limitado de parâmetros de caracterização dos efluentes, dificultando a padronização no cálculo dos índices propostos.

### **3.4 Propostas para produção de água industrial**

Considerando o escopo da pesquisa e os valores dos índices de qualidade calculados, rotas de tratamento complementar foram propostas visando o acréscimo de valor agregado a água tratada pela estação de tratamento de esgotos estudo de caso. A rota de tratamento adicional visa a purificação do esgoto tratado para a obtenção de água para uso industrial (*e.g.*, fluido de resfriamento/ aquecimento e matéria-prima).

As rotas foram definidas com base no estado-da-arte relacionado ao tratamento avançado de águas para uso industrial. O processo de busca da literatura científica foi realizado utilizando a base de dados Scopus. A Scopus foi selecionada devido aos seus

métodos de indexação de citações bem estabelecidos e para garantir que as publicações selecionadas tivessem sido revisadas por pares antes da publicação.

Uma busca inicial usando as palavras-chave em inglês “wastewater treatment” (tratamento de água residuária) e “water treatment” (tratamento de água) e “advanced treatment” (tratamento avançado) e “industrial water” (água industrial) forneceu 111 documentos (29/05/2024). A triagem dos documentos foi realizada utilizando os critérios de elegibilidade e exclusão. Os critérios de elegibilidade compreenderam a seleção de documentos categorizados como artigos de pesquisa e artigos de revisão da literatura publicados de 2022 até a data presente (29/05/2024). A exclusão de artigos publicados em idiomas diferentes do inglês e do português fez parte dos critérios de exclusão. No total foram encontrados 27 documentos que foram revisados detalhadamente. Por fim, os principais estudos foram selecionados para fundamentar as rotas propostas no presente trabalho.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Diagnóstico da qualidade dos efluentes da estação de tratamento de esgotos**

O pH do esgoto bruto e do efluente tratado no período monitorado variou na faixa de 7,1 a 7,6. Essa condição encontra-se dentro do esperado para o esgoto bruto, cuja faixa é de neutro a ligeiramente ácido (6 a 7). Enquanto o esgoto tratado pode ter um pH mais próximo da neutralidade (6,5 a 8,5), uma vez que o processo de tratamento muitas vezes envolve ajustes de pH para otimizar a eficiência dos processos de tratamento biológico e químico, a fim de atender à conformidade com os padrões de descarga (Jordão e Pessôa, 2017; Henze et al., 2008). A Tabela 15 apresenta a caracterização físico-química dos efluentes bruto e tratado do estudo de caso no período de janeiro de 2021 a novembro de 2022 e os respectivos valores do índice de qualidade do efluente (IQE).

Tabela 15 – Caracterização dos efluentes bruto e tratado do estudo de caso no período de janeiro de 2021 a novembro de 2022.

Período	Parâmetro													
	DBO <sub>5</sub> (mg/L)		DQO (mg/L)		NH <sub>3</sub> -N (mg/L)		NTK (mg/L)		P-total (mg/L)		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)		Turbidez (NTU)	
	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado
Jan./2021	250	1	630	22	26	0,01	72	2	7	1		8,36		0,25
Fev./2021	232	1	579	19	17	0,03	53	4	7	1		7,29		0,28
Mar./2021	303	1	664	24	47	0,04	65	1	8	1		7,34		0,27
Abr./2021	164	1	391	20	35	0,16		1	8	0,2		7,96		0,22
Mai./2021	296	1	651	25	53	0,08		2	12	1		6,63		0,32
Jun./2021	239	1	575	18	60	0,60	70	3	11	1		7,94		0,27
Jul./2021	401	1	657	30	55	0,06	92	1	11	10		6,28		0,29
Ago./2021	218	1	497	28	53	0,10		2	10	1		8,79		0,21
Set./2021	513	1	677	23	51	0,26	98	1	12	3		7,59		0,19
Out./2021	333	1	903	17	64	0,13		6	11	5		7,76		0,27
Nov./2021	356	1	750	22	66	0,08		1	10	2		9,63		0,28
Dez./2021	447	1	739	23	93	0,03		2	14	3		10,86		0,21
Jan./2022	383	1	706	26	83	0,01	97	2	12	2		10,62		0,30
Fev./2022	385	1	779	22	71			2	11	4		7,01		0,52
Mar./2022	400	1	755	18	81			2	11	9		3,36		0,15
Abr./2022	496	1	828	32	84	0,10	98	14	14	9		13,90		0,28
Mai./2022	365	1	750	24	88	0,27		7	13	2		7,06		0,25
Jun./2022	438	1	719	23	57	0,01	91	8	12,8	3		8,78		0,22
Jul./2022	336	1	797	27	65	0,09		3	10	2		8,46		0,26
Ago./2022	392	1	788	21	71	0,04	97	3	12	3		8,70		0,28
Set./2022	314	1	673	31	60	0,08	68	3	11	3		7,31		0,31
Out./2022	244	1	586	35	70	0,01		2	9	5		7,95		0,38
Nov./2022	247	1	592	33	68	0,02						6,30		0,29

DBO<sub>5</sub> = Demanda bioquímica de oxigênio (5 dias). DQO = Demanda química de oxigênio. N-NH<sub>3</sub> = Nitrogênio amoniacal. NTK = Nitrogênio total Kjeldahl.

O esgoto bruto tratado pela estação de estudo de caso apresenta elevadas concentrações de demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>), nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>3</sub>), fósforo total (P-total) e nitrogênio total de Kjeldahl (NTK), cujas concentrações médias do período monitorado são 337 mg/L, 62 mg/L, 11 mg/L e 82 mg/L, respectivamente. Considerando somente o parâmetro demanda química de oxigênio (DQO), o esgoto bruto afluente à estação estudo de caso é classificado como médio, com a concentração média ao longo do período analisado em 682 mg/L. Tais concentrações estão dentro da faixa média de concentração dos parâmetros do esgoto brasileiro, conforme observado em CETESB (2024), ABES (2024), Mierzwa (2009), Potier e Pons (2006) e Von Sperling (2005).

Em relação ao sistema de tratamento do estudo de caso, observou-se que o sistema de tratamento avançado por biorreatores com membranas (MBR, do inglês, *membrane biological reactor*) da estação do estudo de caso foi capaz de manter eficiências de remoção de DBO<sub>5</sub> superiores a 99% durante todo o período de análise. Nesse sentido, o sistema de tratamento por MBR do presente estudo de caso manteve eficiências de remoção de DBO<sub>5</sub>, N-NH<sub>3</sub>, NTK e turbidez compatíveis com os valores apresentados por Schneider e Tsutiya (2001). De acordo com os autores, o efluente tratado por MBR apresentam valores de DBO<sub>5</sub>, N-NH<sub>3</sub> e turbidez iguais a < 2 mg/ L, 0,3 mg/ L e 1 NTU, respectivamente.

O sistema MBR da estação de estudo de caso foi capaz de manter eficiências de remoção de DQO superiores a 94% durante todo o período analisado. Essa remoção demonstrou-se superior aos processos biológicos convencionais, conforme observado por Neto e Costa (2011) e apresentado por Von Sperling (2018) e Jordão e Pessôa (2017). Em relação aos valores médios de remoção observados em outros sistemas MBR, os resultados estão dentro do esperado, pois estudos e aplicações práticas demonstram que o sistema MBR pode alcançar eficiências de remoção de DQO entre 94% e 99%, dependendo das condições operacionais e da configuração específica do sistema (Henze et al., 2008; Von Sperling, 2018; Neto e Costa, 2011; Jordão e Pessôa, 2017; Metcalf e Eddy, 2016).

O estudo de Hosseinzadeh et al. (2013) indicou que o efluente tratado pelo sistema piloto de MBR apresentou uma qualidade satisfatória para uso como água de alimentação de osmose inversa (OI). Os resultados demonstraram remoções de 75% de DQO, 98% de SST, 74% de nitrogênio total (NT), 99,9% de coliformes totais e índice de obstrução por partícula (SDI, do inglês, *silt density index*) inferior a 3 na maioria das vezes. O resultado de remoção de 75% de DQO pelo sistema piloto de MBR no estudo de Hosseinzadeh et al. (2013) é comparável ao resultado de remoção de 94% de DQO pela ETE no estudo de caso, durante o período analisado. Portanto, a água tratada pela ETE no estudo de caso possui potencial para

ser utilizada como água de alimentação para sistemas de osmose inversa (OI), visando à produção de água para reúso industrial.

No Brasil, um exemplo prático é o AQUAPOLO, que utiliza o esgoto tratado pela Estação de Tratamento de Esgoto ABC da Sabesp (ETE-ABC) como seu principal insumo. O AQUAPOLO tem capacidade de produzir até 1.000 litros de água de reúso por segundo, utilizando tecnologias avançadas de tratamento de efluentes. As etapas unitárias de tratamento do AQUAPOLO consistem no recebimento de uma parte do efluente da ETE-ABC, que é direcionado para o sistema de filtração, composto por uma bateria de filtros tipo disco. Em seguida, o efluente segue para a Estação de Produção de Água Industrial, onde são utilizados processos biológicos anóxicos e aeróbios por meio de um reator biológico tipo carrossel. Posteriormente, é feita a separação física do lodo ativado com membranas de ultrafiltração. Parte da água é desviada para um polimento final por meio da tecnologia de osmose reversa (Calijuri, Cunha e Fernandes, 2019).

A média da concentração de  $\text{NO}_3^-$  no efluente tratado da ETE do estudo de caso foi de 8,08 mg/L, com mínimo e máximo de 3,36 mg/L e 13,90 mg/L, respectivamente. Concentrações de  $\text{NO}_3^-$  superiores a 5 mg/L no esgoto tratado podem ocasionar problemas de desnitrificação no decantador secundário em sistema de lodo ativado convencional, sendo essa concentração variável e dependente das condições operacionais e do projeto específico da estação de tratamento de águas residuárias. O fenômeno de desnitrificação no decantador secundário é favorecido principalmente quando há condições anóxicas, ou seja, baixa concentração de oxigênio e elevada concentração de nitrato, permitindo que os microrganismos reduzam o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) a nitrogênio gasoso ( $\text{N}_2$ ) (Metcalf e Eddy, 2016; Henze et al., 2008; Tchobanoglous et al., 2003; Jordão e Pessôa, 2017).

A desnitrificação no decantador secundário é capaz de gerar transtornos operacionais de flotação/arraste de lodo biológico e redução da eficiência de tratamento de remoção de contaminantes, pois os gases de  $\text{N}_2$  formados se agregam aos flocos biológicos e, por diferença de massa específica, são arrastados juntamente com o efluente clarificado. Tal situação não é capaz de gerar os problemas apontados na estação estudo de caso, quando o sistema MBR está em condições normais de operação e quando projetado e operado adequadamente (Metcalf e Eddy, 2016; Henze et al., 2008; Judd, 2010; Le-Clech, Chen e Fane, 2006; Meng, Zhang e Zhou, 2017).

Constata-se ainda que o esgoto tratado pela ETE do estudo de caso apresenta um potencial para uso na fertirrigação devido às concentrações médias de  $\text{NO}_3^-$  e P-total, ao longo do período analisado, serem 8,08 mg/L e 3,31 mg/L, respectivamente. Essa

concentração de nutrientes está em conformidade com os resultados da análise de concentração de nutrientes na água residuária utilizada na fertirrigação, de acordo com Malafaia et al. (2015) e Neto et al. (2011). Diferentes estudos têm apontado para o potencial uso de águas residuárias na agricultura, devido ao fato dessas águas aportarem nutrientes que trazem benefícios ao desenvolvimento vegetal (Fonseca et al., 2005a; 2005b; Leal et al., 2011; Fonseca et al., 2011; Andrade-Filho et al., 2013; Bonini et al., 2014; Silva et al., 2014; Monteiro et al., 2014). Para Hespanhol (2003), as águas residuárias oriundas de esgotos domésticos contêm nutrientes cujos teores atendem, se não toda, pelo menos boa parte das necessidades nutricionais das plantas em geral.

