



Gabriela Ferreira Pagani

**Tratamento e Reuso de Efluentes Industriais:
um estudo de caso no Rio de Janeiro**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Christiane Dias Pereira

Rio de Janeiro,
abril de 2025



Gabriela Ferreira Pagani

**Tratamento e Reuso de Efluentes Industriais:
um estudo de caso no Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Dr. Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

Orientador
PUC-Rio

Prof.^a Dr.^a Christiane Dias Pereira

Coorientadora
Terra Melhor Ltda

Prof. Camila Pesci Pereira

UFRJ

Prof. Juliana Lobo Paes

UFRRJ

Rio de Janeiro, 25 de abril de 2025.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução, total ou parcial, do trabalho sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

Gabriela Ferreira Pagani

Graduou-se em Engenharia Agrícola e Ambiental Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), em 2022.

PAGANI, Gabriela Ferreira

Tratamento e Reuso de Efluentes Industriais: um estudo de caso no Rio de Janeiro/ Gabriela Ferreira Pagani; orientador: Antônio Krishnamurti Beleño de Oliveira. – Rio de Janeiro PUC, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2025.

76f.: il. (color); 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil e Ambiental – Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental – Teses. 3. Reuso de Efluentes. 4. Normas Técnicas. 5. Tratamento de Água. I. Oliveira, Antônio Krishnamurti Beleño de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Dedico este trabalho à minha família, meu porto seguro,
que sempre me sustentou com amor e apoio incondicional.
Em especial à minha filha Heloísa, que é meu maior estímulo,
minha inspiração diária e a razão pela qual sigo em frente
com ainda mais coragem e propósito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de estar aqui e por toda a luz, pensamentos positivos e a força necessária para concluir cada etapa da vida sem me desamparar em nenhum momento.

Aos meus pais, Derzio e Suzana, por todo o amor e apoio incondicional. Por não medirem esforços para me proporcionar a melhor educação, por me incentivarem a ir além e por estarem sempre ao meu lado, apoiando minhas decisões e acreditando nas minhas ambições.

Aos meus irmãos, Mariana, Amanda e Gabriel, pela ajuda indispensável nos cuidados com a Heloísa nos momentos em que precisei me dedicar integralmente a este projeto com tranquilidade e foco.

À minha prima e coorientadora Professora Doutora Christiane Dias Pereira, que, com sabedoria, me direcionou para este mestrado e esteve presente ao longo do percurso com conselhos sempre sensatos e valiosos.

Ao meu orientador, Professor Doutor Antonio Krishnamurti, que me conduziu na elaboração desse trabalho, sempre solícito, paciente e disposto a me ajudar independente do dia ou da hora.

À minha amiga Juliana Lobo, que me orientou com dedicação durante a graduação. Seu apoio e disponibilidade para ajudar, mesmo nos momentos mais desafiadores, fazem toda a diferença.

Aos meus colegas de turma pela parceria, pelas trocas de conhecimento e pelo apoio mútuo.

À CAF Química, pelos dados essenciais para a elaboração deste trabalho. Em especial, à Susana e ao Daniel, por compartilharem com generosidade seu vasto conhecimento sobre o tema, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Pagani, Gabriela Ferreira; Oliveira, Antonio Krishnamurti Beleño de. **Tratamento e Reuso de Efluentes Industriais: Um Estudo de Caso no Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2025. 76p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo avalia a adequação dos processos de tratamento de efluentes industriais ao reuso, considerando exigências normativas e desafios operacionais. Diante da crescente demanda por água e da necessidade de minimizar o impacto ambiental, o reuso de efluentes se apresenta como uma solução sustentável para indústrias do Estado do Rio de Janeiro. No entanto, sua implementação enfrenta barreiras técnicas, regulatórias e econômicas. O objetivo do trabalho foi verificar o nível de preparação de indústrias para o reuso, analisando seus sistemas de tratamento e parâmetros de qualidade, além de propor diretrizes para adequação tecnológica e normativa. A metodologia envolveu a análise de seis indústrias de diferentes setores, comparando seus processos de tratamento com os requisitos da NBR 13.969/1997 para reuso em quatro classes distintas. Foram avaliados parâmetros como turbidez, coliformes fecais, pH, sólidos dissolvidos totais e cloro residual. Os resultados mostraram que todas as indústrias realizam tratamento aeróbio, mas nenhuma implementa desinfecção, impedindo o reuso em classes mais restritivas. Além disso, a maioria não monitora parâmetros essenciais, dificultando a adequação normativa. Conclui-se que melhorias em filtração, desinfecção e monitoramento são essenciais para viabilizar o reuso de efluentes, garantindo sustentabilidade hídrica e conformidade ambiental.

Palavras-chave:

Reuso de Efluentes; Normas Técnicas; Tratamento de Água.

EXTENDED ABSTRACT

Pagani, Gabriela Ferreira; Oliveira, Antonio Krishnamurti Beleño de (Advisor). **Treatment and Reuse of Industrial Effluents: A Case Study in Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2025. 76p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

1 Introduction

The growing demand for water resources has intensified pressure on water sources around the world, putting sustainability and water availability at risk for various economic sectors. According to data from the FAO (2021), global water stress has already reached 18.55%, with the agricultural sector being the main contributor at 13.27%, followed by urban and industrial use. Although the industrial sector accounts for a smaller share (2.79%), its impact is significant, especially in urbanized and densely populated regions, such as Brazil.

Urban supply is the second largest consumer of water in the country, accounting for approximately 23% of total water withdrawals in 2023 (ANA, 2024). Population growth and urban expansion have intensified conflicts over water use, requiring ongoing investments in infrastructure for collection, treatment, and distribution. Integrated and efficient water resource management has thus become an increasingly urgent challenge.

In response to this scenario, the United Nations' 2030 Agenda proposes strengthening international cooperation and expanding local capacities to implement sustainable water management practices. These practices include desalination, water harvesting, wastewater treatment, water use efficiency, and, notably, the reuse of effluents. In this context, the reuse of industrial effluents emerges as a fundamental strategy to reduce the burden on water sources, while also aligning with the principles of the circular economy.

Applying the circular economy to the sanitation sector allows the transformation of waste generated in wastewater treatment plants into valuable resources. After appropriate treatment, reclaimed water can be used in various non-potable activities such as irrigation, cleaning of external areas, toilet flushing, industrial cooling systems, among others. This practice not only reduces pressure on water bodies but also lowers operational costs for companies and enhances water resilience in the regions involved.

In Brazil, one of the most relevant large-scale reuse initiatives is the Aquapolo Project, considered the largest in South America and one of the largest in the world. A result of a partnership between Sabesp and GS Inima Industrial, the project can produce up to 1,000 L/s of reclaimed water, sourced from treated sewage at the ABC wastewater treatment plants. This water is supplied to the Capuava Petrochemical Complex and other industries in the ABC Paulista region, fully replacing the use of potable water with reclaimed water. This initiative represents a concrete example of innovation and sustainability in water resource management.

On the international stage, Singapore's NEWater program stands out as a consolidated model of effluent reuse for industrial and commercial purposes. Developed by the Public Utilities Board (PUB) of Singapore, the program combines advanced technologies such as microfiltration, reverse osmosis, and

ultraviolet (UV) disinfection. The system is capable of supplying water for industrial processes and for reservoir recharge, increasing the country's water self-sufficiency and reducing its vulnerability to extreme climate events.

Despite technological advances, industrial effluent reuse still faces challenges related to the heterogeneity of production processes and the diversity of quality standards required for each application. In many cases, activities that do not require potable water — such as cleaning of external areas, landscape irrigation, or cooling systems — continue to be supplied with drinking water, which represents a waste of a valuable resource for low sanitary requirement uses.

Brazilian standards, such as ABNT NBR 13969:1997 and NBR 16783:2020, acknowledge this possibility and establish quality criteria for the use of non-potable water in buildings and industrial processes. However, practical implementation is still limited, mainly due to the lack of specific regulation for industrial reuse and difficulties in adapting existing treatment systems.

In this context, implementing efficient strategies for industrial effluent reuse is essential not only to reduce the consumption of potable water but also to strengthen the sustainability of the industrial sector and expand adherence to the circular economy. This study aims to analyze the challenges and opportunities of industrial effluent reuse, based on a case study in the state of Rio de Janeiro, considering regulatory, operational, and technological aspects. The results intend to support public policies and technical guidelines aimed at promoting reuse in Brazil.

2 Methodology

The first stage consisted of analyzing technical standards and reference studies related to effluent reuse. Brazilian standards were considered, such as ABNT NBR 13969:1997, which focuses on the reuse of water from sanitary sewage, and ABNT NBR 16783:2019, which establishes guidelines for the use of alternative sources of non-potable water in buildings. International guidelines (such as ISO and USEPA) were also incorporated, which classify reuse based on sanitary criteria and parameters such as fecal coliforms ($<5,000$ MPN/100 mL) and dissolved oxygen (>2.0 mg/L), among others.

The second stage involved selecting the sample of industrial Wastewater Treatment Plants to be analyzed. Laboratory reports provided by the company CAF Química Ltda. were used, as well as technical information obtained through the author's previous experience with the participating industries. Although the sample is not statistically representative of all industries in the state of Rio de Janeiro, its diversity allows for outlining a relevant technical overview and offering insights for reuse strategies that can be adapted to other industrial contexts.

In the third stage, the treatment systems were assessed and the monitored parameters were characterized. The data were compared to the criteria defined for different reuse classes. The industries were classified based on the adequacy of the treatment system, the presence or absence of monitoring for critical parameters, and the compliance of the observed values. In cases where the requirements were met, the applicable reuse class was identified. In other cases, deficiencies were noted that compromised the feasibility of reuse, guiding the next step of the methodology.

The final stage consisted of proposing technical and operational improvements to the analyzed systems, with the aim of enabling the reuse of

treated water for non-potable applications in buildings, such as landscape irrigation, floor washing, and toilet flushing. The recommendations were developed based on the identified nonconformities and included suggestions for complementary technologies (such as filtration and disinfection), quality control strategies, adaptation of hydraulic networks, and sanitary safety measures. The guidelines follow the parameters defined by ABNT NBR 13969:1997, NBR 16783:2019, and other relevant technical references.

3 Results and Discussion

All the industries use aerobic biological treatment in their Wastewater Treatment Plants. However, none of them adopt disinfection systems or tertiary filtration — essential steps for complying with the stricter reuse classes. Breweries, for instance, use aerated lagoons or activated sludge systems, while the meat processing plant uses anaerobic lagoons followed by aerobic treatment. The cosmetics and metal parts industries employ physical-chemical and biological processes but still lack effective disinfection. This technical limitation significantly reduces the feasibility of using the treated effluent for applications such as landscape irrigation or floor washing, as required by ABNT NBR 16783:2019. Only Class 4, intended for agricultural reuse with less stringent criteria, proved to be partially applicable, and even so, with limitations.

The quality parameter characterization focused on six main variables: turbidity, fecal coliforms, total dissolved solids (TDS), pH, residual chlorine, and dissolved oxygen. A graphical analysis of the data revealed distinct patterns among the industries.

Turbidity: Both breweries consistently showed results above the 5 NTU recommended for Classes 1 and 2 reuse, and in many cases above 10 NTU, the limit for Class 3. Therefore, these effluents would not be suitable for toilet flushing without additional treatment.

TDS: The results show that most treated effluent samples did not meet the Class 1 requirement ($\text{TDS} < 200 \text{ mg/L}$). However, Classes 2, 3, and 4 do not impose limits for this parameter, so in terms of TDS, these effluents would be acceptable for use under Classes 2, 3, and 4.

pH: Most industries maintained pH levels within the acceptable range (6.0–8.0), consistent with Class 1, except for Brewery 1, whose treated effluent pH was mostly above the limit for this class. The other classes do not specify pH limits, so the treated effluents from all analyzed industries are suitable for Classes 2, 3, and 4.