O reúso do esgoto tratado por sistema de MBR em sistemas de fertirrigação apresenta um grande potencial por diversos motivos como baixa turbidez, elevada qualidade microbiológica e presença de nutrientes ( $\text{NO}_3^-$ , NTK, P-total) (Tabela 13). No entanto, é crucial assegurar que o efluente tratado atenda às normas e regulamentações locais para o uso de águas residuárias em irrigação agrícola, principalmente em relação aos parâmetros microbiológicos (e.g., coliformes termotolerantes e ovos de helmintos) (Metcalf e Eddy, 2003; Judd, 2006; Asano et al., 2007; Henze et al., 2008; International Water Association (IWA), 2024; United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2024).

Por fim, destaca-se que o sistema de tratamento avançado demonstrou desempenho superior a processos biológicos convencionais em operação em outras estações municipais de tratamento de esgotos sanitários do Estado de São Paulo, tais como, Ribeirão Preto (lodo ativado) (95-98%), Mogi Mirim (lodo ativado com aeração prolongada) (96,1%), Sertãozinho (lagoa de estabilização) (49%), Leme (lagoa aerada e decantador secundário) (85%) e Catanduva (lagoa aerada de mistura completa e lagoa de decantação) (91,5%) (Nakamura et al., 2023). Além disso, os biorreatores com membranas produziram efluentes de melhor qualidade quando comparado ao sistema convencional por lodos ativados das ETE de Ribeirão Preto(SP) e Mogi Mirim (SP). Nessas ETE foram reportados valores de fósforo total correspondente a 100 mg/L nos efluentes tratados (Nakamura et al., 2023).

## **4.2 Índice de qualidade dos esgotos bruto e tratado**

Os valores dos parâmetros físico-químicos de caracterização do esgoto bruto e o índice de qualidade de efluente bruto (IQEi) no período analisado apresentaram distribuição normal (Tabela 16). Em contraste, para o efluente tratado, os valores dos parâmetros de caracterização e o índice de qualidade do efluente tratado (IQEf) apresentaram distribuição não normal, com exceção do parâmetro DQO que apresentou distribuição aproximadamente normal (Tabela 17).

Tabela 16 – Análise descritiva dos parâmetros de qualidade do esgoto bruto e índice de qualidade do efluente bruto.

	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>N-NH<sub>3</sub> (mg/L)</b>	<b>P-total (mg/L)</b>	<b>IQEi</b>
n	23	23	23	22	23
Média	337	682	62,65	10,77	208
DP	92	114	18,89	2,02	44
Shapiro-Wilk p	0,799	0,818	0,516	0,225	0,495

DBO = demanda bioquímica de oxigênio. DQO = demanda química de oxigênio. IQEi = índice de qualidade do efluente bruto. N-NH<sub>3</sub> = nitrogênio amoniacal. P-total = fósforo total.

Tabela 17 – Análise descritiva dos parâmetros de qualidade e índice de qualidade do efluente tratado.

	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>N-NH<sub>3</sub> (mg/L)</b>	<b>P-total (mg/L)</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	<b>NTK (mg/L)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>IQEf</b>
n	23	23	23	23	23	22	23	23
Média	1	24	0,10	3,31	8,08	3,27	0,27	5
Mínimo	1	17	0,01	0,20	1,99	1	0,15	4
Máximo	1	35	0,60	10,00	3,36	14	0,52	10
Shapiro- Wilk p	–	0,287	<0,001	0,041	<0,001	<0,001	0,003	<0,001

DBO = demanda bioquímica de oxigênio. DQO = demanda química de oxigênio. IQEf = índice de qualidade do efluente tratado. N-NH<sub>3</sub> = nitrogênio amoniacal. NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = nitrato. NTK = nitrogênio total de Kjeldahl. P-total = fósforo total.

Na Tabela 18 é apresentado os valores do IQEi e IQEf no período de janeiro/2021 a novembro/2022.

Tabela 18 – IQE dos esgotos bruto e tratado calculados no período de janeiro/ 2021 a novembro/ 2022.

Período	Índice de Qualidade do Efluente	
	IQEi	IQEf
Jan./2021	146	4
Fev./2021	129	4
Mar./2021	180	4
Abr./2021	121	4
Mai./2021	196	4
Jun./2021	183	4
Jul./2021	212	7
Ago./2021	163	5
Set./2021	231	5
Out./2021	233	5
Nov./2021	221	5
Dez./2021	272	6
Jan./2022	243	6
Fev./2022	236	5
Mar./2022	246	5
Abr./2022	280	10
Mai./2022	253	4
Jun./2022	231	5
Jul./2022	221	5
Ago./2022	241	5
Set./2022	204	5
Out./2022	188	6
Nov./2022	159	5

IQEi = índice de qualidade do efluente bruto. IQEf = índice de qualidade do efluente tratado.

Durante o período analisado, a estação de tratamento de esgotos produziu efluente tratado classificado como água de reúso urbano Classe A ( $IQE \leq 9$ ), com exceção do mês de abril de 2022. Nesse mês, o índice de qualidade de efluente tratado (IQEf) foi estimado em 10, sendo, portanto, o efluente categorizado como água de reúso Classe B ( $IQE \leq 27$ ). Observa-se que o IQE pode ser utilizado como uma ferramenta para classificação dos efluentes gerados na estação, dispensando a necessidade de avaliação individual dos diferentes parâmetros de caracterização das águas (Ganguly and Dewan 2020). Considerando o presente estudo de caso, o índice poderia ser utilizado para categorização dos efluentes tratados e destinação da água aos usos correspondentes as respectivas classes de água estabelecidas pelo Município de Campinas (São Paulo, Brasil).

Na Figura 9 é apresentado o *boxplot* dos valores do IQEi e IQEf no período de análise desse estudo.

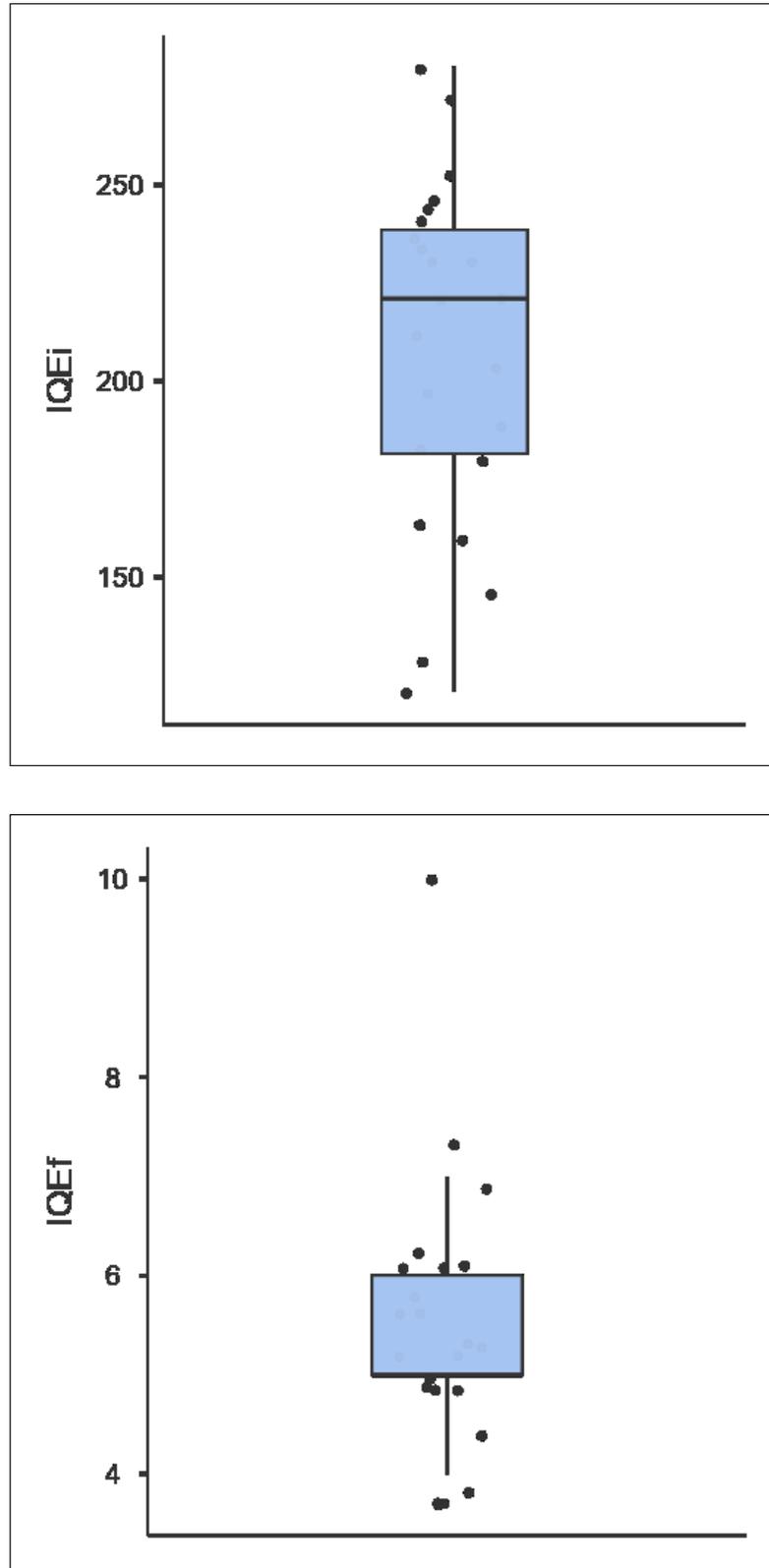


Figura 9 – Índice de qualidade dos efluentes bruto e tratado no período de janeiro/ 2021 a novembro/ 2022. IQEi = índice de qualidade do efluente bruto. IQEf = índice de qualidade do efluente tratado.

A partir da análise dos gráficos *boxplot* do IQE, considerando os valores do primeiro quartil (Q1) e terceiro quartil (Q3), bem como o intervalo interquartil (Q3-Q1), observa-se

que 50% dos valores de IQEi estão entre 185,5 e 242. Em relação ao IQEf, 50% dos valores estão dentro da faixa de um índice de qualidade do efluente entre 4 e 5. O IQEi e IQEf no período de análise (jan./2021 – nov./2022) apresentaram diferença estatística significativa (p-valor < 0,001). O efluente tratado da ETE do estudo de caso foi classificado como água de reúso urbano Classe A ( $IQE \leq 9$ ), com exceção do mês de abril de 2022. Tal fato sugere que o tratamento avançado da água produzida pela ETE em estudo para reúso nas indústrias poderia requerer menor consumo energético e uso de produtos químicos no tratamento quando comparado ao tratamento da água captada do Rio Capivari localizado próximo a ETE. Há vários exemplos práticos ao redor do mundo e no Brasil de estações de tratamento de efluentes que produzem água de alta qualidade para reúso, como relatado por Asano et al. (2007), Jimenez e Asano (2008), Besene Piveli (2021), Araujo. e Leite, (2022), CETESB (2022), ABES (2022), SABESP (2023) e ANA (2023).

### **4.3 Propostas para polimento final do esgoto tratado**

A água reutilizada desempenha um papel crucial no ciclo da água, pois constitui uma maneira eficaz de melhorar a utilização dos recursos hídricos e pode ajudar a lidar com a crise hídrica. A dessalinização e a recuperação de águas residuárias para reutilização têm sido destacadas como as principais alternativas para obter água para diferentes usos. Os grandes volumes de águas residuárias gerados, devido ao alto consumo de água em residências e indústrias, fazem com que a água de reúso seja uma importante fonte de água complementar (Pérez et al., 2021).

Identificar o tratamento mais adequado em cada situação é um passo crucial para alcançar uma produção mais limpa e econômica de água reutilizada, após integrar aspectos técnicos, econômicos e ambientais (Pérez et al., 2021). Pei et al., (2020) identificaram vários fatores que devem ser considerados antes de selecionar a tecnologia de tratamento de águas residuárias: quantidade e qualidade da água residuária, despesas de construção e operação, grau de dificuldade na construção de engenharia, condições naturais e sociais locais e se há novos conflitos pelo uso da água. Os autores destacaram o nível de tratamento necessário para

alcançar a qualidade necessária para o novo uso como o fator mais importante. Identificar a composição das águas residuárias para o uso pretendido, a fim de cumprir os critérios de qualidade em cada caso também é de extrema importância. Como foi relatado por Yang, J. et al. (2020), diferentes aplicações de reutilização exigem diferentes especificações de qualidade da água, portanto, diferentes tecnologias de tratamento devem ser consideradas em análise inicial.

Nesse sentido, no presente estudo, três rotas de tratamento avançado para o efluente tratado da estação de estudo de caso, com o objetivo de atender a diferentes aplicações de reutilização e diversas exigências de especificações de qualidade da água são apresentadas. A escolha de cada rota foi baseada na metodologia apresentada no item 2.4. O estado-da-arte recente foi analisado para fundamentar as rotas selecionadas, a saber: rota 1 (Figura 10) – inclusão de um sistema de osmose inversa (OI); rota 2 (Figura 11) – polimento do efluente por tecnologia de nanofiltração (NF); rota 3 (Figura 12) – sistema integrado de eletrólise-microfiltração-troca iônica em circuito fechado.

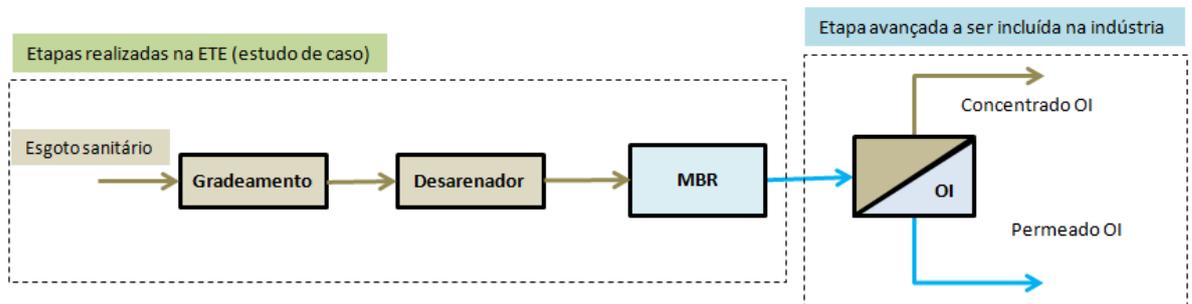


Figura 10 – Rota 1. Fonte: Adaptado de Pérez et al. (2021). OI = Osmose Inversa. MBR = Biorreatores com membranas.

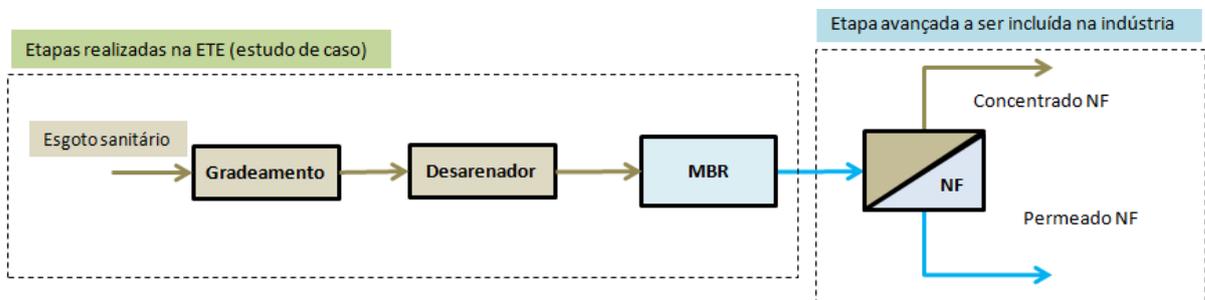


Figura 11 – Rota 2. Fonte: Adaptado de Ahmad et al. (2021). NF = Nanofiltração. MBR = Biorreatores com membranas.

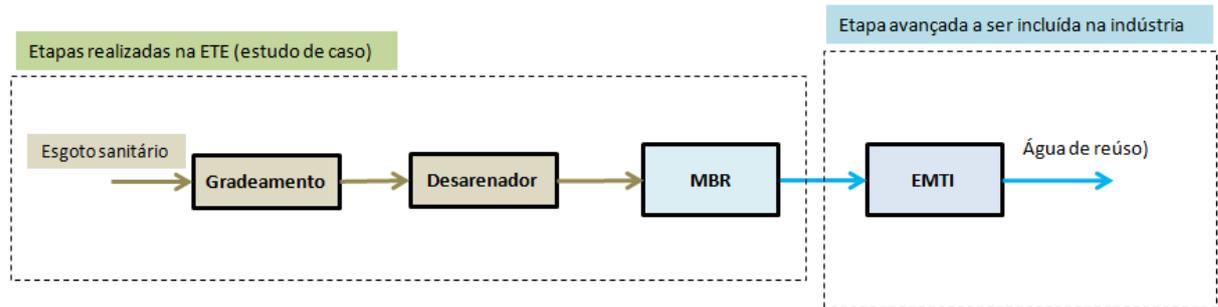


Figura 12 – Rota 3. Fonte: Adaptado de Ba et al. (2023). EMTI = Eletrólise + Microfiltração + Troca Iônica. MBR = Biorreatores com membranas.

A Rota 1 foi proposta com base no trabalho desenvolvido por Pérez et al. (2021) onde um sistema piloto ( $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) com base na combinação dos processos de ultrafiltração (UF) e OI. A combinação dos processos com membranas foi avaliada na estação de tratamento de águas residuais municipais de Vuelta Ostrera, localizada nas proximidades de um polo industrial, para obter água com a qualidade necessária para ser reutilizada industrialmente em conformidade com a legislação espanhola e as necessidades dos usuários industriais. A avaliação econômica apontou para economias importantes nos custos operacionais do processo, quando comparadas ao preço que os usuários industriais pagam pela água de abastecimento público.

A Rota 1 apresenta vantagens significativas, como a redução de custos operacionais para indústrias com alto consumo de água, atendimento aos padrões rigorosos para reutilização industrial isenta de microrganismos, permeado de baixa condutividade e elevada eficiência na remoção de sais, sólidos dissolvidos totais (SDT) e sílica ( $> 99\%$ ). Além disso, alcançou elevada remoção de carbono orgânico total ( $> 90\%$ ) e nitrogênio amoniacal ( $> 80\%$ ). No entanto, enfrenta desafios comuns da OI no tratamento de água, como o *fouling* das membranas, variação na qualidade da água de entrada e redução no fluxo de permeado. Apesar dos processos de limpeza química das membranas, o *fouling* tende a prevalecer no longo prazo, afetando a qualidade do permeado, o que pode ser problemático para aplicações que requerem água de alta pureza, como caldeiras de alta pressão. Além disso, questões relacionadas à disposição do concentrado da OI devem ser consideradas.

Um caso prático que exemplifica a Rota 1 proposta é o Aquapolo, resultado da parceria entre a GS Inima Industrial e a SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). O Aquapolo atende o Polo Petroquímico de Capuava, no ABC Paulista, fornecendo água recuperada com tratamento avançado (MBR + Osmose Inversa), proveniente da ETE ABC, para uso em torres de resfriamento e caldeiras para geração de energia, a um

custo de R\$ 6,00/m<sup>3</sup> a R\$ 7,00/m<sup>3</sup>, enquanto o custo da água disponibilizada às indústrias pela companhia de saneamento é de R\$ 18,84. Altamente automatizado, o Aquapolo tem capacidade para produzir até 1000 litros de água de reuso por segundo. Para condução e distribuição da água produzida, foi construída uma adutora de 17 km, partindo de sua sede em São Paulo, passando pelos municípios de São Caetano do Sul e Santo André, até chegar a uma torre de distribuição em Capuava, município de Mauá, onde está estabelecido o Polo Petroquímico de Capuava (Calijuri, Cunha e Fernandes, 2019; Aquapolo, 2024).

A Rota 2 é proposta com base no trabalho desenvolvido por Ahmad et al. (2021). O estudo de revisão da literatura destacou a aplicação da NF para reciclagem de água, reutilização e recuperação de produtos em diversas indústrias, como têxtil, alimentícia, petróleo e gás, mineração, curtume, farmacêutica, bem como indústria de papel e celulose (Ahmad et al., 2021). O desempenho da NF, seja como processo independente ou integrado com outros processos foi discutido. A NF poderia melhorar a eficiência global do tratamento e minimizar os custos operacionais, tais como, consumo energético, declínio do fluxo permeado e fouling das membranas (Ahmad et al., 2021). Em contrapartida, os autores destacaram que apesar do bom desempenho de recuperação de água em processos integrado com NF, a maioria dos estudos não apresenta uma análise econômica dos processos. Além disso, a análise do custo de economia de água ou produtos químicos após a implementação da reutilização é essencial para convencer as indústrias a investirem no reúso da água. Estudos futuros pautados em uma perspectiva econômica são necessários (Ahmad et al., 2021).

A Rota 3 foi proposta com base no trabalho desenvolvido por Ba et al. (2023). Nesse trabalho, uma célula de eletrólise não dividida foi desenvolvida e testada. A célula demonstrou ser energeticamente eficiente e industrialmente escalonável, apresentando a abstração de íon hidrogênio (H<sup>+</sup>) da camada limite do ânodo poroso de titânio, com consequente produção de efluentes ácidos ou alcalinos no interior da cuba eletrolítica. Em seguida, a célula de eletrólise foi integrada com os processos de microfiltração e troca iônica para o abrandamento da água. Especificamente, a dureza total foi reduzida de 400 mg CaCO<sub>3</sub>/L para 40 mg CaCO<sub>3</sub>/ L. O consumo de energia foi estimado em 1,9 kWh/ kg CaCO<sub>3</sub> removido (condição operacional: densidade de corrente igual a 10 mA/ cm<sup>2</sup>). A resina exaurida do processo de troca iônica poderia ser regenerada com o efluente ácido ou alcalino gerado no ânodo da célula eletrolítica. A salmoura da regeneração das resinas poderia ser reciclada ao processo de eletrólise, evitando o descarte de rejeitos. Os resultados desse estudo demonstraram que o sistema integrado eletrólise + microfiltração + troca iônica poderia

fomentar o reúso em vários setores da indústria juntamente com a produção *in situ* de ácido e base. Porém, estudos ainda se fazem necessários para avaliação do sistema em larga escala (Ba et al., 2023).

A Tabela 19 resume as principais características, vantagens e limitações das três rotas propostas no presente trabalho.

Tabela 19 – Características, vantagens e limitações das rotas 1, 2 e 3.