Residual Chlorine: Results for Breweries 1 and 2 indicate that, in most treated effluent samples, chlorine concentrations were near or below the minimum required for Classes 1, 2, and 3. For Brewery 1, values were mostly close to the lower limit, while Brewery 2 consistently recorded concentrations below this threshold. For Class 4, both breweries' results are adequate, as agricultural reuse does not require a minimum chlorine concentration.

Dissolved Oxygen: None of the evaluated companies perform dissolved oxygen analysis. However, for reuse Classes 1, 2, and 3, no limits are required for this parameter.

Based on the parameter evaluation, all industries presented limitations for direct reuse in urban buildings. The absence of disinfection, filtration, and consistent monitoring of key variables are recurring issues. Even with efficient biological systems, the treated effluent does not meet the standards for Classes 1

to 3. Only for Class 4 — aimed at agricultural use with indirect human exposure — did some effluents show partial compliance.

Overall, based on the results presented, this study proposes guidelines to align treatment processes and effluent quality with reuse requirements. The recommendations aim to promote operational efficiency, ensure compliance with technical standards, and enable the safe and effective application of treated effluent for various purposes. The proposed steps are outlined below:

1. Definition of Reuse Class

The first step is to define the intended reuse class (Class 1, 2, 3, or 4) based on the specific purposes for which the treated water will be used. Establishing the reuse class is essential to guide the required quality standards and ensure that the reuse is both safe and appropriate. The selection should consider not only the intended use but also the cost and complexity of the required treatment, since higher reuse classes demand more advanced technologies and stricter quality control.

2. Adaptation of Treatment Processes

Once the reuse class is defined, the current treatment system's capacity must be evaluated and necessary upgrades implemented. Meeting the requirements of higher reuse classes often requires the incorporation or enhancement of processes such as aerobic biological treatment, sand and activated carbon filtration, and effective disinfection using chlorination, ozone, or UV radiation, particularly for fecal coliform control.

3. Verification of Quality Parameters

Measurements should be taken for the parameters relevant to each reuse class, such as turbidity, TDS, fecal coliforms, residual chlorine, dissolved oxygen, and pH, ensuring compliance with the established standards. Additionally, it is recommended that each industry's effluent undergo preliminary physical-chemical and microbiological characterization to assess the need for analyzing additional parameters that may compromise the safety or effectiveness of reuse. Some industrial activities generate specific pollutants not covered by standard parameters, but which can significantly affect water quality.

4. Monitoring and Continuous Improvement

Periodic monitoring should be implemented to detect quality deviations and guide improvements in both treatment and industrial processes. Common issues such as high turbidity can be addressed through resizing and efficient operation of primary settlers, optimization of aerobic processes, and the addition of filtration stages to reduce suspended particles.

4 Conclusions

The study assessed the feasibility of treated effluent reuse by six industries in the State of Rio de Janeiro, considering their treatment systems and water quality parameters. The results indicated that, for the most part, the effluents do not meet the criteria of the more restrictive reuse classes (Classes 1 to 3), primarily due to the absence of filtration and disinfection. Only Class 4, intended for restricted agricultural reuse, proved to be partially applicable.

The analysis showed that the final effluent quality is directly related to the level of treatment adopted. Industries with more advanced processes, such as filtration and physical-chemical systems, performed better. A comparison with international standards (USEPA, ISO) revealed gaps in Brazilian legislation, which still lacks specific guidelines for industrial reuse.

As contributions, the study proposes methodological guidelines for adapting existing systems, as well as recommendations for the development of public policies and specific regulations. It also suggests future research focusing on the economic evaluation of reuse, the application of advanced technologies (such as MBRs), and the feasibility of indirect potable reuse in the national context.

Keywords:

Effluent Reuse; Technical Standards; Water Treatment.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	19
2	Objetivos.....	22
2.1	Objetivo Geral.....	22
2.2	Objetivos Específicos	22
3	Revisão Bibliográfica	23
3.1	Sistemas de Esgotamento Sanitário.....	23
3.2	Tratamento de Efluentes Industriais	25
3.3	Reuso de Efluentes	32
4	Metodologia	39
4.1	Análise das Principais Normas e Estudos de Referência	39
4.2	Escolha da Amostra das ETEs Industriais a serem avaliadas	41
4.3	Avaliação dos Sistemas de Tratamento e a Caracterização dos Parâmetros	42
4.4	Adaptação do Tratamento de Efluente visando o Reuso Não Industrial.....	42
5	Resultados e Discussões	44
5.1	Análise das Principais Normas e Estudos de Referência	44
5.2	Avaliação dos Sistemas de Tratamento e a Caracterização dos Parâmetros	46
5.2.1	Avaliação do Tratamento	46
5.2.1.1	Cervejaria 1	46
5.2.1.2	Cervejaria 2	47

5.2.1.3	Cosmética.....	47
5.2.1.4	Fabricação de Peças	47
5.2.1.5	Vestuário.....	47
5.2.1.6	Frigorífico.....	48
5.2.2	Parâmetros Analisados e Faixas de Aceitabilidade	48
5.2.2.1	Turbidez.....	48
5.2.2.2	Coliformes Fecais	50
5.2.2.3	Sólidos Dissolvidos Totais.....	51
5.2.2.4	pH.....	53
5.2.2.5	Cloro Residual	58
5.2.2.6	Oxigênio Dissolvido	59
5.2.3	Análise Geral dos Resultados	59
5.3	Adaptação do Tratamento de Efluentes visando o Reuso Não Industrial.....	64
5.3.1	Definição da Classe de Reuso.....	64
5.3.2	Adequação dos Processos de Tratamento	66
5.3.3	Verificação dos Parâmetros de Qualidade	66
5.3.4	Monitoramento e Melhoria Contínua	67
6	Considerações Finais	68
7	Referências Bibliográficas	71

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BOD / DBO	<i>Biochemical Oxygen Demand</i> Demanda Bioquímica de Oxigênio
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COT	Carbono Orgânico Total
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA / USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
ETDI	Estação de Tratamento de Despejo Industrial
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
IICA	Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> Organização Internacional de Normalização
LAB	Lodo Ativado com Biofiltro
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NMP	Número Mais Provável (para coliformes)
ONU	Organização das Nações Unidas
OMS	Organização Mundial da Saúde
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico

RPD	Reuso Potável Direto
RPI	Reuso Potável Indireto
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SES	Sistema de esgotamento sanitário
SST	Sólidos Suspensos Totais
TPI	Teste de Desempenho Individual
UV	Ultravioleta (desinfecção por radiação)
WHO	<i>World Health Organization</i> Organização Mundial da Saúde

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Sistema Unitário de Esgotamento Sanitário	24
Figura 2 – Exemplo de Sistema Separador Absoluto de Esgotamento Sanitário	24
Figura 3 – Processo de Tratamento de Esgoto	26
Figura 4 – Requisitos para Reuso	35
Figura 5 – Fluxograma dos Processos Metodológicos	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reuso com Parâmetros e Tratamentos definidos como referência	45
Tabela 2 – Resumo dos tratamentos utilizados por cada uma das indústrias avaliadas.....	60
Tabela 3 – Parâmetros verificados e enquadramento nas possíveis Classes	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação de Turbidez na Cervejaria 1 em cerca de um ano de medições.....	49
Gráfico 2 – Variação de Turbidez na Cervejaria 2 em cerca de um ano de medições.....	50
Gráfico 3 – Resultados para a Cervejaria 1 considerando a variação de Sólidos Dissolvidos Totais em doze meses de medição	51
Gráfico 4 – Resultados para a Cervejaria 2 considerando a variação de Sólidos Dissolvidos Totais em doze meses de medição	52
Gráfico 5 – Resultados para a Cervejaria 1 considerando a variação de pH em doze meses de medição.....	53
Gráfico 6 – Resultados para a Cervejaria 2 considerando a variação de pH em doze meses de medição.....	54
Gráfico 7 – Resultados para a Indústria Cosmética considerando a variação de pH em doze meses de medição.....	55
Gráfico 8 – Resultados para a Indústria de Fabricação de peças considerando a variação de pH em doze meses de medição.....	56
Gráfico 9 – Resultados para a Indústria de Vestuário considerando a variação de pH em doze meses de medição.....	57
Gráfico 10 – Resultados para a Cervejaria 1 considerando a variação de Cloro Residual em doze meses de medição.....	58
Gráfico 11 – Resultados para a Cervejaria 2 considerando a variação de Cloro em doze meses de medição.....	59

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos hídricos tem colocado pressão significativa sobre os mananciais em todo o mundo, comprometendo a sustentabilidade hídrica e a disponibilidade de água para diferentes setores econômicos. De acordo com dados mais recentes da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), referentes ao ano de 2021, o estresse hídrico global atinge aproximadamente 18,55%, indicando que quase um quinto dos recursos hídricos renováveis já está comprometido devido à retirada excessiva de água. O setor agrícola é o principal responsável por essa pressão, contribuindo com 13,27% do estresse hídrico mundial, enquanto sua retirada de água corresponde a 6,68% do total de recursos hídricos renováveis. Embora menos expressivo, o setor industrial também exerce influência relevante, respondendo por 2,79% do estresse hídrico global.

O abastecimento de água para consumo humano em áreas urbanas constitui o segundo maior uso dos recursos hídricos no país. Essa demanda se concentra principalmente em regiões urbanizadas, o que provoca uma crescente pressão sobre os mananciais e os sistemas de produção de água, aumentando a complexidade e a interdependência das soluções de abastecimento. Com o avanço populacional e a expansão das áreas urbanas, a necessidade de recursos hídricos para esse fim torna-se ainda mais intensa, frequentemente gerando conflitos pelo uso da água e exigindo elevados investimentos em infraestrutura para assegurar tanto a qualidade quanto a disponibilidade do recurso. Estima-se que, em 2023, a retirada de água destinada ao abastecimento humano urbano corresponda a aproximadamente 23% do total retirado (ANA, 2024, p. 57).

Em resposta à crise ambiental, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu, na Agenda 2030, a ampliação da cooperação internacional e o fortalecimento do apoio à capacitação dos países em desenvolvimento em atividades e programas voltados para a gestão hídrica. Entre as ações propostas, destacam-se a coleta de água, a dessalinização, a promoção da eficiência no uso dos recursos hídricos, o tratamento de efluentes, a reciclagem e o desenvolvimento de tecnologias de reuso. Nesse contexto, o reuso de efluentes

industriais assume um papel estratégico, contribuindo para a diminuição da sobrecarga sobre os recursos naturais.

Diante desse cenário, os preceitos presentes na economia circular aplicados aos resíduos provenientes das Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), como a água de reuso, o biogás e o lodo, despontam como uma alternativa para atender à crescente demanda por água resultante do aumento populacional e da maior frequência de períodos de seca em diversas regiões do país. Após passar pelos processos de tratamento adequados, a água de reuso pode ser destinada a diferentes usos não potáveis, reduzindo, assim, o volume de água retirado dos corpos hídricos (Silva *et al.*, 2023).

Neste sentido, intervenções que privilegiam a economia circular podem ser identificadas no Brasil por meio do projeto Aquapolo que é o maior empreendimento de produção de água de reuso na América do Sul e um dos maiores do mundo, resultado de uma parceria entre a GS Inima Industrial e a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp). Com capacidade para produzir até 1.000 litros por segundo de água de reuso a partir de esgoto tratado na Estação de Tratamento de Esgoto ABC (ETE-ABC¹), o projeto fornece água para o Polo Petroquímico de Capuava e indústrias da região do ABC Paulista, economizando um litro de água potável para cada litro de água produzida. O projeto é uma solução inovadora e sustentável para a gestão hídrica diante das mudanças climáticas (Aquapolo, 2025).