Tecnologias	Principais características	Vantagens	Limitações	Referência
<b>Osmose Inversa (OI)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vazão de alimentação = 2,25 m<sup>3</sup>/h. Recuperação = 60%, Pressão Transmembrana = 11 bar;</li> <li>A rejeição de sais, sólidos dissolvidos totais e sílica &gt; 99%;</li> <li>Remoção de carbono orgânico total (&gt; 90%) e nitrogênio amoniacal (&gt; 80%);</li> <li>Limpeza química empregada na ocorrência de aumento de pressão igual a 10% do valor inicial;</li> <li>Dosagem de 8 mL/ m<sup>3</sup> de anti-incrustante comercial foi empregado;</li> <li>Potencial de uso na produção de água para geração de vapor em caldeiras de baixa e média pressão;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Redução dos custos operacionais para indústrias que utilizam grandes volumes de água;</li> <li>Atende os níveis mais exigentes para reutilização industrial (ausência de microrganismos) para águas utilizadas como fluido de resfriamento/ aquecimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Qualidade do permeado está diretamente relacionada com a qualidade da água de alimentação;</li> <li>Fouling das membranas, declínio do fluxo permeado, custo de limpeza e substituição dos módulos de membranas</li> <li>Custos variam a depender da localização da planta;</li> <li>A qualidade do permeado não atendeu aos requisitos de água ultrapura para caldeiras de alta pressão na geração de energia térmica;</li> <li>Destinação do concentrado da osmose inversa.</li> </ul>	Pérez et al. (2021)
<b>Nanofiltração (NF)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maior seletividade para íons divalentes/polivalentes, permitindo a permeação de íons monovalentes e moléculas de massa molecular &lt; 100 Da;</li> <li>NF é conhecida como membranas com um tamanho de poro de cerca de 1 nm, além de possuir um corte de massa molecular de 300–500 Da e rejeição de sal na faixa de 10 a 30% para sais monovalentes como NaCl e 80 a 100% para sais divalentes como Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reciclagem de água, reutilização e recuperação de produtos;</li> <li>Maior fluxo permeado e produtividade;</li> <li>Menor consumo energético comparado a osmose inversa (4,1 vs. &lt; 6 kWh/ m<sup>3</sup>) (Panagopoulos 2021; Panagopoulos and Haralambous 2020);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Qualidade do permeado está diretamente relacionada com a qualidade da água de alimentação;</li> <li>Fouling das membranas, declínio do fluxo permeado, custo de limpeza e substituição dos módulos de membranas;</li> <li>Destinação do concentrado da osmose inversa.</li> </ul>	Ahmad et al. (2021); Panagopoulos (2021); Panagopoulos e Haralambous (2020)

- O processo integrado que combina a unidade de membrana com outros processos em um trem de tratamento é uma das estratégias viáveis na mitigação do *fouling* das membranas.

---

**Eletrólise +  
Microfiltração  
+ Troca Iônica**

- Célula de eletrólise foi integrada com os processos de microfiltração e troca iônica;
- Efluentes ácidos e alcalinos gerados na eletrólise têm potencial aplicação na regeneração das resinas exauridas da troca iônica;
- Operação do sistema em circuito fechado: salmoura da regeneração das resinas pode ser recicladas para o processo de eletrólise.

- Elevada remoção de dureza – 90% operando o processo de eletrólise em 10 mA/ cm<sup>2</sup>;
- Consumo energético competitivo - 1,9 kWh/ kg CaCO<sub>3</sub> removido;
- Potencial produção de ácido e base *in situ*;

- Necessita de avaliação em escala industrial. (Ba et al., 2023)
-

## CONCLUSÕES

A estação de tratamento de esgoto (ETE) do estudo de caso recebe um esgoto sanitário bruto com elevadas concentrações de Demanda bioquímica de oxigênio (DBO), Nitrogênio Amoniacal, Fósforo Total e nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e Demanda química de oxigênio (DQO). No período de jan./2021 a nov./2022, os parâmetros nitrogênio amoniacal, fósforo total e NTK apresenta os valores 62 mg/L, 11 mg/L e 82 mg/L, respectivamente. Esses valores indicam que as concentrações estão dentro da faixa média de concentração dos parâmetros do esgoto brasileiro.

A concentração média de  $\text{NO}_3^-$  no efluente tratado pela ETE do estudo de caso foi de 8,08 mg/L, com valores mínimo e máximo de 3,36 mg/L e 13,90 mg/L, respectivamente. Dessa forma, o sistema MBR é o recomendado para o tratamento de esgotos com elevadas concentrações de nutrientes que durante o processo biológico de tratamento deixa residual elevado de nitrato.

Durante o período de janeiro de 2021 a novembro de 2022, a avaliação do Índice de Qualidade de Efluente (IQE) revelou que a ETE de estudo produziu água de reúso classe A, com exceção do mês de abril de 2022, em que foi classificada como classe B, conforme estabelecido pela Resolução Conjunta SVDS/SMS N° 09/2014. Ressalta-se que o IQE pode ser uma ferramenta eficaz para avaliar a qualidade dos efluentes de ETE. Essa ferramenta poderia servir como um indicador, simplificando a categorização dos efluentes provenientes de ETE.

Constatou-se que a ETE do estudo de caso produziu efluente tratado das Classes A e B, conforme a Resolução Conjunta SVDS/SMS n° 09/2014, destinado a usos pouco restritivos. Assim, o reúso de esgoto tratado em substituição à captação de água dos mananciais existentes pode ser uma estratégia atrativa tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. A captação e o tratamento de água de baixa qualidade dos mananciais pode ser complexa e onerosa. Nesse contexto, o reúso industrial dos esgotos tratados surge como uma forma de garantir o planejamento hídrico dos polos industriais e o desenvolvimento socioeconômico regional. Além disso, enquanto determinadas atividades industriais exigem padrões restritivos de qualidade da água para a manutenção dos padrões

dos processos produtivos, o setor industrial emprega tecnologias avançadas de tratamento de efluentes.

Verificou-se que a água tratada pelo sistema de MBR da ETE do estudo de caso apresenta o potencial de ser utilizada como água de alimentação de sistemas de OI, devido à remoção média de DQO superior a 94% durante o período analisado. No entanto, é necessário realizar uma verificação e avaliação técnica das eficiências de remoção dos demais parâmetros, como Sólidos Suspensos Totais (SST), Nitrogênio Total (NT), Coliformes Totais (CT) e índice de obstrução por partícula (SDI, do inglês, *silt density index*), da água produzida pela ETE do estudo de caso, para garantir sua certificação como água de alimentação para OI.

As tecnologias de osmose inversa, nanofiltração e sistemas integrados de eletrólise-microfiltração-troca iônica destacam-se como promissoras no tratamento avançado de efluentes para a produção de água industrial, devido à alta qualidade da água produzida. Conclui-se, portanto, que as tecnologias de tratamento avançado mencionadas serão aplicadas conforme os padrões de qualidade exigidos, bem como em função dos aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- As limitações relacionadas ao cálculo dos IQE das categorias de água classe A e B (Resolução Conjunta SVDS/SMS nº 09/2014), do esgoto bruto e efluente tratado foram reconhecidas neste trabalho. Portanto, recomenda-se uma interpretação cuidadosa dos resultados obtidos. Estudos futuros devem considerar a inclusão dos diferentes padrões físico-químicos da água na estimativa dos valores do IQE, bem como uma uniformização dos parâmetros utilizados nos cálculos dos índices de qualidade dos efluentes;
- Realizar estudos de tratabilidade do esgoto tratado por meio das diferentes rotas propostas visando a produção de água industrial;
- Realizar uma avaliação econômica preliminar das rotas de tratamento complementar proposta neste estudo;
- Realizar um estudo de demanda juntamente com o mapeamento dos potenciais usuários de água industrial na região da estação de tratamento de esgotos do estudo de caso. Assim, sugere-se identificar o tratamento mais adequado e compatível com os aspectos técnicos, econômicos e ambientais, a fim de alcançar a qualidade necessária para o novo uso.



## REFERÊNCIAS

- (ABNT) NBR 13969. SET 1997. **Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação.**
- ZAGORODNI, A. A. *Ion Exchange Materials: Properties and Applications*. Elsevier Science, 2007.
- ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Reúso de Água no Brasil: Casos e Potencialidades**. 2023.
- ABRACO (Associação Brasileira de Corrosão), disponível em: <https://abraco.org.br/revistas/ano-19-no-77-mai-jun-jul-ago-2022/>. Acesso em: 02/05/2024.
- ACERO, J. L. et al. **Membrane filtration technologies applied to municipal secondary effluents for potencial reuse**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 177, p. 390-398, 2010.
- ADIN, A.; ASANO, T. **The role of physical – chemical treatment in wastewater reclamation and reuse**. *Water Science and Technology*, v. 37, n. 10, p. 79-90, 1998.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Atlas esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Reúso de Água no Brasil**. 2023.
- AJIERO, I.; CAMPBELL, D. **Benchmarking water use in the UK food and drink sector: case study of three water-intensive dairy products**. *Water Conservation Science and Engineering*, v. 3, n. 1, p. 1-17, 2018.
- ALMEIDA, A. S.; MEDRONHO, R. D. A.; VALENCIA, L. I. O. **Spatial analysis of dengue and the socioeconomic context of the city of Rio de Janeiro (Southeastern Brazil)**. *Revista de Saúde Pública*, 43: 666-673, 2009.
- ALVES, G. P. M.; FONINI, A.; GIRARDELLO, V.; THOMÉ, A. **Caracterização do esgoto sanitário coletado na cidade de Passo Fundo - RS**. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*. n. 10, p. 25 - 29, 2007.

AMORIM, C. C.; LEAO, M. M. M.; MOREIRA, R. F. P. M. **Comparação entre diferentes Processos Oxidativos Avançados para degradação de corante azo.** Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 14, n. 4, p. 543-550, out.-dez. 2009.

ANDRADE-FILHO, J. A.; SOUSA, O. N.; DIAS, N. S.; NASCIMENTYO, I. B.; MEDEIROS, J. F.; COSME, C. R. **Atributos químicos de solo fertirrigado com água residuária no semiárido brasileiro.** Irriga, v. 18, n. 4, p. 661-674, out./dez. 2013. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2013v18n4p661>»<http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2013v18n4p661>

Aquapolo. Quem somos. Disponível em: <https://www.aquapolo.com.br/quem-somos/>. Acesso em: 09 jun. 2024.

ARABZADEH, Morteza et al. **Wastewater Quality Index (WWQI) as an indicator for the assessment of sanitary effluents from the oil and gas industries for reliable and sustainable water reuse.** Groundwater for Sustainable Development, v. 23, p. 101015, April 2023.

ARABZADEH, Morteza et al. **Wastewater Quality Index (WWQI) as an indicator for the assessment of sanitary effluents from the oil and gas industries for reliable and sustainable water reuse.** Groundwater for Sustainable Development, v. 23, p. 101015, abr. 2023.

ARAUJO, J. L.; LEITE, M. V. **Avanços no reúso de água no Brasil: estudos de caso e perspectivas futuras.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 2022.

ASANO, T. et al. **Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications.** ISBN: 978-0071459273, 2007.

ASANO, T.; BURTON, F. L.; LEVERENZ, H. L.; TSUCHIHASHI, R.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications.** New York: McGraw-Hill, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9648: **Estudo de Concepção de Sistemas de Esgoto Sanitário: Procedimento.** Rio de Janeiro, ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15527: **Aproveitamento de Água de Chuva de Coberturas para Fins Não Potáveis**. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16782: **Conservação de água em edificações — Requisitos, procedimentos e diretrizes**. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16783: **Uso de fontes alternativas não potáveis em edificações**. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

AWAD, M. M., S. M. ABD EL-SAMAD, H.E. GAD AND F.I. **Asfour "Effect of Flow Velocity on the Surface Fouling"**, Mansoura Engineering Journal (MEJ), Vol.32, No1, pp M27M37, March, 2007.