Já no cenário internacional, o Programa NEWater, em Singapura, é um exemplo consolidado de reuso de efluentes para fins industriais e comerciais. Criado pela Agência Nacional de Água de Singapura, o sistema trata efluentes urbanos com processos avançados de microfiltração, osmose inversa e desinfecção por ultravioleta (UV), permitindo que a água de reuso seja utilizada em indústrias e para recarga de reservatórios, contribuindo para a autossuficiência hídrica do país (PUB, 2021).

O reuso de efluentes industriais pela própria indústria apresenta elevada complexidade, principalmente devido à heterogeneidade dos parâmetros de

¹ A Estação de Tratamento de Esgotos ABC, localizada no município de São Paulo, serve as cidades de Santo André, São Bernardo do Campo, Diadema, São Caetano do Sul, Mauá e parte da cidade de São Paulo.

qualidade exigidos por cada processo produtivo. Nesse contexto, destaca-se que diversas atividades rotineiras realizadas em diferentes tipologias de edificações utilizam água, embora muitas delas não requeiram o padrão de potabilidade (ABNT, 2019b). Isto possibilita utilizar a água de reuso industrial como fonte de abastecimento para fins não potáveis. Atividades como irrigação paisagística, lavagem de pisos e veículos, descargas sanitárias e sistemas de resfriamento a água, por exemplo, podem ser atendidas com água de qualidade inferior à potável (ABNT, 2019a). No entanto, é comum que essas demandas ainda sejam supridas com água potável, o que resulta em uma competição direta com usos prioritários, como o consumo humano.

Sendo assim, a implementação de estratégias eficientes para o reuso de efluentes industriais é essencial para fortalecer a sustentabilidade industrial e promover a economia circular, reduzindo o consumo de água potável e o descarte de efluentes.

O presente estudo é, sobretudo, relevante preservar e proteger os recursos naturais como também, identificar os desafios e oportunidades associados ao reuso, considerando as particularidades normativas e tecnológicas de tratamento. Além disso, os resultados podem subsidiar políticas públicas, fornecendo bases técnicas para o aprimoramento da gestão ambiental e para o desenvolvimento de normas e incentivos ao reuso.

2

OBJETIVOS

Neste capítulo, apresenta-se os objetivos deste trabalho.

2.1

OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo avaliar o grau de preparação de um conjunto de indústrias do Estado do Rio de Janeiro para a implementação do reuso de efluentes em edificações, voltado ao abastecimento não potável. A análise considera os processos de tratamento atualmente adotados, os parâmetros de qualidade exigidos e, a partir disso, propõe diretrizes técnicas e operacionais para viabilizar essa prática, com base em aspectos tecnológicos e normativos.

2.2

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ♦ Revisão da Literatura em relação ao reuso de estações de tratamento de esgoto industriais tais como normas, referências, publicações científicas etc.
- ♦ Análise e avaliação das características dos sistemas de tratamento e acompanhamento dos parâmetros de qualidade dos efluentes.
- ♦ Indicação das lacunas e melhorias necessárias para implementação do reuso em edificações, voltado ao abastecimento não potável.
- ♦ Desenvolvimento de recomendação metodológica para reuso de esgoto industrial em atividades não industriais.

3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será realizada uma revisão da literatura para fundamentar teoricamente o estudo, abordando o tema reuso de efluente industrial.

3.1

SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Segundo a Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007 que estabelece as diretrizes nacionais do saneamento básico, o sistema de esgotamento sanitário é:

[...] constituído pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais necessárias à coleta, ao transporte, ao tratamento e à disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até sua destinação final para produção de água de reuso ou seu lançamento de forma adequada no meio ambiente (art. 3º, inc. I, alínea b, redação dada pela Lei nº 14.026/2020)

Os sistemas de esgotamento sanitário (SES) são fundamentais para a promoção da saúde pública e a preservação ambiental, garantindo a coleta, o transporte, o tratamento e a disposição adequada dos esgotos. A seguir, serão abordados os principais tipos de SES e seus componentes essenciais. Os SES podem ser classificados em sistemas individuais e coletivos.

Sistemas Individuais: Destinados a atender uma única unidade habitacional, geralmente em áreas rurais ou de baixa densidade populacional. O sistema mais comum é a fossa séptica seguida de dispositivos de infiltração no solo, como sumidouros. Esses sistemas realizam o tratamento primário dos esgotos no próprio local de geração, reduzindo a carga poluidora antes da disposição no solo (Goetten, 2015).

Sistemas Coletivos: Projetados para atender comunidades inteiras, coletando e transportando os esgotos por meio de redes de tubulações até unidades centralizadas de tratamento. Podem ser subdivididos em unitário; separador absoluto; misto ou separador parcial.

- ♦ Sistema Unitário (Figura 1): Coleta esgotos sanitários e águas pluviais na mesma tubulação. Embora seja economicamente vantajoso devido à

redução de custos com infraestrutura, apresenta desafios operacionais, especialmente durante períodos de chuvas intensas, que podem sobrecarregar o sistema (Brum e Wartchow, 2017).

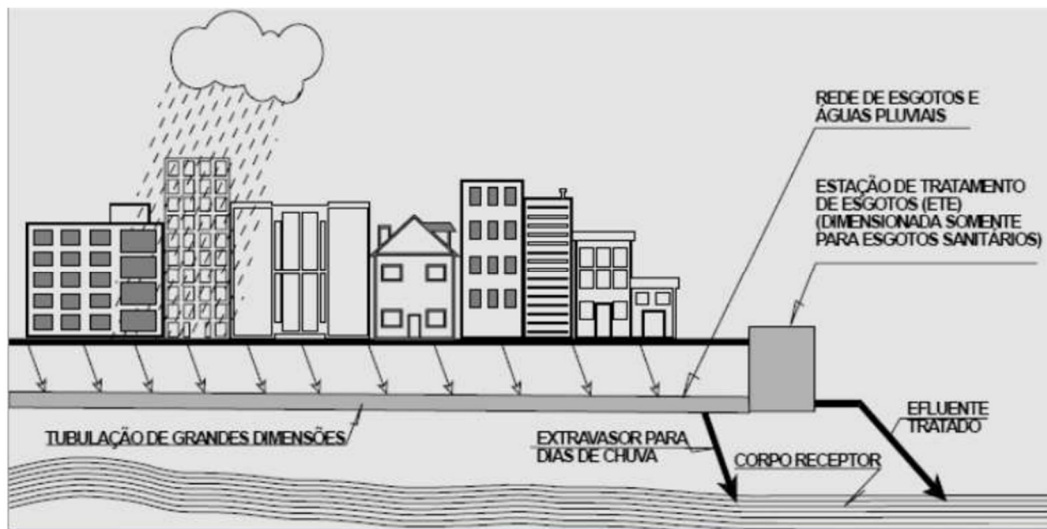


Figura 1 – Exemplo de Sistema Unitário de Esgotamento Sanitário

Fonte: Tochetto, 2023, p. 46.

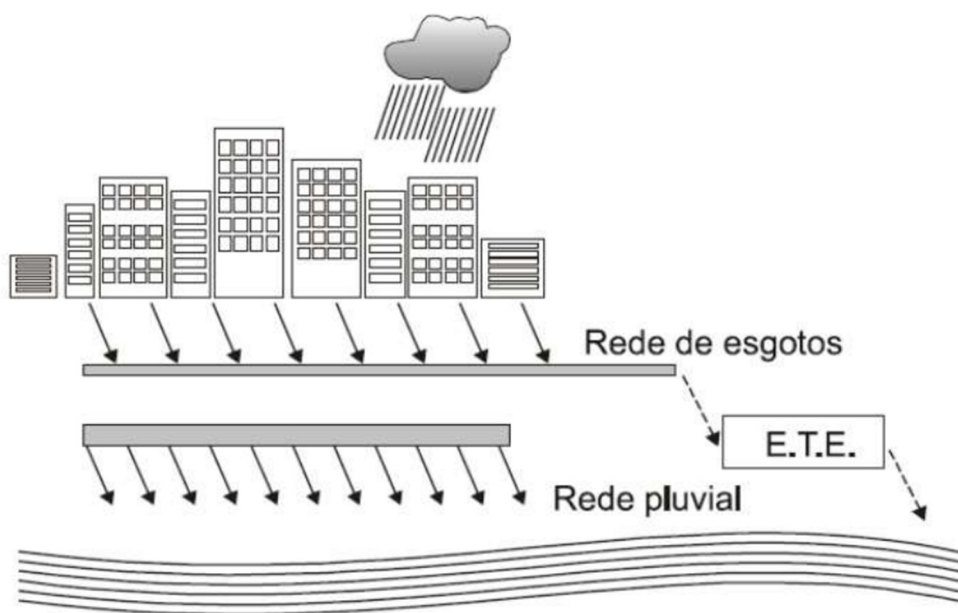


Figura 2 – Exemplo de Sistema Separador Absoluto de Esgotamento Sanitário

Fonte: Tochetto, 2023, p. 44.

- ♦ Sistema Separador Absoluto (Figura 2): Utiliza redes distintas para esgotos sanitários e águas pluviais, evitando a sobrecarga do sistema de tratamento durante eventos de precipitação. Este modelo é amplamente

recomendado por proporcionar maior eficiência no tratamento dos esgotos e minimizar riscos ambientais.

- ♦ Sistema Misto ou Separador Parcial: Uma parte do esgoto pluvial é coletada por sistema separador absoluto e outra por sistema unitário (Noro, 2012, p. 29).

A escolha do tipo de sistema de esgotamento sanitário e o correto dimensionamento de seus componentes são determinantes para a eficácia na gestão dos esgotos e na proteção da saúde pública e do meio ambiente. Estudos recentes destacam a importância de adaptar os sistemas às características específicas de cada localidade, considerando fatores como densidade populacional, topografia e disponibilidade de recursos financeiros. Além disso, a manutenção regular e a conscientização da comunidade sobre o uso adequado dos sistemas são fundamentais para garantir sua sustentabilidade e eficiência a longo prazo.

A gestão eficiente dos sistemas de esgotamento sanitário é essencial para garantir a proteção dos recursos hídricos e a qualidade ambiental, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. A falta de tratamento adequado dos efluentes pode causar a contaminação de rios, lagos e aquíferos subterrâneos, comprometendo a saúde pública e o equilíbrio ecológico (Silva, 2024).

No contexto industrial, a problemática se intensifica devido a interação complexa entre os diversos agentes químicos presentes nas águas residuárias aliada às variações na concentração de contaminantes ao longo dos períodos de produção e à adição de novos compostos químicos durante o tratamento. Assim, a adequação dos sistemas convencionais para lidar com efluentes industriais é um desafio significativo (Machado, 2014).

3.2

TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

O tratamento de efluentes industriais é essencial para a redução dos impactos ambientais e para o atendimento às normas regulatórias. Diferentes setores industriais geram efluentes com características variadas, exigindo

processos específicos de tratamento, cada um apresentando desafios particulares quanto à remoção de contaminantes e ao reuso da água.

Nas atividades industriais, a água é utilizada em diversas etapas e finalidades, como na limpeza de equipamentos, tubulações e áreas de trabalho, em sistemas de resfriamento e geração de vapor, além do uso direto nos processos produtivos e no consumo sanitário dos trabalhadores. Em alguns casos, parte dessa água é incorporada ao produto final ou perdida por evaporação. No entanto, a maior parte se transforma em efluente líquido, ao ser contaminada por resíduos do processo produtivo ou sofrer alterações térmicas durante o uso (Giordano, 2004).

A Figura 3 apresenta um fluxograma simplificado do tratamento e destinação de esgotos sanitários, destacando as possíveis etapas de pós-tratamento, bem como as opções de disposição final tanto do efluente quanto do lodo gerado no processo.