AZIZ, H.A.; ADLAN, M.N.; ZAHARI, M.S.M.; ALIAS, S. **Removal of ammoniacal nitrogen (N-NH<sub>3</sub>) from municipal solid waste leachate by using activated carbon and limestone**. Waste Management Research, v.22: p. 371-37, 2004.

BOLTO, B. et al. **Removal of THM precursors by coagulation or ion exchange**. *Water Research*, v. 36, p. 5066-5073, 2002.

BAKER, R. W. **Membrane Technology and Applications**. 3rd ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2012. 575 p.

BARROCAS, P. R. G.; MORAES, F. F. DE M.; SOUSA, A. C. A. **Saneamento é saúde? O saneamento no campo da saúde coletiva**. *História, Ciências, SaúdeManguinhos*, v. 26, n. 1, p. 33–51, 1 jan. 2019.

BAZZARELLA, Bianca Barcellos. **Caracterização e aproveitamento de água cinza para uso não-potável em edificações**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 165, 2005.

BEM, J. F; LAZZARIN, L. **Estudo de caso comparativo entre o tratamento de esgoto doméstico em RALF, UASB e lagoas**. (2009) 61 f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2009.

BESEN, G. R.; PIVELI, R. P. **Tecnologias avançadas de tratamento de efluentes para reúso: aplicações no Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, 2021.

BONINI, M. A.; SATO, L. M.; BASTOS, R. G.; SOUZA, C. F. **Alterações nos atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho irrigado com água residuária e vinhaça.** Revista Biociências, Taubaté, v. 20, n. 1, p. 56-63, jan. 2014.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental.** São Paulo: Prentice Hall, 2005.

BRANDÃO, Mayara Américo; CASTILHO, Natália. Estação de tratamento de água e esgoto. 2001. 4 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade do Oeste Paulista.

BRASIL, Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Farmacopeia Brasileira**, volume 1, 5ª Ed. Brasília, 2010.

BRASIL. Decreto n. 8.468, de 8 de Set. de 1976. **Aprova o Regulamento da Lei n.º 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente.** Publicado na Casa Civil, aos 6 de setembro de 1976.

BRASIL. Lei n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Brasília: Planalto, 2007. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm)>. Acesso em: 31/07/2023.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Brasília, Disponível em:<[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato20192022/2020/Lei/L14026.htm#view](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20192022/2020/Lei/L14026.htm#view)>. Acesso em: 24 ago. 2023.

SANEAMENTO PARA PROMOÇÃO DA SAÚDE. Fundação Nacional de Saúde - FUNASA. Ministério da Saúde. Publicada em: Jul de 2017. Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br/saneamento-para-promocao-da-saude>>. Acesso em: 24 ago. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde.** – 5.ed. Brasília: Funasa, 2019.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto 2019.** Brasília, 2020a.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019**. Brasília: SNS/MDR, 2020. 183 p.: il.

BRASIL. **Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021**. Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional. Brasília: SNS, 2021.

BRASIL. Portaria MS nº 2.914 de 12/12/2011. **Norma de qualidade da água para consumo humano**. Brasília: Ministério da Saúde, Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático. Serviços de Água e Esgoto – 2020**. Brasília: SNIS, 2021.

BROWN, R. M. et al. **A water quality index — Crashing the psychological barrier**. In: *Indicators of Environmental Quality*, 1972, p. 173–182.

STOQUART, C. et al. **Hybrid membrane processes using activated carbon treatment for drinking water: a review**. *Journal of Membrane Science*, v. 411, p. 1–12, 2012.

ANDERSON, C. T.; MAIER, W. J. **Trace organics removal by anion exchange resins**. *Journal of the American Water Works Association*, p. 278–283, 1979.

CAIRNCROSS, S.; VALDMANIS, V. **Water supply, sanitation, and hygiene promotion**. In: JAMISON, D. T. et al. (Eds.). *Disease Control Priorities in Developing Countries*. 2. ed. Washington D. C.: The World Bank, 2006.

CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes (Org.). **Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

CAMILO JÚNIOR, O. B.; SANDRI, D.; ALENCAR, E. R. D.; HEBLING, L. F. **Ozonation improves physical attributes in domestic sewage effluent**. *Revista Ambiente e Água*, v. 14, n. 2, p. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2328>» <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2328>.

CAMPOS, R. F. F.; KUHN, D. C. **Análise da interação de uma fonte pontual de lançamento de esgoto sanitário com a qualidade da água de um sistema lótico, Rio do Peixe, Santa Catarina, Brasil**. *Nature and Conservation*, v.14, n.3, p.96-102, 2021.

CAVALCANTI, J. E. W. de A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. 2ª ed.

CHEN, GUANG-HAO; VAN LOOSDRECHT, MARK C.M; EKAMA, G. A.; BRDJANOVIC, DAMIR; MIKI, MARCELO KENJI. **Tratamento Biológico de Esgoto: princípios, modelagem e projeto**. 2. Ed.: IWA Publishing, 2022.

CHEN, X.; CHEN, C.; YUE, P. I. **Separation and Purification Technology**, v. 19, p. 65, 2000.

CLAAS, ISABEL CRISTINA; MAIA, ROBERTO A. M. **Manual básico de resíduos industriais de curtume**. Porto Alegre: SENAI/RS, 1994. 664 p.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Guia Técnico de Reúso de Água**. 2022.

Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). **Reúso de Água**. 2023.

CONAMA (Brasil). Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Diário Oficial [da] União: seção 1, Brasília, DF, n. 053, p. 58-63, 18 mar. 2005.

CONAMA (Brasil). Resolução nº 430 de 13 de maio 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA**. Diário Oficial [da] União: seção 1, Brasília, DF, n. 92, p. 89, 16 maio 2011.

Conselho Nacional Do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n 430, de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA n 357/2005**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 mai. 2011.

COONEY, D. O., **Adsorption design for wastewater treatment**. Boca Raton, Fl. : Lewis Publishers, 1999.

CRISPILHO, F. N., REZENDE, M. O. O. Eletroflotação: Princípios e Aplicações. São Carlos: Ed. Rima, 2004, 85 p. apund FERREIRA, Letícia Henn. **Remoção de sólidos em suspensão de efluente da indústria de papel por eletroflotação**. 2006. 99 p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas, SP, Campinas 2006.

CROOK, J. **Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications**. New York: McGraw-Hill, 1996.

DANISH, M.; AHMAD, T. **A review on utilization of wood biomass as a sustainable precursor for activated carbon production and application**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 87, p. 1-21, 2018.

DEL-GUERCIO, A. M. F.; CHRISTOFOLETTI C. A.; FONTANETTI, C. S. **Avaliação da eficiência do tratamento de esgoto doméstico pelo teste do micronúcleo em *Oreochromis niloticus* (Cichlidae)**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 1121-1128, 2017. Disponível em: <http://twixar.me/gR8m>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

WWAP (World Water Assessment Programme)/UM-Water. 2021.

The United World Water Development Report 2021: Nature-Based Solutions for Water. Paris, UNESCO.

ZOLGHADR, E. et al. **The role of membrane-based technologies in environmental treatment and reuse of produced water**. *Frontiers in Environmental Science*, v. 9, p. 71, 2021.

ExxonMobil, A Report on Energy Trends, Greenhouse Gas Emissions and Alternative Energy, in, Irving, Texas, 2004.

F.G. Helfferich, Ion Exchange, McGraw-Hill, New York, 1962.

FELIZATTO, M.R.; NERY, F.C.; RODRIGUES, A.S.; SILVA, C.M. (2016). **Water reuse for landscape irrigation and toilet flushing in Brasilia, Brazil. Good practice examples and future research needs in Safe use of wastewater in agriculture workshop**. United Nations University: UNU-Flores. 24-25 Fevereiro 2016, Lima, Peru.

FLAUZINO, R. F.; SOUZA-SANTOS, R.; OLIVEIRA, R. M. **Indicadores socioambientais para vigilância da dengue em nível local**. *Saúde e Sociedade*, 20(1): 225-240, 2011.

FLYNN, D. J. **Nalco Water Handbook**. 3rd ed.; McGraw-Hill Education: New York, 2009.

FLORENCIO, Lourdinha; BASTOS, Rafael Kopschitz Xavier; AISSE, Miguel Mansur (Coord.). **Tratamento e utilização de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 427 p. il. Projeto PROSAB.

FONSECA, A. F.; LEAL, R. M. P.; HERPIN, U.; MELFI, A. J. **Carbon and nitrogen dynamics in a Brazilian soil-pasture system irrigated with treated sewage effluent**. Israel Journal of Plant Sciences, Jerusalem, v. 59, n. 2-4, p. 147-157, mar. 2011. <http://dx.doi.org/10.1560/IJPS.59.2-4.147>» <http://dx.doi.org/10.1560/IJPS.59.2-4.147>

FONSECA, A. F.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R. **Maize growth and changes in soil fertility after irrigation with treated sewage effluent. I. Plant dry matter yield and soil nitrogen and phosphorus availability**. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 36, n. 13-14, p. 1965-1981, fev. 2005a. <http://dx.doi.org/10.1081/CSS-200062539>»<http://dx.doi.org/10.1081/CSS-200062539>

FONSECA, A. F.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R. **Maize growth and changes in soil fertility after irrigation with treated sewage effluent. II. Soil acidity, exchangeable cations, and sulfur, boron, and heavy metals availability**. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 36, n. 13-14, p. 1983-2003, fev. 2005b. <http://dx.doi.org/10.1081/CSS-200062542>»<http://dx.doi.org/10.1081/CSS-200062542>

FOUST, Alan S. et al., **Princípio das operações unitárias**. 2ª edição, Rio de Janeiro: LTC, 1982.

FURTADO, A. L. F. F.; CALIJURI, M. do C.; LORENZI, A. S.; HONDA, R. Y.; GENUÁRIO, D. B.; FIORE, M. F. **Morphological and molecular characterization of cyanobacteria from a Brazilian facultative wastewater stabilization pond and evaluation of microcystin production**. Hydrobiologia, p. 195 – 209, 2009.

G. NAIDU, S. RYU, R. THIRUVENKATACHARI, Y. CHOI, S. JEONG, S. VIGNESWARAN. **A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage**, Environ. Pollut. 247 (2019) 1110–1124.

OSBORN, G. H. **Synthetic Ion-exchangers: Recent Developments in Theory and Application**, 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1961.

GANGULY, Rajiv; DEWAN, Himanshu. **Application of decision making tool to determine effluent quality index of existing sewage treatment plants.** *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, v. 101, n. 1, p. 207–219, 2020.

GERMAIN, E. et al. **Biomass effects on oxygen transfer in membrane bioreactors.** *Water Research*, v. 41, p. 1038-1044, 2007.

Governo Do Estado Do Rio De Janeiro (2017). Lei nº 7599 de 24 de maio de 2017. **Dispõe sobre a obrigatoriedade de indústrias situadas no estado do rio de janeiro instalar equipamentos de tratamento e reutilização de água.** 23/05/2017.

HUMBERT, H. et al. **Performance of selected anion exchange resins for the treatment of a high DOC content surface water.** *Water Research*, v. 39, p. 1699–1708, 2005.

HABERT, A. C. et al. **Processos de separação por membranas.** Rio de Janeiro: E-papers, 2006, 181 p.