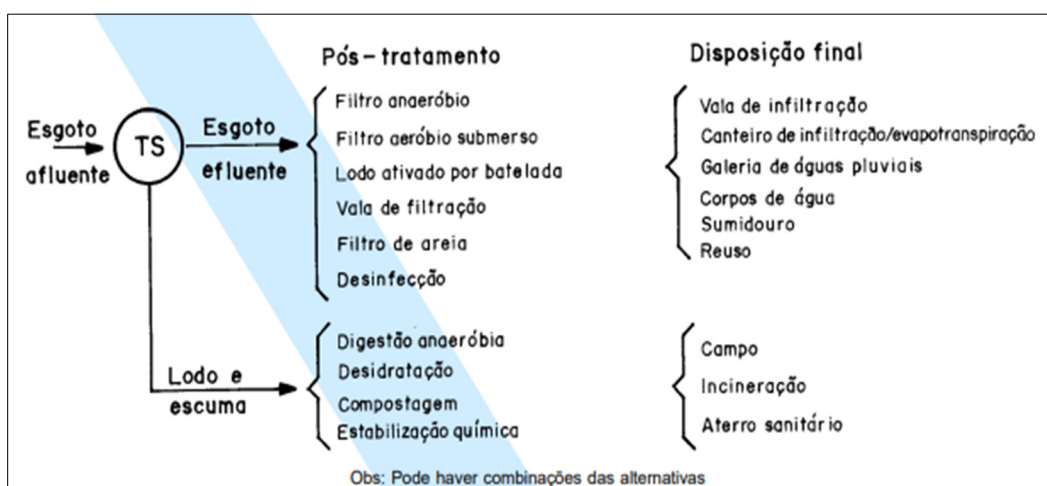


Figura 3 – Processo de Tratamento de Esgoto

Fonte: ABNT NBR 13969:1997.

O processo tem início com o esgoto afluente que entra na estação de tratamento. A partir dessa etapa, o esgoto é separado em duas frações: o efluente tratado, que pode seguir para diferentes formas de pós-tratamento, e o lodo e espuma, que demanda manejo específico. Entre as tecnologias de pós-tratamento do efluente, destacam-se: filtro anaeróbio, filtro aeróbio submerso, lodo ativado por batelada, vala de filtração, filtro de areia e processos de desinfecção. Estas etapas visam aprimorar a qualidade do efluente, seja para lançamento em corpos

receptores, infiltração no solo ou reuso. As possibilidades de disposição final do efluente incluem: vala de infiltração, canteiro de infiltração/evapotranspiração, galeria de águas pluviais, corpos d'água, sumidouro ou reuso – este último, foco do presente trabalho, podendo incluir aplicações urbanas, industriais ou agrícolas, dependendo da qualidade alcançada no pós-tratamento. O lodo e espuma provenientes do processo de tratamento podem passar por digestão anaeróbia, desidratação, compostagem ou estabilização química. Após esse tratamento, a disposição final pode ser realizada em campo (uso agrícola), incineração ou em aterro sanitário.

A definição dos processos de tratamento de efluentes industriais, bem como das técnicas construtivas e materiais a serem utilizados, depende de uma série de fatores. Entre eles, destacam-se a legislação ambiental vigente na região, as condições climáticas e aspectos culturais locais. Também são considerados os custos de implantação e operação, as características do lodo gerado, a qualidade do efluente após o tratamento, e os riscos associados à operação, como vazamentos de substâncias químicas, explosões e emissão de odores. Além disso, avalia-se o impacto sobre a comunidade no entorno, a confiabilidade do sistema para atender às exigências legais e o potencial de reuso do efluente tratado (Giordano, 1999).

Conforme apresentado por Giordano (2004), as características dos poluentes presentes nos efluentes industriais podem ser classificadas nos seguintes grupos:

a) Características físicas:

- ♦ Sólidos em suspensão e dissolvidos: compostos por substâncias orgânicas e/ou inorgânicas. Os sólidos suspensos têm diâmetro superior a 1,2 μm e incluem frações coloidais, sedimentáveis e flutuantes. Os dissolvidos possuem diâmetro inferior a 1,2 μm .
- ♦ Turbidez: associada à presença de partículas coloidais, afeta a transparência do efluente.
- ♦ Cor: resulta de substâncias dissolvidas (naturais ou artificiais), coloidais ou de subprodutos de biodegradação.
- ♦ Temperatura: parâmetro relacionado à poluição térmica, que interfere na solubilidade de gases e na velocidade dos processos biológicos.

- ♦ Odor: originado por substâncias orgânicas ou inorgânicas voláteis, como ácidos, solventes, gás sulfídrico e amônia, especialmente em efluentes misturados com esgotos sanitários.

b) Características químicas

b.1) Orgânicas

- ♦ Matéria orgânica: quantificada indiretamente por Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e diretamente por carbono orgânico total (COT). Sua presença reduz o oxigênio dissolvido nos corpos receptores, impactando a vida aquática.
- ♦ Detergentes: utilizados em limpezas e processos industriais, geralmente do tipo aniônico, controlado por legislação.
- ♦ Fenóis: provenientes de desinfetantes, resinas fenólicas e outros compostos industriais.
- ♦ Óleos e graxas: com múltiplas origens, incluindo restaurantes, oficinas, caldeiras e matérias-primas oleosas.

b.2) Inorgânicas

- ♦ Sais e íons: como cloretos, sulfatos, fosfatos, nitratos, carbonatos e amônio. Em excesso, podem comprometer processos biológicos por efeito osmótico ou salinização.
- ♦ Metais: os tóxicos (como cádmio, mercúrio, chumbo, cromo, níquel etc.) são bioacumulativos e regulados por legislação; os não tóxicos (como cálcio, magnésio, sódio, ferro) impactam em incrustações, corrosão e osmose.
- ♦ Nutrientes: como nitrogênio e fósforo, essenciais à vida, mas causadores de eutrofização. Estão presentes em esgotos domésticos e também em resíduos industriais.

c) Características biológicas

- ♦ Microrganismos patogênicos: coliformes, bactérias, protozoários, helmintos e vírus, que podem causar doenças de veiculação hídrica.
- ♦ Fontes: principalmente esgotos sanitários, mas também indústrias de alimentos e abatedouros.

- ♦ Impactos: contaminação de águas superficiais e subterrâneas e risco à saúde pública.

d) Gases

- ♦ Gases dissolvidos: como oxigênio, gás carbônico, amônia e gás sulfídrico.
- ♦ Compostos orgânicos voláteis (VOC): provenientes de efluentes industriais ou esgotos, contribuem para odores desagradáveis e podem ser tóxicos.
- ♦ Aerossóis e odores: também associados à presença de microrganismos ou compostos voláteis liberados no ar.

O trabalho também aborda os principais processos utilizados no tratamento de efluentes líquidos industriais, corroborado por outros autores (Von Sperling, 1996; Cornelli *et al.*, 2014), com o objetivo de atender à legislação ambiental e, em alguns casos, viabilizar o reuso da água. Esses processos são organizados conforme a natureza dos poluentes e classificados em três grandes grupos: físicos, químicos e biológicos.

- a) Processos físicos – Os processos físicos são aplicados principalmente para a remoção de sólidos grosseiros, flutuantes ou sedimentáveis presentes nos efluentes. Entre esses processos, destaca-se o gradeamento e peneiramento, que tem por função eliminar materiais sólidos que possam causar obstruções nas etapas subsequentes. A separação água/óleo é realizada com base na diferença de densidade entre os dois líquidos, permitindo a remoção de óleos presentes no efluente. Já a sedimentação e a flotação promovem a separação de sólidos suspensos por meio da ação da gravidade ou da injeção de ar, respectivamente. A filtração, seja por meio de leitos de areia ou por membranas, é utilizada para reter partículas coloidais e outros sólidos finos. Por fim, a desinfecção por radiação ultravioleta (UV) tem como objetivo a eliminação de microrganismos patogênicos, contribuindo para a segurança sanitária do efluente tratado.
- b) Processos químicos – Os processos químicos, por sua vez, utilizam reagentes específicos para modificar ou remover poluentes por meio de

reações químicas. A coagulação e floculação visam à clarificação do efluente, promovendo a agregação de partículas finas em flocos maiores, facilitando sua remoção. A precipitação química é empregada para retirar metais pesados, fósforo e outros sais dissolvidos, tornando-os sólidos sedimentáveis. Já os processos de oxidação e redução são aplicados no tratamento de substâncias tóxicas como cianetos e cromo hexavalente, convertendo-os em formas menos nocivas. A desinfecção química, normalmente realizada com cloro ou ozônio, busca eliminar agentes biológicos presentes na água. Outros métodos, como a eletrocoagulação e a troca iônica, são utilizados em situações específicas, conforme a composição do efluente e os requisitos de tratamento.

- c) Processos biológicos – Os processos biológicos baseiam-se na atividade de microrganismos para degradar a matéria orgânica contida nos efluentes. Os processos aeróbios, como os sistemas de lodos ativados e lagoas aeradas, utilizam oxigênio dissolvido para promover a oxidação biológica dos compostos orgânicos. Nos processos anaeróbios, como os biodigestores e lagoas anaeróbias, a decomposição ocorre na ausência de oxigênio, sendo eficiente para cargas orgânicas elevadas e com menor geração de lodo. Já os processos facultativos, como os filtros biológicos e os biodiscos, operam em ambientes que alternam entre condições aeróbias e anaeróbias, permitindo maior flexibilidade no tratamento e eficiência na remoção de matéria orgânica.

A escolha e a combinação dos processos físicos, químicos e biológicos dependem das características do efluente gerado, que variam significativamente conforme o ramo industrial. Cada setor produtivo possui particularidades quanto à composição dos seus efluentes, o que exige soluções de tratamento específicas e adaptadas às suas necessidades. Fatores como o tipo de matéria-prima utilizada, os insumos empregados nos processos, a concentração e toxicidade dos poluentes, além dos requisitos legais e operacionais, determinam quais tecnologias são mais adequadas para garantir a eficiência do tratamento e a conformidade ambiental.

A indústria têxtil, por exemplo, consome grandes volumes de água e gera efluentes com elevada carga de corantes, metais pesados e matéria orgânica. Os métodos convencionais de tratamento incluem a coagulação e a floculação,

seguidas da sedimentação e filtração, removendo sólidos suspensos e parte dos compostos orgânicos. Entretanto, esses processos apresentam limitações quanto à remoção de corantes e substâncias recalcitrantes (Kunz *et al.*, 2002). O tratamento biológico, por meio do sistema de lodos ativados, é amplamente empregado para a degradação da matéria orgânica solúvel, mas pode ser ineficiente na remoção de corantes complexos (Bitton, 2005). Para aumentar a eficiência na remoção de compostos orgânicos persistentes, têm sido explorados processos avançados, como a fotocatálise e a adsorção em carvão ativado (Leal, 2014).

Os efluentes originados em frigoríficos contêm altas concentrações de DBO, DQO, COT, nitrogênio total, fósforo total e sólidos totais em suspensão (SST). Devido ao uso de agentes de limpeza ácidos e alcalinos, o pH desses efluentes varia significativamente. Essa mistura complexa, composta por gorduras, proteínas, fibras, compostos orgânicos, nutrientes, microrganismos patogênicos e não patogênicos, além de detergentes e desinfetantes, torna os efluentes potencialmente prejudiciais. Portanto, o tratamento adequado e a disposição correta das águas residuais em frigoríficos de carnes constituem uma necessidade tanto econômica quanto de saúde pública (Paloschi, 2020). Os efluentes em frigoríficos são divididos em duas linhas: a Linha Vermelha, originada dos processos industriais com alto teor de proteínas e gorduras (80-85% do fluxo), e a Linha Verde, proveniente de áreas auxiliares com baixa carga nutritiva e elevada contaminação biológica. O tratamento inicia com etapas preliminares, como gradeamento, peneiramento, e separação em caixas de areia e gordura, seguido pelo tratamento primário, que utiliza decantação e flotação baseadas na coagulação/floculação para remoção de sólidos. Em seguida, o tratamento secundário emprega processos biológicos, iniciando com uma etapa anaeróbia em lagoas ou reatores (como UASB) e seguida de tratamento aeróbio, para degradar a matéria orgânica (Cremonini *et al.*, 2018).

Os efluentes de cervejarias possuem uma elevada carga orgânica devido à presença de açúcares, álcoois e leveduras residuais. O tratamento biológico é predominante nesse setor, sendo o processo anaeróbio uma das opções mais utilizadas devido à sua capacidade de remoção de matéria orgânica e produção de biogás (Veroneze, 2019). O tratamento aeróbio subsequente, geralmente realizado por lodos ativados, permite a remoção de matéria orgânica

remanescente e melhora a qualidade final do efluente. Recentemente, sistemas de membranas, como ultrafiltração e osmose inversa, vêm sendo explorados como estratégias para aprimorar a eficiência do tratamento e viabilizar o reuso da água (Lopes, 2022).

Os efluentes da indústria cosmética apresentam alta complexidade devido à presença de surfactantes, óleos, fragrâncias e conservantes. O tratamento primário geralmente envolve processos físico-químicos, como coagulação e floculação, para a remoção de sólidos suspensos e redução da carga orgânica (Melo e Mounteer, 2017). O tratamento biológico tem se mostrado eficiente na degradação de compostos orgânicos, sendo os reatores aeróbios uma alternativa amplamente adotada (Bitton, 2005).

3.3

REUSO DE EFLUENTES

O interesse pelo reuso da água surge da preocupação com a escassez futura desse recurso ou em regiões onde sua disponibilidade já é limitada. Embora o conceito de reuso seja antigo, com registros dessa prática desde a Grécia Antiga, a crescente demanda torna essencial um planejamento estruturado. Além disso, é fundamental ampliar os esforços não apenas para o reuso, mas também para um uso mais racional e eficiente da água, minimizando perdas e desperdícios (Barros *et al.* 2015).

De acordo com Santos *et al.* (2023), a utilização de águas residuais tratadas para irrigação não só ajuda a reduzir a demanda por água potável, mas também pode proporcionar benefícios econômicos e ambientais, especialmente em regiões afetadas por secas e falta de recursos hídricos. No entanto, é fundamental que os efluentes sejam adequadamente tratados para evitar o acúmulo de substâncias tóxicas no solo e nas plantas.

Além da irrigação, outras aplicações de efluentes industriais incluem o uso em sistemas de resfriamento e para limpeza de áreas industriais. Costa *et al.* (2020) discutem que, em muitas indústrias, a água usada para resfriamento pode ser reutilizada após tratamento, diminuindo a necessidade de novas fontes de água e contribuindo para a redução de custos operacionais. A reutilização em processos

de limpeza também é uma opção viável, desde que a qualidade da água atenda aos requisitos específicos da aplicação.

Com a crescente deterioração da qualidade das águas disponíveis para abastecimento, torna-se cada vez mais desafiador atender aos padrões de qualidade exigidos. Os sistemas convencionais de tratamento de efluentes, em geral, não têm acompanhado essas novas demandas. Segundo Hespanhol (2015), essa tendência deve se intensificar, tornando o reuso potável, seja direto ou indireto, a alternativa mais viável para o consumo, já que todas as fontes de abastecimento exigirão processos de tratamento mais avançados.

O processo de produção de cerveja, por exemplo, gera grandes volumes de efluentes líquidos e resíduos sólidos, que precisam ser adequadamente tratados ou descartados para atender às exigências ambientais. Estima-se que, para cada litro de cerveja produzido, sejam utilizados aproximadamente dez litros de água, o que reforça a necessidade de estratégias eficazes de tratamento e reuso (Simate *et al.*, 2011).

Em termos de viabilidade econômica, o reuso de efluentes pode ser uma solução rentável para as indústrias, especialmente em regiões onde a água é escassa ou cara. Segundo Souza e Correa (2019), a adoção de práticas sustentáveis pelas organizações tem se mostrado altamente benéfica, proporcionando desde a redução de custos até a melhoria da imagem institucional. Além disso, essas práticas podem representar uma vantagem competitiva, ao evidenciar o compromisso da empresa não apenas com a lucratividade, mas também com a sociedade, por meio da preservação dos recursos naturais.

A regulamentação do reuso de efluentes é reforçada pela Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 54, de 28 de novembro de 2005, que estabelece diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água em todo o território nacional. A resolução define modalidades de reuso e destaca sua importância na conservação dos recursos hídricos, na redução da descarga de poluentes em corpos d'água e na proteção da saúde pública. Essa normatização oferece um respaldo técnico e legal para que indústrias adotem o reuso de efluentes de maneira segura e eficiente, consolidando o reuso como uma estratégia sustentável e economicamente vantajosa.

O Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB, 2006), destaca-se como uma importante iniciativa nacional voltada ao desenvolvimento de tecnologias de baixo custo, fácil aplicabilidade e adaptadas às realidades socioeconômicas e ambientais brasileiras. Dentre suas linhas prioritárias de atuação, está o condicionamento de águas residuárias para reuso e proteção de recursos hídricos, reconhecendo a urgência de soluções que ampliem a cobertura dos serviços de saneamento de forma sustentável. O documento reforça que, diante da crescente degradação dos recursos hídricos e do elevado índice de esgotos lançados *in natura* nos corpos d'água, torna-se essencial considerar o reuso de efluentes sanitários tratados como alternativa técnica e economicamente viável. O uso controlado de esgotos e lodos tratados em atividades urbanas, industriais e agrícolas é apontado como medida estratégica tanto para a conservação dos recursos hídricos quanto para a redução da pressão sobre mananciais de melhor qualidade, desde que observados os critérios sanitários, ambientais e agronômicos.

A Lei nº 14.546, de 2023 alterou a Lei nº 11.445, de 2007 (Lei de Saneamento Básico) para incorporar medidas voltadas à promoção do reuso de água e à conservação dos recursos hídricos. A nova legislação estabelece diretrizes para a adoção de práticas sustentáveis, como o aproveitamento de águas pluviais e o reuso de águas cinzas para fins não potáveis, incluindo o uso em sistemas de irrigação, descargas sanitárias e processos industriais. Além disso, a lei impõe aos prestadores de serviço público de abastecimento de água a responsabilidade de implementar ações que incentivem a reutilização de água, visando à redução do consumo de água potável e ao combate ao desperdício. Essa regulamentação fortalece o arcabouço jurídico nacional sobre o reuso, proporcionando um incentivo legal e estratégico para a implementação de sistemas de reuso em diversos setores.

O uso de fontes alternativas de água não potável em edificações foi regulamentado pela ABNT NBR 16783:2019. No item 5.2.2 a norma apresenta os requisitos de qualidade a serem seguidos para que a água seja considerada apta para utilização, conforme exposto na Figura 4.

Parâmetros	Limite
pH	6,0 a 9,0
E. Coli	≤ 200 NMP/100mL
Turbidez	≤ 5 UT
DBO _{5,20}	≤ 20 mgO ₂ /L
CRL (cloro residual livre)	Mínimo 0,5mg/L – Máximo de 5,0 mg/L Recomendável 0,5mg/L – Máximo de 2,0 mg/L
Sólidos dissolvidos totais (SDT) ou condutividade elétrica ^a	≤ 2 000 mg/L ou ≤ 3 200 µS/cm
Carbono orgânico total (COT) ^b	< 4 mg/L
^a Os valores de condutividade apresentam correlação com os sólidos dissolvidos totais. Uma outra opção é realizar a análise dos sólidos dissolvidos totais. ^b Somente para água de rebaixamento de lençol freático.	

Figura 4 – Requisitos para Reuso

Fonte: ABNT NBR 16783:2019.

A ABNT NBR 13969:1997 estabelece diretrizes para o projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos de tanques sépticos. Embora seu foco principal seja o tratamento de esgotos domésticos, a norma também orienta sobre alternativas de tratamento que podem ser adaptadas para diferentes contextos e demandas locais. Ao definir parâmetros técnicos para o tratamento e disposição final dos efluentes, a NBR 13969:1997 contribui para a melhoria da qualidade dos efluentes tratados, possibilitando o reuso seguro em diversas aplicações, como irrigação paisagística e processos industriais. A aplicação dessa norma, portanto, reforça a viabilidade técnica do reuso, garantindo que a água reutilizada atenda a padrões de qualidade adequados e contribua para a conservação dos recursos hídricos.

O Manual de *Conservação e Reuso de Água em Edificações*, elaborado pela Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP) em 2005, apresenta diretrizes detalhadas para a implantação de sistemas de reuso e conservação da água, com ênfase na substituição de fontes para usos menos exigentes. O documento destaca que atividades como lavagem de pisos, irrigação de jardins, descarga de vasos sanitários e sistemas de resfriamento podem ser abastecidas com águas de qualidade inferior, desde que atendam a parâmetros mínimos de qualidade. Para o reuso em edificações, por exemplo, recomenda-se que a água tratada apresente turbidez inferior a 5 NTU; pH entre 6,0 e 9,0; e ausência de

coliformes termotolerantes em 100 mL, especialmente quando houver contato humano direto ou indireto.

Além das normas já mencionadas, destaca-se a proposta apresentada no relatório técnico elaborado no âmbito do Projeto Interáguas, coordenado pelo Ministério das Cidades em parceria com o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA). O documento propõe uma classificação detalhada das modalidades de reuso, incluindo os usos urbanos irrestrito e restrito, cada um com requisitos específicos de qualidade. O reuso urbano irrestrito contempla aplicações em áreas de livre acesso ao público, como irrigação de parques, praças e jardins, lavagem de ruas e controle de poeira, exigindo padrões mais rígidos para garantir a segurança sanitária. Já o reuso urbano restrito refere-se a usos em locais com acesso controlado ou limitado ao público, como áreas industriais e canteiros de rodovias, permitindo critérios menos exigentes. Entre os parâmetros considerados estão os coliformes termotolerantes, turbidez, SST, pH, e concentrações máximas de metais pesados. Para o reuso urbano irrestrito, por exemplo, é recomendado que o número de coliformes termotolerantes não ultrapasse 2,2 NMP/100 mL, enquanto para o uso urbano restrito o limite pode chegar a 200 NMP/100 mL, de acordo com o grau de exposição humana previsto. Essas diretrizes visam garantir a proteção da saúde pública e, ao mesmo tempo, ampliar as possibilidades de reuso eficiente da água em ambientes urbanos (IICA, 2017).

Para os usos irrestritos, as diretrizes da EPA recomendam no mínimo tratamento secundário, seguido de filtração e desinfecção. A qualidade da água resultante deve atender a parâmetros como pH entre 6,0 e 9,0, DBO $\leq$ 10 mg/L, turbidez $\leq$ 2 NTU e ausência de coliformes fecais por 100 mL. A desinfecção deve manter um residual mínimo de 1 mg/L de cloro livre, e o monitoramento deve ser contínuo ou diário, dependendo do parâmetro avaliado. Já no reuso urbano restrito, são aceitos valores mais flexíveis, como DBO e SST $\leq$ 30 mg/L e coliformes fecais $\leq$ 200/100 mL, mantendo-se, contudo, a exigência de desinfecção eficaz (Usepa, 2012).

A Resolução Coema nº 2, de 02 de fevereiro de 2017, do Estado do Ceará, estabelece diretrizes específicas para o reuso direto de água não potável, reforçando a importância dessa prática como estratégia de conservação e

racionalização dos recursos hídricos. A norma define diferentes modalidades de reuso, como urbano, agrícola, florestal, ambiental, industrial e para aquicultura e impõe requisitos técnicos e padrões de qualidade para cada uma delas. Para o reuso urbano externo, por exemplo, são exigidos limites como até 5.000 coliformes termotolerantes por 100 mL e pH entre 6,0 e 8,5, com critérios ainda mais restritivos para aplicações sensíveis, como irrigação paisagística. Além disso, a resolução distingue o reuso interno (dentro do próprio processo industrial) do reuso externo (fora do empreendimento), sendo este último condicionado à apresentação de projeto técnico e análise prévia do órgão ambiental competente.