H Aidari, A. H.; Heijman, S. G. J.; Van der Meer, W. G. J. **Optimal design of spacers in reverse osmosis.** *Separation and Purification Technology*, v. 192, p. 441-456, 2018.

HARIF, T.; KHAI, M.; ADIN, A. **Water Res.** 2012, 46, 3177

HENZE, M.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; EKAMA, G. A.; BRDJANOVIC, D. **Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design.** London: IWA Publishing, 2008.

HENZE, Mogens; VAN LOOSDRECHT, Mark C. M.; EKAMA, George A.; BRDJANOVIC, Damir. **Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design.** Londres: IWA Publishing, 2008.

HERMANOWICZ, SLAV W. **Membrane Bioreactors: Past, Present and Future.** UC Berkeley Working Papers, 2011.

HESPANHOL, I. **Potencial uso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos.** *Revista Bahia Análise e Dados*, Salvador, v. 13, n. Especial, p. 411-437, dez. 2003.

HESPANHOL, I.; GONÇALVES, O. M. (coordenadores). **Conservação e reúso de água: Manual de orientações para o setor industrial**. São Paulo: Federação e Centro das Indústrias do Estado de São Paulo – FIESP/ CIESP, vol. 1, s.d., 92 p.

HESPANHOL, IVANILDO. **Reúso potável direto e o desafio dos poluentes emergentes**. Revista USP, São Paulo, n. 106, p. 79 - 94, jul. 2015. Trimestral.

HESPANHOL, IVANILDO; RODRIGUES, RAPHAEL; MIERZWA, JOSÉ CARLOS. **Reúso potável direto - estudo de viabilidade técnica em unidade piloto**. Revista DAE, v. 67, p. 103 -115, 2019.

HOSSEINZADEH, M. et. al. **Evaluation of membrane bioreactor for advanced treatment of industrial wastewater and reverse osmosis pretreatment**. Journal of Environmental Health Sciences & Engineering, v. 11, p. 34, 2013.

IBRAHIM, MOHAMAD. **Effluent quality assessment of selected wastewater treatment plant in Jordan for irrigation purposes: water quality index approach**. *Journal of Ecological Engineering*, v. 20, n. 10, p. 206–216, 2019.

IBRAHIM, FRANCINI IMENE DIAS; IBRAHIM, FÁBIO JOSÉ; CANTUÁRIA, ELIANE RAMOS. **Análise Ambiental: gerenciamento de resíduos e tratamento de efluentes**. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2015. 145 p.

INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION. Biblioteca online. Disponível em: <https://www.iwapublishing.com>. Acesso em: 3 jun. 2024.

IOPP, P. L.; MENDES, A. T. **Análise de sistemas de tratamento de efluentes de abatedouros bovinos por lagoas de estabilização e por reator UASB seguido de lagoa de polimento**. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, v. 13, n. 2, p. 640–654, 2020.

Goldemberg, J.; Johansson, T. B. **World Energy Assessment: Overview: 2004 Update**. United Nations Publications, 2004.

Yang, J. et al. **Membrane-based processes used in municipal wastewater treatment for water reuse: state-of-the-art and performance analysis**. *Membranes (Basel)*, v. 10, p. 1–56, 2020. DOI: 10.3390/membranes10060131.

Yang, J. et al. **Membrane-based processes used in municipal wastewater treatment for water reuse: state-of-the-art and performance analysis.** *Membranes*, v. 10, p. 131, 2020.

Jafarinejad, Shahryar; Jiang, Sunny C. **Current technologies and future directions for treating petroleum refineries and petrochemical plants (PRPP) wastewater.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 7, n. 5, p. 103326, 2019.

Jamshidzadeh, Zahra; Tavangari Barzi, Majid. **Wastewater Quality Index (WWQI) as an assessment tool of treated wastewater quality for agriculture: a case of North Wastewater Treatment Plant effluent of Isfahan.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 7, p. 7366–7378, 2020.

JAMSHIDZADEH, ZAHRA; TAVANGARI BARZI, MAJID. **Wastewater Quality Index (WWQI) as an Assessment Tool of Treated Wastewater Quality for Agriculture: A Case of North Wastewater Treatment Plant Effluent of Isfahan.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 7, p. 7366–7378, 2020.

JIMENEZ, B.; ASANO, T. (Eds.). *Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs.* ISBN: 978-1843390893, 2008.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** 8. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017.

JORDÃO, EDUARDO PACHECO; PESSÔA, CONSTANTINO ARRUDA. **Tratamento de esgotos domésticos,** 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

JORDÃO, EDUARDO PACHECO; PESSOA, CONSTANTINO ARRUDA. **Tratamento de esgotos domésticos.** 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. xxxii, 683 p. ISBN 8570221193.

JOVIĆ, M. et al. **Degradation of Triketone Herbicides, Mesotrione and Sulcotrione, Using Advanced Oxidation Processes,** *Journal of Hazardous Materials*, v. 260, p. 1092-1099, 2013.

JUDD, S. **The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment.** Elsevier, 2010.

JUDD, S. **The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment.** Oxford: Elsevier, 2006.

KAMALI, MOHAMMADREZA et al. **Sustainability considerations in membrane-based technologies for industrial effluents treatment.** *Chemical Engineering Journal*, v. 368, p. 474-494, 2019.

KIM, S. C. **Application of response surface method as an experimental design to optimize coagulation–flocculation process for pre-treating paper wastewater.** *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 38, p. 93-102, 2016.

KRAUME, MATTHIAS; DREW, ANJA. **Membrane Bioreactors in Waste Water Treatment – Status and Trends.** *Chemical Engineering Technology*, v. 8, p. 1251-1259, 2010.

KYZAS, G. Z.; MATIS, K. A.; *J. Mol. Liq.* 2016, 220, 657

LEAL, R. M. P.; FONSECA, A. F.; HERPIN, U.; MELFI, A. J. **Agricultural utilization of treated sewage effluent: experience from Brazil.** *Israel Journal of Plant Science, Jerusalem*, v. 59, n. 2-4, p. 235-248, jun. 2011.  
<http://dx.doi.org/10.1560/IJPS.59.2.xx>»<http://dx.doi.org/10.1560/IJPS.59.2.xx>.

KOTHARI, V., VIJ, S., SHARMA, S., GUPTA, N. (2021). **Correlation of various water quality parameters and water quality index of districts of Uttarakhand.** *Environmental and Sustainability Indicators*, 9 (December 2020), 100093.

LE-CLECH, P., CHEN, V., & FANE, T. A. G. **"Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment."** *Journal of Membrane Science*, 284(1-2), 17-53, 2006.

LINDSEY, M. E. et al. **Enhanced Fenton degradation of hydrophobic organics by simultaneous iron and pollutant complexation with cyclodextrins.** *Science of the Total Environment*, 307 (1-3), pp. 215-229, 2003

MANTTARI, M.; KALLIOINEN, M.; NYSTROM, M. **Membrane technologies for water treatment and reuse in the pulp and paper industries.** In: *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment*. Elsevier, 2015, pp. 581–603.

MACHADO, SÍLVIA MARIA DE OLIVEIRA. **Avaliação do efeito antimicrobiano do surfactante cloreto de benzalcônio no controlo da formação de biofilmes indesejáveis.** 2005. 113f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia do Ambiente) – Departamento de Engenharia Biológica, Universidade do Minho, Braga.

MACKENZIE, L. D. **Water and wastewater engineering: Design principles and practice.** Ed. McGraw-Hill Companies. 2010.

MAESTRI, R. S. **Biorreator à membrana como alternativa para o tratamento de esgotos sanitários e reuso da água.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2007. 101 p.

MALAFAIA, G et al. **Crescimento de plantas de milho em solo acrescido de vermicompostos de lodo de curtume e irrigado com água residuária de esgoto doméstico.** Revista Ambiente & Água, Taubaté, vol. 10, n. 4, p. 847 – 862, 2015.

MANCUSO, P. C. S. **Tecnologia de reúso de água.** In: Santos, H. F.; Mancuso, P. C. S. (Ed.). Reuso de água. 1. Ed. São Paulo: Manole, 2007. Cap. 9, p. 291-338.

Manual de operação e manutenção da estação de tratamento de efluentes da Embrapa Agroindústria de Alimentos / Edmar das Mercês Penha... [et al.]. — Rio de Janeiro : Embrapa Agroindústria de Alimentos, 2010. 24 p.

MARTINS, F. P. et al. **“Linkages between sanitation and the sustainable development goals: A case study of Brazil”.** Sustainable Development, vol. 29, n. 2, 2021.

MATTESON, M. J.; DOBSON, R. L.; GLENN, R. W.; KUKUNOOR, N. S.; WAITS, W. H.; CLAYFIELD, E. J. **Colloids Surf.**, A 1995, 104, 101.

MELLO, EDSON JOSÉ REZENDE DE. **Tratamento de Esgoto Sanitário.** 2007. 99p. Monografia (Pós-Graduação) – Engenharia Sanitária – UNUMINAS, MG, Uberlândia, 2007.

MENDRET, J. et al. **In situ dynamic characterization of fouling under different pressure conditions during dead-end filtration Compressibility properties of particle cakes.** Journal of Membrane Science, v. 333, n. 1-2, 2009. p. 20-29.

MENG, F., ZHANG, S., OH, Y., & ZHOU, Z. **"Fouling in membrane bioreactors: An updated review."** Water Research, 114, 151-180, 2017.

MENG, FANGANG. **Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material.** Water Research, v. 43, p. 1489-1512, 2009.

METCALF & EDDY Inc. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.** 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

METCALF, L.; EDDY, H.P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MIERZWA, J. C. **Processos de separação por membranas: conceitos para uma aplicação eficiente**. São Paulo, 2007. Disponível em: <[http://www.cepema.usp.br/wp-content/uploads/2011/06/IV-EPOA\\_-4.pdf](http://www.cepema.usp.br/wp-content/uploads/2011/06/IV-EPOA_-4.pdf)>. Acesso em: 05 mai. 2024.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria: uso racional e reúso**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 143 p.

MIERZWA, JOSÉ CARLOS. **O uso racional e o reúso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria—Estudo de caso da KODAK Brasileira**. 2002.367 f. 2002. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)—Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MIKI, M. K.; CHEN, G.; EKAMA, G. A.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; BRDJANOVIC, D. **Tratamento biológico de esgoto**. 2. ed. São Paulo: Iwa Publishing, 2022. 866 p.

MOHAMMED, T. J.; SHAKIR, E.; EGYPT. J. Pet. 2017, 27, 31.

MONACO, P. A. V. Lo; MATOS, A. T. de; RIBEIRO, I. C. A; BATISTA, A. P. da S; MIRANDA, S. T; EUSTÁQUIO JR, V. **Tratamento de esgoto sanitário utilizando coagulante natural seguido de filtro orgânico**. Caatinga, Mossoró, v. 27, n. 1. p. 28 - 40, 2014.

MONTEIRO, D. R.; SILVA, T. T. S.; SILVA, L. V. B. D.; LIMA, V. L. A.; SANTOS, C. L. M.; PEARSON, H. W. **Efeito da aplicação de efluente doméstico tratado nos teores de micronutrientes no solo**. Irriga, Botucatu, v. Especial, n. Especial, p. 40-46, dez. 2014. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2014v1n1p40>»<http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2014v1n1p40>

MOURA, PRISCILA GONÇALVES et al. **Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, p. 791-808, 2020.