O Decreto Estadual nº 47.403, de 15 de dezembro de 2020, representa um passo importante na gestão sustentável dos recursos hídricos em nível estadual, uma vez que o artigo 13, inciso II, preconiza que todos os novos projetos de estações de tratamento de águas residuais deverão considerar, durante os estudos de localização, as oportunidades de reuso da água para fins não potáveis pelas atividades industriais, comerciais e agrícolas da região, diante das demandas locais.

Em relação às normativas internacionais destaca-se a norma ISO 20426:2018 que estabelece diretrizes para a avaliação e gestão de riscos à saúde no reuso de água para fins não potáveis, abrangendo aplicações como irrigação, usos urbanos, recreacionais, ambientais e industriais. Fundamentada em princípios de gestão de risco, a norma propõe uma abordagem baseada na identificação de perigos, avaliação qualitativa ou quantitativa dos riscos e implementação de barreiras de controle ao longo do processo de produção da água de reuso. Um dos destaques da ISO 20426:2018 é o reconhecimento explícito do reuso de efluentes industriais tratados, considerando aplicações como água de resfriamento, alimentação de caldeiras e processos industriais em geral. A norma define níveis de qualidade da água de reuso (A, B, C e D) conforme o tipo de uso e grau de exposição, e orienta o monitoramento de parâmetros como turbidez, DBO, cloro residual e presença de patógenos.

A norma ISO 16075-1:2020 também estabelece diretrizes para o desenvolvimento e a execução de projetos de reuso de águas residuais tratadas, porém, com foco em aplicações de irrigação agrícola, paisagística e urbana não potável. A norma aborda aspectos relacionados à qualidade da água necessária

para diferentes tipos de cultivo, os impactos no solo e na saúde pública, além de considerar fatores como clima, tipo de solo, métodos de irrigação e práticas agronômicas. A norma classifica as águas de reuso em cinco categorias de qualidade (de A a E), com base em parâmetros como DBO, sólidos suspensos, coliformes e presença de nematoides. Embora seu foco não seja o reuso direto de efluentes industriais em processos industriais, a norma reconhece que efluentes industriais tratados podem ser utilizados como fonte de água para irrigação, desde que atendam aos padrões de qualidade estabelecidos e sejam compatíveis com os usos pretendidos.

Diversas outras referências internacionais foram encontradas nesta temática, porém, vale destacar o manual *Potable Reuse: Guidance for Producing Safe Drinking-Water* (WHO, 2017), que oferece orientações técnicas e institucionais para a produção de água potável a partir de efluentes de estações de tratamento de esgoto. O documento baseia-se no conceito de múltiplas barreiras e na aplicação de planos de segurança da água, abordando aspectos como a caracterização e proteção do esgoto de origem, os tipos de medidas de controle e monitoramento necessários, e estratégias para promover a aceitação pública. A Organização Mundial da Saúde (OMS) também recomenda o uso de ferramentas como a *Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico* para fundamentar decisões regulatórias. A publicação inclui estudos de caso internacionais e é voltada a operadores, reguladores e profissionais de saúde ambiental, servindo como uma referência global para a implementação segura e eficaz do reuso potável direto (RPD) e indireto (RPI). Cabe destacar que atualmente as normativas brasileiras não orientam a utilização de águas de reuso para fins potáveis, dificultando a implementação das orientações desta referência.

4

METODOLOGIA

Neste capítulo, serão detalhados os procedimentos metodológicos adotados para a realização desta pesquisa, que tem como objetivo principal verificar o nível de preparo de um grupo de indústrias do Estado do Rio de Janeiro para implementar o reuso de efluentes, considerando os processos de tratamento adotados e os parâmetros de qualidade necessários e propor diretrizes técnicas e operacionais para sua adequação, contemplando aspectos tecnológicos e normativos. As etapas estão descritas na Figura 5.

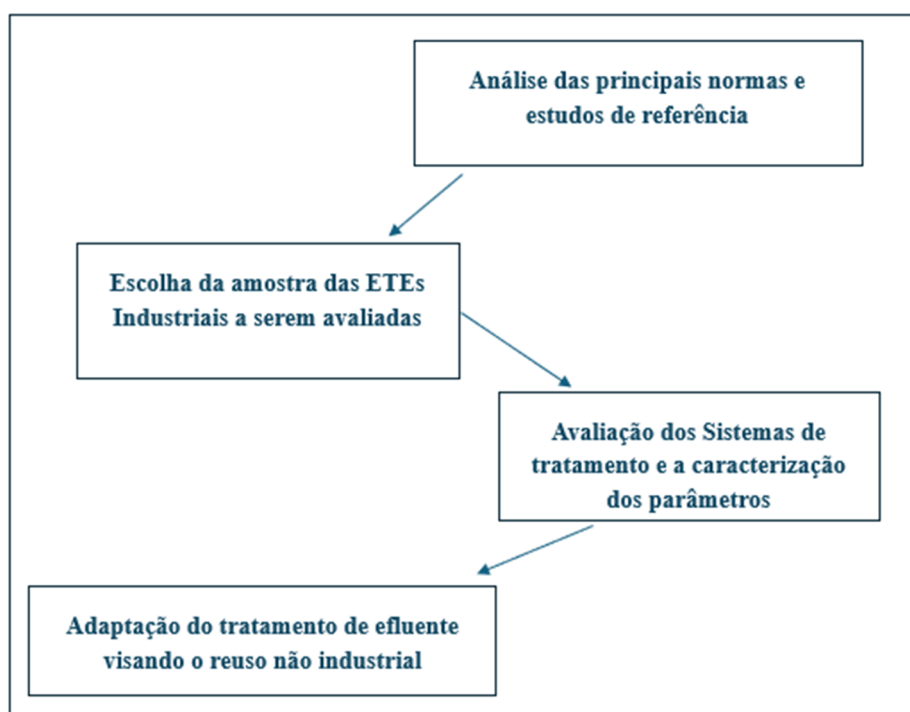


Figura 5 – Fluxograma dos Processos Metodológicos

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

4.1

ANÁLISE DAS PRINCIPAIS NORMAS E ESTUDOS DE REFERÊNCIA

Embora diversas normas técnicas tratem do reuso de efluentes, destaca-se a já consolidada ABNT NBR 13969:1997, voltada ao reuso de água proveniente do esgotamento sanitário. Essa norma é corroborada pela ABNT NBR 16783:2019,

além de diversas normas internacionais que adotam a prática de classificar os tipos de reuso em diferentes categorias ou classes, conforme o nível de tratamento e os usos pretendidos. Essa abordagem possibilita uma maior flexibilidade na aplicação da água de reuso para fins não potáveis em edificações, como irrigação paisagística, lavagem de pisos, entre outros. A ABNT NBR 16783:2019, em particular, detalha os processos de tratamento recomendados e os parâmetros de qualidade exigidos para cada categoria de reuso, organizando-os em quatro classes distintas, conforme descrito a seguir e cujos parâmetros e sistemas de tratamento servirão como base para a avaliação da metodologia proposta.

A Classe 1 abrange aplicações como lavagem de carros e outros usos que envolvem contato direto com a água, incluindo chafarizes, com possível aspiração de aerossóis. Os parâmetros de qualidade exigem turbidez inferior a 5 NTU, coliformes fecais inferiores a 200 NMP/100 mL, sólidos dissolvidos totais inferiores a 200 mg/L, pH entre 6,0 e 8,0, e cloro residual entre 0,5 mg/L e 1,5 mg/L. O tratamento recomendado inclui um sistema aeróbio (filtro aeróbio submerso ou LAB), seguido de filtração convencional (areia e carvão ativado) e cloração, sendo possível substituir a filtração convencional por membranas filtrantes.

A Classe 2 é destinada a aplicações como lavagem de pisos, calçadas, irrigação de jardins e manutenção de lagos e canais paisagísticos, exceto chafarizes. Os parâmetros exigem turbidez inferior a 5 NTU, coliformes fecais inferiores a 500 NMP/100 mL e cloro residual superior a 0,5 mg/L. O tratamento consiste em um processo biológico aeróbio (filtro aeróbio submerso ou Lodo Ativado com Biofiltro – LAB), seguido de filtração de areia e desinfecção, com a opção de substituir a filtração por membranas filtrantes. Complementarmente alguns autores corroboram com esta necessidade de tratamento para a lavagem de pisos, calçadas, irrigação de jardins e lagos paisagísticos: Filtração por Areia e Carvão Ativado – Remoção de turbidez e poluentes remanescentes. (Linhares, 2017); Desinfecção (Cloração) – Garantia de controle microbiológico, com cloro residual acima de 0,5 mg/L (Funasa, 2013).

A Classe 3 se aplica ao reuso em descargas de vasos sanitários. Os parâmetros exigem turbidez inferior a 10 e coliformes fecais inferiores a 500 NMP/100 mL. Em geral, águas de enxágue de máquinas de lavar roupas atendem

a esse padrão, sendo necessária apenas cloração. Para outras fontes, recomenda-se tratamento aeróbio seguido de filtração e desinfecção.

Por fim, a Classe 4 abrange o reuso em pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos por escoamento superficial ou irrigação pontual. Os parâmetros incluem coliformes fecais inferiores a 5.000 NMP/100 mL e oxigênio dissolvido superior a 2,0 mg/L, devendo-se interromper as aplicações pelo menos 10 dias antes da colheita.

4.2

ESCOLHA DA AMOSTRA DAS ETES INDUSTRIAIS A SEREM AVALIADAS

Para a realização deste estudo, foram utilizados os laudos de análises de efluentes provenientes do laboratório da empresa CAF Química Ltda. Com base nesses resultados, foi possível avaliar a qualidade dos efluentes após o tratamento, com o objetivo de verificar a viabilidade de sua utilização para fins de reuso. As informações sobre os sistemas de tratamento adotados por cada uma das indústrias foram obtidas por meio de experiências e trabalhos técnicos previamente realizados pela autora junto às respectivas empresas.

Os dados analisados contemplam uma amostra composta por seis indústrias de diferentes ramos de atividade: duas cervejarias (Cervejaria 1 e Cervejaria 2), uma indústria cosmética, uma fábrica de peças metálicas, uma confecção de vestuário e um frigorífico. Essa diversidade setorial permitiu observar uma ampla gama de características nos efluentes gerados, refletindo distintas composições físico-químicas e potenciais desafios para o reuso.

A heterogeneidade dos dados reforça a importância de abordagens específicas para cada setor, ao mesmo tempo em que fornece um panorama abrangente sobre os desafios e as oportunidades para o reuso de efluentes tratados. Tal diversidade contribui para a construção de diretrizes mais adaptáveis, capazes de orientar outras indústrias na adoção de soluções alinhadas à sustentabilidade hídrica.

Cabe ressaltar que a amostra considerada pode não ser representativa do conjunto total de indústrias do Estado do Rio de Janeiro. Entretanto, a depender de sua diversidade, poderá fornecer subsídios relevantes para a compreensão de possíveis

estratégias de adaptação ao reuso de efluentes tratados, contribuindo como referência para a implementação de soluções viáveis por parte dessas e de outras indústrias.

4.3

AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO E A CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS

Esta etapa corresponde à análise dos sistemas de tratamento de efluentes empregados por cada uma das indústrias da amostra, bem como à verificação dos parâmetros de qualidade monitorados por essas empresas. Os valores obtidos foram comparados com os limites exigidos para as diferentes classes de reuso apresentadas anteriormente. A partir dessa análise, as indústrias são enquadradas em uma ou mais categorias:

- (i) sistema de tratamento inadequado;
- (ii) ausência de monitoramento de parâmetros relevantes; ou
- (iii) presença de parâmetros incompatíveis com os requisitos mínimos para reuso.

Nos casos em que tanto o sistema de tratamento quanto o monitoramento e os valores dos parâmetros estiverem em conformidade, indicando a classe de reuso potencialmente aplicável à indústria.

Quando identificadas falhas ou inconformidades, a etapa seguinte da metodologia apresenta as adaptações técnicas necessárias para viabilizar o reuso dos efluentes.

4.4

ADAPTAÇÃO DO TRATAMENTO DE EFLUENTE VISANDO O REUSO NÃO INDUSTRIAL

Nesta etapa, foram identificadas as lacunas técnicas e operacionais nos sistemas de tratamento de efluentes avaliados, com o objetivo de propor melhorias que viabilizem o reuso da água tratada em edificações, para fins não potáveis, como descarga de vasos sanitários, lavagem de áreas externas e irrigação paisagística. A análise considera as inconformidades observadas na etapa anterior,

tanto em relação à eficiência do tratamento quanto ao monitoramento e aos parâmetros de qualidade da água.

Com base nessa avaliação, elaborou-se a recomendação metodológica contendo diretrizes para adequação dos sistemas existentes, incluindo orientações sobre tecnologias complementares de tratamento, exigências de controle de qualidade, estratégias de separação de redes e medidas de segurança sanitária. Estruturou-se a recomendação de forma a auxiliar indústrias na implementação de sistemas de reuso de efluentes tratados em atividades não industriais dentro de suas instalações, promovendo o uso racional da água e a conformidade com os critérios definidos pelas NBR 13969:1997, NBR 16783:2019 e outras normas aplicáveis.

5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados de cada uma das etapas da metodologia apresentada, considerando a disponibilidade de dados industriais disponibilizados à autora do trabalho.

5.1

ANÁLISE DAS PRINCIPAIS NORMAS E ESTUDOS DE REFERÊNCIA

A primeira etapa da metodologia consistiu na análise das principais normas técnicas e estudos de referência sobre reuso de efluentes. No entanto, por se tratar de um procedimento metodológico que fundamenta todo o desenvolvimento do trabalho e a posterior avaliação das indústrias, essa etapa foi detalhadamente apresentada no capítulo de Metodologia. Assim, não serão reiterados resultados desta fase neste capítulo, uma vez que suas contribuições já foram devidamente abordadas como parte da estrutura metodológica adotada.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos Parâmetros e Tratamentos definidos como referência para a análise do presente trabalho.

Tabela 1 – Reuso com Parâmetros e Tratamentos definidos como referência

Classe	Aplicações	Turbidez (NTU)	Coliformes fecais (NMP/100mL)	SDT (mg/L)	pH	Cloro residual (mg/L)	OD (mg/L)	Tratamento - Biológico	Tratamento - Filtração	Tratamento - Desinfecção	Normas Correlatas
1	Lavagem de carros, chafarizes, contato direto com aerossóis	< 5	< 200	< 200	6,0–8,0	0,5–1,5	—	Filtro aeróbio submerso ou LAB	Areia + carvão ativado ou membranas	Cloração	USEPA; NSF/ANSI 350
2	Lavagem de pisos, calçadas, irrigação de jardins, lagos paisagísticos	< 5	< 500	—	—	> 0,5	—	Filtro aeróbio submerso ou LAB	Areia ou membranas	Cloração	Funasa, 2013; Linhares, 2017
3	Descargas de vasos sanitários	< 10	< 500	—	—	≥ 0,5 (se clorado)	—	Somente se não for água de lavagem	Filtração (quando necessário)	Cloração (quando necessário)	ABNT NBR 15527
4	Reuso agrícola: pomares, forragens, cereais, pastagens	—	< 5.000	—	—	—	> 2,0	Remoção básica de patógenos	Não especificado	Suspender irrigação 10 dias antes da colheita	WHO, 2006; ISO 16075-2; FAO, 2010; Conama n° 375/2006

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

5.2

AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO E A CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS

Com base nas diretrizes apresentadas na Tabela 1, foram analisadas seis indústrias de diferentes setores no Estado do Rio de Janeiro, avaliando-se seus sistemas de tratamento, os parâmetros de qualidade de efluentes e sua adequação às quatro classes de reuso descritas pela norma. Apesar do número limitado de indústrias analisadas, a diversidade de setores oferece uma visão heterogênea sobre os tratamentos de efluentes e sua adequação aos processos de reuso.

5.2.1

Avaliação do Tratamento

Nesta seção, procede-se à análise dos sistemas de tratamento de efluentes adotados pelas indústrias da amostra, com base nos laudos laboratoriais e nas informações técnicas previamente levantadas junto às empresas.

A avaliação buscou identificar a adequação dos tratamentos às diretrizes pré-estabelecidas neste trabalho baseadas em normas, bem como seu potencial para viabilizar o reuso de efluente tratado. Foram observadas variações nos resultados quanto à compatibilidade com os requisitos mínimos para reuso, o que reforça a necessidade de abordagens setoriais e tecnicamente fundamentadas para a promoção de uma maior sustentabilidade no contexto industrial. A seguir são apresentados os processos de tratamento para cada uma das indústrias.

5.2.1.1

Cervejaria 1

A Estação de Tratamento de Despejo Industrial (ETDI) utiliza o processo de tratamento biológico anaeróbio seguido de um processo aeróbio. As etapas do processo incluem gradeamento, estações elevatórias, peneiras, equalização, tanques de condicionamento, tratamentos aeróbio e anaeróbio e queimador de gases.

5.2.1.2

Cervejaria 2

A ETDI utiliza o processo de tratamento biológico anaeróbio seguido de um processo aeróbio. As etapas do processo estão descritas. As etapas do processo incluem gradeamento, estações elevatórias, peneiras, equalização, tanques de condicionamento, tratamentos aeróbio e anaeróbio, flotador, adensador de lodo excedente, centrífugas e queimador de gases.

5.2.1.3

Cosmética

Os despejos industriais são encaminhados para elevatória localizada na área da ETE. Desta elevatória são encaminhados para uma peneira estática para retirada de sólidos seguindo para o separador água e óleo do tipo teste de desempenho individual (TPI) e deste para o tanque de equalização.

O despejo do tanque de equalização é bombeado para o processo de tratamento físico-químico de coagulação e flotação. O efluente clarificado é enviado para o tanque de aeração do tratamento biológico e o lodo formado, encaminhado para tanque adensador de lodo e deste para o filtro-prensa.

5.2.1.4

Fabricação de Peças

O efluente industrial é encaminhado para ETDI, onde é tratado por bateladas e segue para o tratamento secundário biológico, que conta com dois conjuntos de fossa séptica/filtro anaeróbico/sumidouro.

5.2.1.5

Vestuário

O sistema é constituído por tratamento primário (Peneira estática, Tanque de equalização, Sistema físico-químico de flotação) e secundário (Tanque de aeração, Decantador, Prensa desaguadora).

5.2.1.6

Frigorífico

A ETE conta com elevatória, peneira, tanque de equalização, possui sistema de tratamento físico-químico, flotador, centrifuga, lagoa de aeração e decantador seguido de biológico (lodos ativados de aeração prolongada).

5.2.2

Parâmetros Analisados e Faixas de Aceitabilidade

Nesta seção, são apresentados os principais parâmetros de qualidade utilizados na avaliação dos efluentes tratados, com foco em sua relevância para a viabilidade do reuso industrial. A seleção dos parâmetros considerou os indicadores de poluição orgânica e físico-química de Turbidez, SDT, pH, Cloro Residual e turbidez.

Além da identificação e quantificação dos parâmetros, são discutidas as faixas de aceitabilidade com base na metodologia definida. A comparação entre os valores obtidos nas amostras e os limites recomendados permitiu avaliar o grau de conformidade dos efluentes tratados e identificar os pontos críticos que demandam melhorias nos processos de tratamento.

5.2.2.1

Turbidez

Apenas as cervejarias realizaram as análises de turbidez. Ambas apresentaram resultados acima do limite definido pela presente metodologia e baseado na ABNT NBR 13969:1997.

O Gráfico 1 apresenta os resultados da variação de Turbidez durante cerca de um ano de medições para a Cervejaria 1.

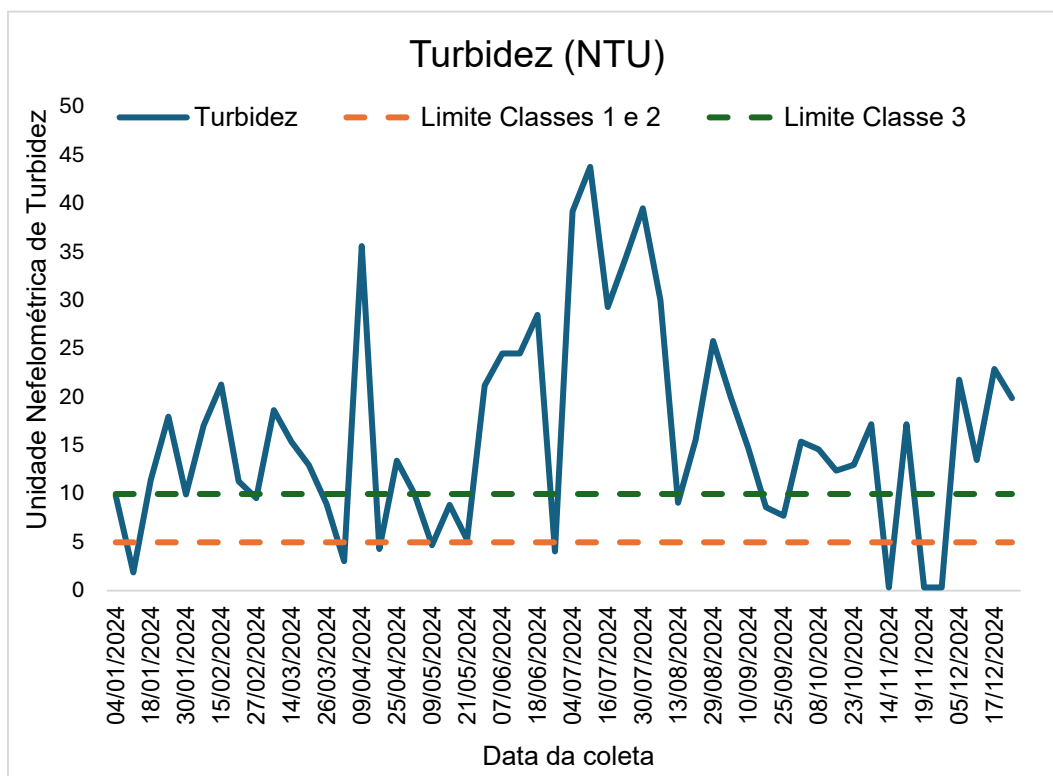


Gráfico 1 – Variação de Turbidez na Cervejaria 1 em cerca de um ano de medições

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados evidenciam que na maioria das amostras o efluente tratado não apresenta parâmetros suficientes para o reuso nem considerando as Classes 1 e 2 ($NTU < 5$), nem a Classe 3 ($NTU < 10$). Por outro lado, a Classe 4 não apresenta limitação deste parâmetro, se adequando apenas em termos de turbidez à possibilidade de reuso agrícola.