NALCO. **Catálogo de tratamento de água de resfriamento**, São Paulo, disponível em: [https://pt-br.ecolab.com/solutions/cooling-water-treatment#:f:@websolutions=\[Tratamento%20de%20%C3%A1guas%20de%20resfriamento\]e f:@webapplications=\[Tratamento%20de%20%C3%A1gua\]](https://pt-br.ecolab.com/solutions/cooling-water-treatment#:f:@websolutions=[Tratamento%20de%20%C3%A1guas%20de%20resfriamento]e f:@webapplications=[Tratamento%20de%20%C3%A1gua]). Acesso em: 02 de mai. de 2024.

NEPOMUCENO, DANIELLA COSTA FARIA. **Reúso de águas residuárias tratadas: inovação tecnológica e aceitabilidade social.** 2021.

NETO, L. G. L.; COSTA, R. H. R. **Tratamento de esgoto sanitário em reator híbrido em bateladas sequenciais: eficiência e estabilidade na remoção de matéria orgânica e nutrientes (N, P).** Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 16, n. 4, p. 411-420, 2011.

NETO, O. N. S. et al. **Fertigação do algodoeiro utilizando efluente doméstico tratado.** **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.16, n.2, p.200–208, 2012.

NORDELL, E. **Water Treatment for Industrial and Other Uses.** Second Edition - Reinhold Publishing Corporation: New York, 1961, 598 p.

OLIVEIRA, D. C. S. da; AZEVEDO, P. G. F. de; CAVALCANTI, L. A. P. **Processos biológicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa.** Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 8, n. 18, p. 397-415, 2021.

OLIVEIRA, IARA APARECIDA DOS SANTOS. et al. **O reúso da água proporciona competitividade ao setor industrial.** In: Fórum Ambiental da Alta Paulista. V.07, N. 02, 2011. p. 214 – 224. (Periódico Eletrônico).

OLLER, I; MALATO, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. A. **Combination of Advanced Oxidation Processes and Biological Treatments for Wastewater Decontamination: a review.** Science of the Total Environment, v. 409, p. 4141-4166, 2011.

BOENING, P. H.; BECKMANN, D. D.; SNOEYINK, V. L. **Activated carbon versus resin adsorption of humic substances.** *Journal of the American Water Works Association*, v. 72, p. 54–59, 1980.

PANAGOPOULOS, ARGYRIS; HARALAMBOUS, KATHERINE-JOANNE. **Minimal Liquid Discharge (MLD) and Zero Liquid Discharge (ZLD) Strategies for Wastewater Management and Resource Recovery – Analysis, Challenges and Prospects.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, n. 5, p. 104418, 2020.

PANAGOPOULOS, ARGYRIS. **Beneficiation of Saline Effluents from Seawater Desalination Plants: Fostering the Zero Liquid Discharge (ZLD) Approach - A Techno-**

Economic Evaluation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 4, p. 105338, 2021.

PANAGOPOULOS, ARGYRIS. **Beneficiation of Saline Effluents from Seawater Desalination Plants: Fostering the Zero Liquid Discharge (ZLD) Approach** - A Techno-Economic Evaluation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 4, p. 105338, 2021.

PAULA, HEBER MARTINS DE; FERNANDES, CARLOS EDUARDO. **Otimização do tratamento de água cinza a partir do uso combinado de coagulantes químicos. Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 23, n. 5, p. 951-961, 22 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO).<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522018169155>.

POTIER, O; PONS, M. N. **Elements of modelling and control of urban wastewater treatment systems**. In.: QUEVAUVILLER, P; THOMAS, O; BEKEN, A. V. D. *Wastewater Quality Monitoring and Treatment*. Ed. John Wiley e Sons, Ltd, England, 2006.

PRÜSS, A. et al. **Estimating the burden of disease from water, sanitation, and hygiene at a global level**. *Environmental Health Perspectives*, 110: 537-542, 2002.

QASIM, MUHAMMAD et al. 2019. **Reverse osmosis desalination**. A state-of-the-art review. *Desalination*, v. 135, p. 1-79.

RESENDES, A. P. C. et al. **Determinação de áreas prioritárias para ações de controle da dengue**. *Revista de Saúde Pública*, 44(2): 274-282, 2010.

REUSO DE ÁGUA. Cetesb, São Paulo, 14 de ago. de 2023. Disponível em: <[RODRIGUES, MARCO ANTÔNIO SIQUEIRA; BERNARDES, ANDRÉA MOURA. \*\*Água e efluentes: uso e reúso\*\*. In: BERNARDES, Andréa Moura; AMADO, Franco Dani Rico; RODRIGUES, Marco Antônio Siqueira \(org.\). \*Saneamento ambiental e reúso de água: técnicas avançadas de tratamento\*. Técnicas avançadas de tratamento. São Leopoldo: Benchimol Soluções Gráficas, 2018. Cap. 5. p. 61-72.](https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/informacoes-basicas/tpos-de-agua/reuso-de-agua/#:~:text=O%20reuso%20reduz%20a%20demanda,conceito%20de%20substitui%C3%A7%C3%A3o%20de%20mananciais.></a>. Acesso em: 14 de ago. de 2023.</p>
</div>
<div data-bbox=)

SABESP. (2017). Informações sobre o Aquapolo. Disponível em: <https://www.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=569>. Acesso em: 09 jun. 2024.

SANASA CAMPINAS. Estação Produtora de Água de Reúso – EPAR CAPIVARI II – SANASA CAMPINAS. 10º edição prêmio fiesp de conservação e reúso de água. 2015. Disponível em: <chrome-extension://gphandlahdpffmccakmbngmbnjiiiahp/https://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=186252>>. Acesso em: 21 de set. 2023.

SANASA CAMPINAS. Sanasa hoje. Disponível em: [https://www.sanasa.com.br/conteudo/conteudo2.aspx?f=Ieflag=-PTepar\\_nrod=3016](https://www.sanasa.com.br/conteudo/conteudo2.aspx?f=Ieflag=-PTepar_nrod=3016)>. Acesso em: 20 de set de 2023.

SANTANA, J. C. S.; PERES, S. M.; SOUZA, P. R. A. de; SOUZA, J. P. S. de. **Os impactos gerados no meio ambiente e na sociedade pela falta de tratamento de esgoto sanitário nas regiões brasileiras**. Revista Portos: por um mundo mais sustentável, v. 1, n. 12, p. 48-57, 2020.

SANTOS, A. S. P. e LIMA, M. A. M. **Nota Técnica 2 - Aspectos legais relacionados ao reúso de águas como diretriz de institucionalização da prática no Brasil**, Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária Ambiental. V 2, n.3. 2022. 5-14p.

SANTOS, A.S.; CRUZ E.A., **Sistemas de geração e distribuição de água purificada na indústria farmacêutica**. Fármacos e Medicamentos, v:(50):,PG 35 – 41, 2008.

SANTOS, G. DE O. S.; PUPO, M. M. DE S.; VASCONCELOS, V. M.; EGUILUZ, K. I. B.; BANDA, G. R. S. In **Electrochemical Water and Wastewater Treatment**; Martínez-Huitle, C. A., Scialdone, O., Rodrigo, M. A., eds.; Butterworth-Heinemann: Oxford, 2018; p. 77.

São Paulo: Engenho Editora Técnica, 2012. 453p.

SAUER, K.; RICKARD, A.H.; DAVIES, G.D. **Biofilms and Biocomplexity**, 2: 347-353, 2007.

SCHNEIDER, R. P. e TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso**. São Paulo : ABES, 2001. 234 p.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTYIA, M. T. **Membranas Filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso**. São Paulo: ABES, 2001. 233 p.

SCHNEIDER, R.P.; TSUTIYA, M.T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso**. 1º Ed. – São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 234p., 2001.

SENEVIRATNE, M. A. **Practical Approach to Water Conservation for Commercial and Industrial Facilities**; Elsevier Ltd.: Oxford, UK., 2007.

SHREVE, R. N. e BRINK Jr, J.A. **Indústrias de Processos Químicos**, 4 Edição, Editora Guanabara Dois, 1980. 717p.

SILVA FILHO, A. **Tratamento terciário de efluente de uma indústria de refrigerantes visando ao reuso** – um estudo de caso. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola de Química, 2009.

Silva, A.; Oliveira, B. **Reúso de água em indústrias: estudo de caso da Aquapolo Ambiental**. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 45-58, 2023.

SILVA, A. G. e SIMÕES, R. A. G. **Água na Indústria, Capítulo 10 de Águas Doces no Brasil** – Capital Ecológico, Uso e Conservação: Academia Brasileira de Ciências – Instituto de Estudos Avançados da USP, Escrituras Editoras: São Paulo, 717p.

SILVA, L. L.; CARVALHO, C. M.; SOUZA, R. P. F.; FEITOSA, H. O.; FEITOSA, S. O.; GOMES FILHO, R. R. **Utilização de efluentes domésticos no crescimento da pimenta (*Capsicum chinense*), cultivar tequila bode vermelha**. *Revista AGROTEC*, Porto, v. 35, n. 1, p. 121-133, jan./fev. 2014.

SNIS. Paulo Rogério dos Santos e Silva. - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Ministério do Desenvolvimento Regional (ed.). Do SNIS ao SINISA **Informações para planejar o Esgotamento Sanitário: diagnóstico snis-ae 2019**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2020. 61 p.

SOUZA NETO, O. N.; ANDRADE FILHO, J.; DIAS, N. da S.; REBOUÇAS, J. R. L.; OLIVEIRA, F. R. A. de; DINIZ, A. A. **Fertirrigação do algodoeiro utilizando efluente doméstico tratado**. *Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Ambient.* v. 16, nº.2, Campina Grande, 2012.

T.H. BOYER, P.C. SINGER, **Bench-scale testing of a magnetic ion exchange resin**. For removal of disinfection by-product precursors, *Water Res.* 39 (2005) 1265– 1276.

TACHINI, M; BELLI FILHO, P; PINEIRO, A. **Avaliação do tratamento conjunto de lodo de tanques sépticos e esgotos domésticos em um RALF**. VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - SIBESA. 2002

TANG, FANG et al. 2014. **Fouling of reverse osmosis membrane for municipal wastewater reclamation: autopsy results from a full-scale plant**. Desalination, v. 349, p. 73-79.

TAO, Y. X.; HILLS, P. **Assessment of alternative wastewater treatment approaches in Guangzhou, China**. *Water Science and Technology, London*, v.39, n.5, p.227-234, 1999.

TCHOBANOGLIOUS, G., BURTON, F. L., STENSEL, H. D., & TSUCHIHASHI, R. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. McGraw-Hill Education, 2003.

TEODOSIU, C. C.; KENNEDY, M. D.; STRATEN, H. A.; SCHIPPERS. J. C. **Evaluation of secondary refinery effluent treatment using ultrafiltration membranes**. *Water Research*, v. 33, n. 9, p. 2172-2180, 1999.

Toledo, L. M., Wall, F. C. M., e de Sá Salomão, A. L. (2021). **Panorama do Sistema Lagunar de Maricá – RJ: Indicadores de Saneamento vs. Qualidade de Água**. *Revista Internacional de Ciências*, 11(1), 6 -24.

TROVATTI, JOUBERT. **Tratamento de água para geração de vapor: caldeiras**. (2015). Disponível em [http://www.snatural.com.br/PDF\\_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-AguaCaldeira.pdf](http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-AguaCaldeira.pdf). Acesso em: 02 de mai. de 2024.

TRUSSEL, R. SHANE. **The effect of organic loading on process performance and membrane fouling in a submerged membrane bioreactor treating municipal wastewater**. *Water Research*, v. 40, p. 2675-2683, 2006.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Relatórios e diretrizes sobre a reutilização de águas residuais**. Disponível em: <https://www.epa.gov>. Acesso em: 3 jun. 2024.

VALTA, K.; DAMALA, P.; PANARETOU, V.; ORLI, E.; MOUSTAKAS, K.; LOIZIDOU, M. **Review and Assessment of Waste and Wastewater Treatment from Fruits and Vegetables Processing Industries in Greece**. *Waste Biomass Valorization* 2017, 8 (5), 1629–1648.

VALTA, K.; KOSANOVIC, T.; MALAMIS, D.; MOUSTAKAS, K.; LOIZIDOU, M. **Overview of water usage and wastewater management in the food and beverage industry.** *Desalin. Water Treat.* 2015, 53, 3335–3347.

VASCONCELOS, R. C. de. **Tratamento de efluentes líquidos: uma perspectiva para o desenvolvimento sustentável.** Campina Grande: Amplla, 2020. 47 p.

VENZKE, CARLA DENIZE et al. **Increasing water recovery rate of membrane hybrid process on the petrochemical treatment.** *Process Safety and Environmental Protection*, v. 117, p. 152-158, 2018b.

VIANA, P. Z. **Biorreator com membrana aplicado ao tratamento de esgotos domésticos: avaliação do desempenho de módulos de membranas com circulação externa.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro : COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2004. 162 p.

VON SPERLING, M, 2005: **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto.** 3. ed. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG, 2005. 452

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Processos anaeróbios.** 3. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007. (volume 6).

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2018.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos – Princípios do tratamento de águas residuárias,** v.2. 2. Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade de Minas Gerais, 2016b.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Editora UFMG, 1996.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos.** 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016, 211 p.

GAO, W. et al. **Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: a review.** *Desalination*, v. 272, p. 1–8, 2011.

WAGNER, J. **Membrane Filtration Handbook: Practical Tips and Hints**. 2<sup>a</sup> Ed. Osmonics, 2001. 129 p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Preventing Disease through Healthy Environments: a global assessment of the burden of disease from environmental risks**. Geneva: WHO, 2016.

WU, B. et al. *Role of initially formed cake layers on limiting membrane fouling in membrane bioreactors*. *Bioresource Technology*, v. 118, p. 589-593, 2012.

WUKOVITS, W.; HARASEK, M.; FRIEDL, A. **A Knowledge based system to support the process selection during wastewater treatment**. *Resources, Conservation and Recycling*, London, v. 37, n. 3, p. 205-215, 2003.

PEI, X.; SONG, L. **Technical research on environmental engineering of sewage treatment**. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 440, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/440/4/042024.

PEREIRA, C.; LIMA, D. **Tecnologias avançadas de tratamento de água para reúso industrial**. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2022, São Paulo. São Paulo: ABES, 2022. p. 150-155.

CHEN, Y.; DONG, B. Z.; GAO, N. Y.; FAN, J. C. **Effect of coagulation pretreatment on fouling of an ultrafiltration membrane**. *Desalination*, v. 204, p. 181–188, 2007.

WANG, Y.; SERVENTI, L. **Sustainability of dairy and soy processing: a review on wastewater recycling**. *Journal of Cleaner Production*, v. 237, p. 117821, 2019.

YU, L.; HAN, M.; HE, F. **A review of treating oily wastewater**. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 10, p. S1913-S1922, 2017.

**ANEXOS**

## Anexo A

Tabela 20 – Caracterização dos efluentes bruto e tratado da estação de tratamento de esgoto sanitário estudo de caso no período de janeiro de 2021 a novembro de 2022.

Mês/ano	Data	Parâmetros									
		DBO <sub>5</sub> (mg/L)		DQO (mg/L)		N-NH <sub>3</sub> (mg/L)		NTK (mg/L)		Fósforo total (mg/L)	
		Esgoto bruto	Efluente tratado	Esgoto bruto	Efluente tratado	Esgoto bruto	Efluente tratado	Esgoto bruto	Efluente tratado	Esgoto bruto	Efluente tratado
<b>Jan./2021</b>	12/01/2021	260	1	655	22	26,10	0,01	71,50	0,80	7,12	1,38
	26/01/2021	240	1	605	23		0,01		2,85		0,61
<b>Fev./2021</b>	03/02/2021	190	1	513	19	17,00	0,04	53,49	2,59	7,44	1,19
	23/02/2021	273	1	645	25		0,01		4,79		0,35
<b>Mar./2021</b>	02/03/2021	249	1	807	24	46,80	0,05	65,21	1,13	8,25	1,48
	15/03/2021	356	1	521	17		0,02		0,92		0,00
<b>Abr./2021</b>	06/04/2021		1		20	49,50	0,28		1,25	9,77	0,23
	19/04/2021	164	1	391	18	20,70	0,03		0,26	5,70	0,18
<b>Mai./2021</b>	03/05/2021	296	1	651	25	47,50	0,02		1,75	10,90	0,38
	17/05/2021				28	58,90	0,13		1,79	13,10	0,90
<b>Jun./2021</b>	07/06/2021	239	1	575	18	53,80	1,00	70,11	3,92	9,58	1,60
	21/06/2021		1		19	67,10	0,20		1,51	13,10	0,61
<b>Jul./2021</b>	13/07/2021	401	1	657	30	52,30	0,10	92,46	1,61	11,50	19,90
	26/07/2021		1		22	57,50	0,01		1,19	9,92	0,03
<b>Ago./2021</b>	03/08/2021	218	1	497	28	48,00	0,15		2,26	7,89	1,00
	17/08/2021		1		26	57,60	0,05		1,66	11,90	1,21
<b>Set./2021</b>	07/09/2021		1	528	23	49,60	0,25		2,09	8,31	1,45
	20/09/2021	513	1	825	17	53,00	0,27	98,00	0,51	15,50	3,69
<b>Out./2021</b>	12/10/2021		1	1210	17	64,00	0,14		1,85	11,50	3,42
	25/10/2021	333	1	595	32	63,00	0,11		10,11	9,94	6,06
<b>Nov./2021</b>	09/11/2021	356	1	658	22	65,00	0,10		1,56	8,80	2,39
	22/11/2021		1	841	23	67,00	0,05		0,79	11,20	2,09
<b>Dez./2021</b>	06/12/2021	447	1	830	23	93,00	0,01		2,68	13,90	2,88
	21/12/2021		1	648	28	92,10	0,04		1,99	14,30	3,01
<b>Jan./2022</b>	04/01/2022	427	1	770	26	81,00	0,01	100,92	1,87	12,60	3,51

	18/01/2022	338	1	642	27	84,60		93,12	1,56	11,20	0,29
<b>Fev./2022</b>	01/02/2022		1	836	22	60,00			2,35	11,40	4,37
	14/02/2022	385	1	722	17	82,00				10,40	2,69
<b>Mar./2022</b>	01/03/2022	400	1	762	18	81,50			0,00	10,70	3,98
	22/03/2022		1	747	37	80,00			1,86	10,40	15,00
<b>Abr./2022</b>	11/04/2022	496	1	893	32	76,40	0,06	98,20	19,00	13,70	14,50
	25/04/2022		1	763	35	90,80	0,13		9,13	13,60	3,92
<b>Mai./2022</b>	02/05/2022	365	1	780	24	59,20	0,46			13,90	1,29
	16/05/2022		1	846	37	130,40			1,41	13,60	1,32
	31/05/2022		1	623	30	73,20	0,07		11,90	12,40	1,90
<b>Jun./2022</b>	07/06/2022	438	1	860	23	66,70	0,01	90,72	4,32	15,40	2,29
	20/06/2022		1	578	17	46,50	0,01		12,25	10,10	3,54
<b>Jul./2022</b>	05/07/2022	336	1	837	27	72,80	0,14		2,80	9,32	3,40
	19/07/2022		1	757	20	58,00	0,04		3,50	11,20	1,45
<b>Ago./2022</b>	02/08/2022	499	1	958	21	68,00	0,01	96,65	4,95	15,10	3,10
	15/08/2022		1	794	24	74,00	0,01		2,10	11,40	1,25
	29/08/2022	285	1	611	20	66,00	0,09		2,45	10,10	5,24
<b>Set./2022</b>	12/09/2022	314	1	695	31	64,00	0,01	67,58	1,95	10,40	5,60
	26/09/2022		1	650	36	55,00	0,15		3,15	12,00	1,05
<b>Out./2022</b>	04/10/2022	244	1	577	35	71,00	0,01		1,30	9,45	5,30
	17/10/2022		1	595	20	68,50	0,01		1,75	8,34	3,95
<b>Nov./2022</b>	07/11/2022	244	1	608	33	74,00	0,01	94,55		9,07	6,50
	21/11/2022	249	1	575	35	62,70	0,03		0,80	11,30	4,55

DBO<sub>5</sub> = Demanda bioquímica de oxigênio (5 dias). DQO = Demanda química de oxigênio. N-NH<sub>3</sub> = Nitrogênio amoniacal. NTK = Nitrogênio total Kjeldahl.

N.d. = não determinado

## Anexo B

Tabela 21 – Caracterização do efluente tratado no período de janeiro de 2021 a novembro de 2022.

Mês/ano	Data	Parâmetro	
		Turbidez (NTU)	Nitrato – NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)
<b>Jan./2021</b>	12/01/2021	0,21	8,60
	26/01/2021	0,29	8,11
<b>Fev./2021</b>	03/02/2021	0,24	6,85
	23/02/2021	0,32	7,73
<b>Mar./2021</b>	02/03/2021	0,25	8,75
	15/03/2021	0,29	5,92
<b>Abr./2021</b>	06/04/2021	0,24	7,65
	19/04/2021	0,20	8,26
<b>Mai./2021</b>	03/05/2021	0,26	9,66
	17/05/2021	0,38	4,19
<b>Jun./2021</b>	07/06/2021	0,28	7,61
	21/06/2021	0,25	8,26
<b>Jul./2021</b>	13/07/2021	0,38	5,99
	26/07/2021	0,19	6,57
<b>Ago./2021</b>	03/08/2021	0,17	8,24
	17/08/2021	0,25	9,34
<b>Set./2021</b>	07/09/2021	0,19	5,24
	20/09/2021	0,19	9,93
<b>Out./2021</b>	12/10/2021	0,25	6,90
	25/10/2021	0,28	8,62
<b>Nov./2021</b>	09/11/2021	0,40	10,62
	22/11/2021	0,16	8,63
<b>Dez./2021</b>	06/12/2021	0,22	10,37
	21/12/2021	0,19	11,35
<b>Jan./2022</b>	04/01/2022	0,37	9,44
	18/01/2022	0,22	11,80
<b>Fev./2022</b>	01/02/2022	0,57	7,08
	14/02/2022	0,46	6,94

<b>Mar./2022</b>	01/03/2022	0,00	3,53
	22/03/2022	0,29	3,18
<b>Abr./2022</b>	11/04/2022	0,31	15,50
	25/04/2022	0,25	12,30
<b>Mai./2022</b>	02/05/2022	0,26	7,59
	16/05/2022	0,24	6,53
	31/05/2022	0,15	9,88
<b>Jun./2022</b>	07/06/2022	0,11	7,89
	20/06/2022	0,32	9,66
<b>Jul./2022</b>	05/07/2022	0,33	6,77
	19/07/2022	0,19	10,15
<b>Ago./2022</b>	02/08/2022	0,30	9,15
	15/08/2022	0,65	8,25
	29/08/2022	0,21	5,19
<b>Set./2022</b>	12/09/2022	0,42	7,81
	26/09/2022	0,20	6,80
<b>Out./2022</b>	04/10/2022	0,26	7,65
	17/10/2022	0,50	8,25
<b>Nov./2022</b>	07/11/2022	0,27	6,00
	21/11/2022	0,31	6,60