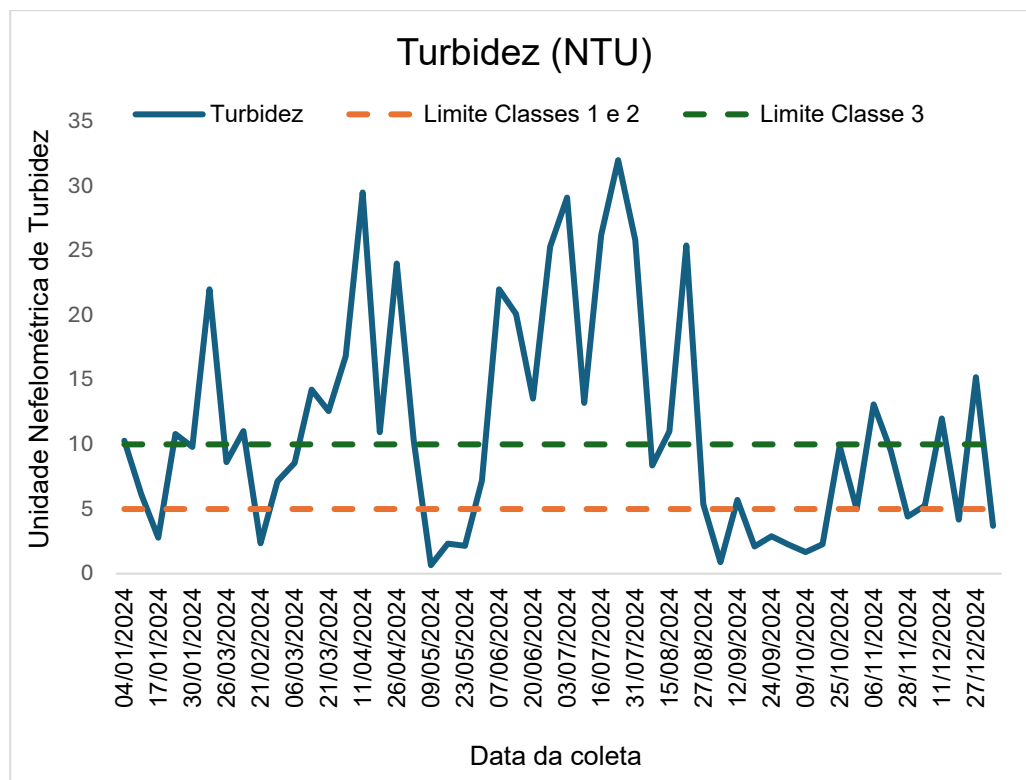


Gráfico 2 – Variação de Turbidez na Cervejaria 2 em cerca de um ano de medições

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O Gráfico 2 apresenta os resultados para a Cervejaria 2. Os resultados evidenciam que na maioria das amostras o efluente tratado não apresenta parâmetros suficientes para o reuso nem considerando as Classes 1 e 2 ($\text{NTU} < 5$), nem a Classe 3 ($\text{NTU} < 10$). Por outro lado, a Classe 4 não apresenta limitação deste parâmetro, se adequando apenas em termos de turbidez à possibilidade de reuso agrícola.

5.2.2.2

Coliformes Fecais

Nenhuma das empresas avaliadas realiza análise de Coliformes Fecais.

5.2.2.3

Sólidos Dissolvidos Totais

O Gráfico 3 apresenta os resultados para a Cervejaria 1 e os resultados mostram que na maioria das amostras o efluente tratado não apresenta parâmetros suficientes para o reuso considerando a Classe 1 ($SDT < 200$). Porém, as Classes 2, 3 e 4 não apresentam limitação deste parâmetro, então em termos de SDT este efluente estaria adequado aos usos das Classes 2, 3 e 4.

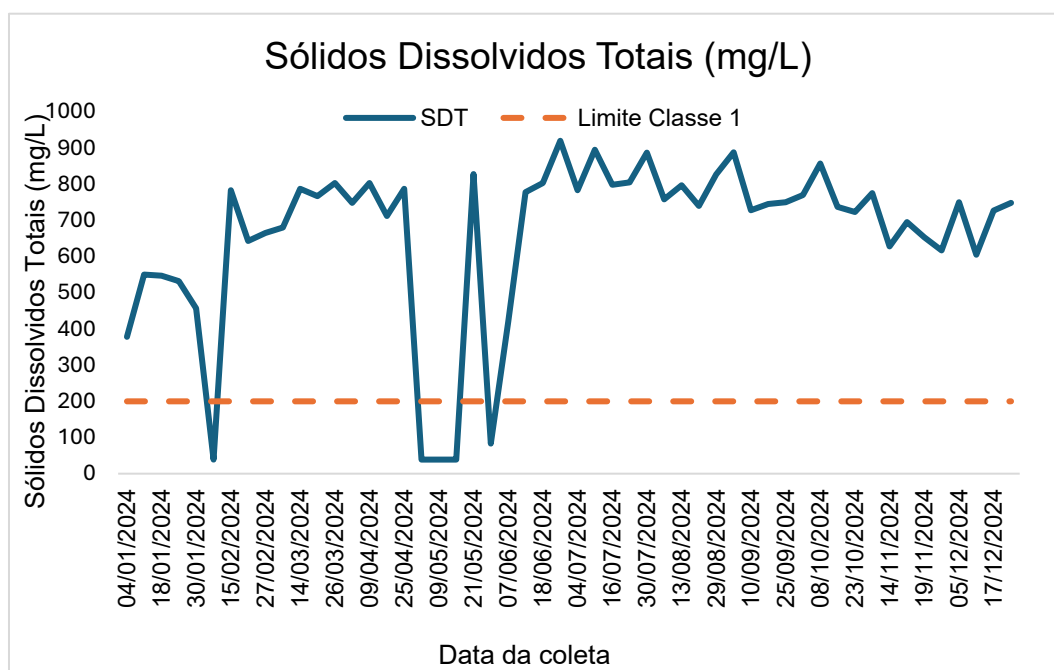


Gráfico 3 – Resultados para a Cervejaria 1 considerando a variação de Sólidos Dissolvidos Totais em doze meses de medição

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O Gráfico 4 apresenta os resultados para a indústria Cervejaria 2 e os resultados mostram que na maioria das amostras o efluente tratado não apresenta parâmetros suficientes para o reuso considerando a Classe 1 ($SDT < 200$). Porém, as Classes 2, 3 e 4 não apresentam limitação deste parâmetro, então em termos de SDT este efluente estaria adequado aos usos das Classes 2, 3 e 4.

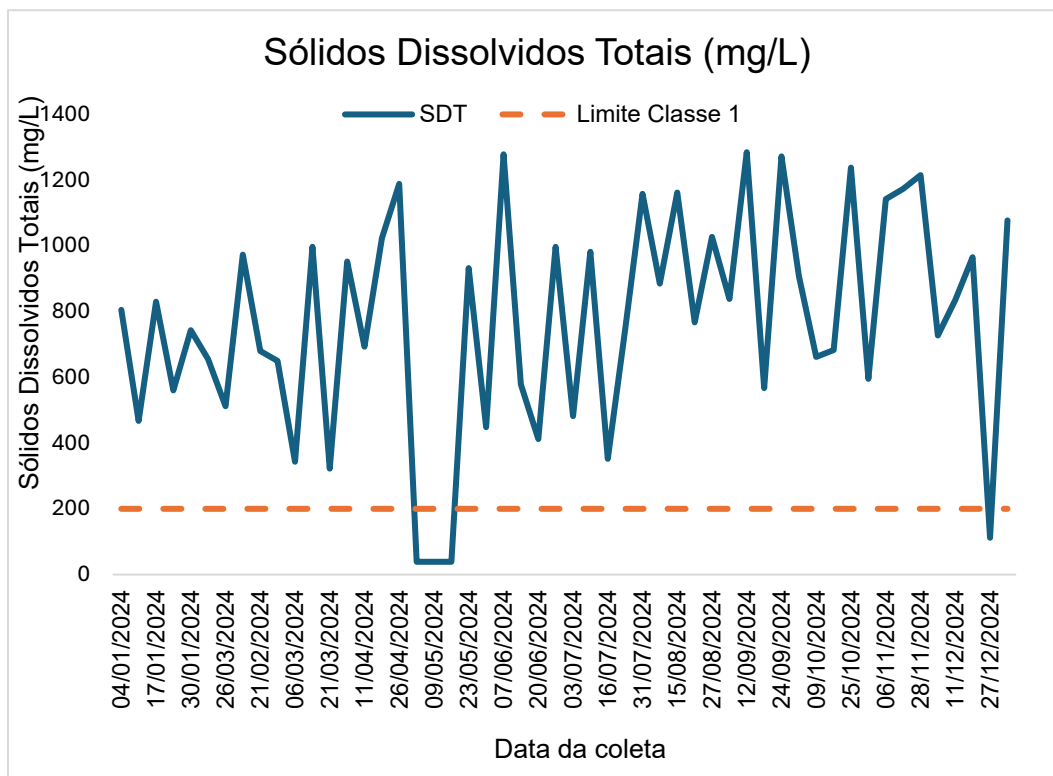


Gráfico 4 – Resultados para a Cervejaria 2 considerando a variação de Sólidos Dissolvidos Totais em doze meses de medição

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.2.2.4

pH

O Gráfico 5 apresenta os resultados para a Cervejaria 1 e os resultados evidenciam que na maioria das análises o pH do efluente tratado estava acima do limite estabelecido para a Classe 1 ($\text{pH} < 8,0$). O efluente tratado, em termos de pH, está adequado para fins relacionados às Classes 2, 3 e 4, uma vez que estas classes não exigem limite de pH.

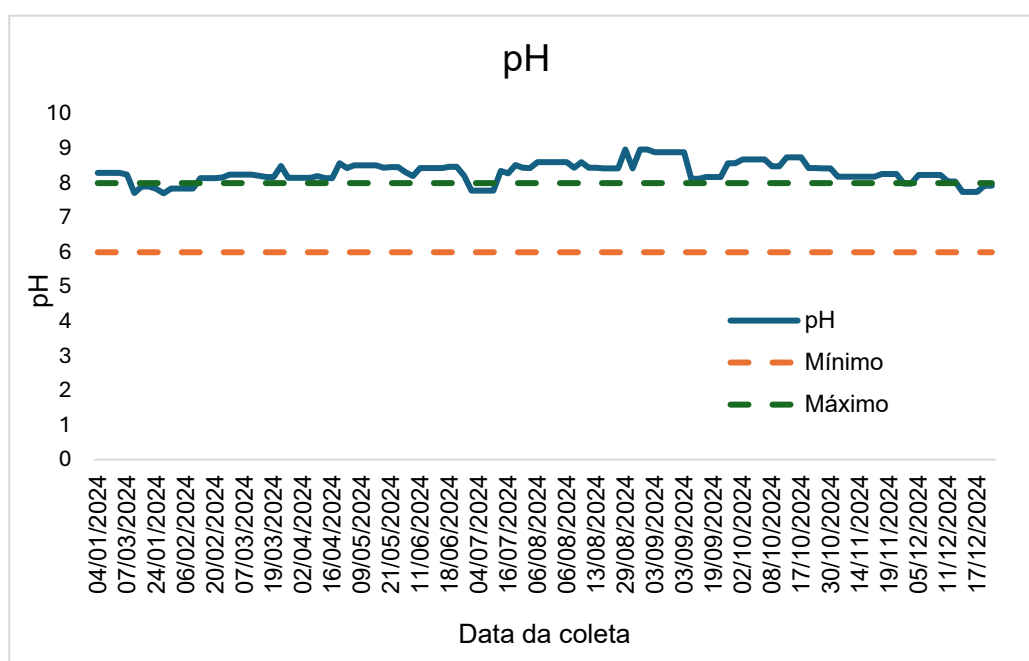


Gráfico 5 – Resultados para a Cervejaria 1 considerando a variação de pH em doze meses de medição

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O Gráfico 6 apresenta os resultados para a indústria Cervejaria 2 e os resultados evidenciam que na maioria das análises o efluente tratado atendeu ao limite estabelecido pela Classe 1. O efluente tratado, em termos de pH, está adequado para fins relacionados às Classes 2, 3 e 4, uma vez que estas classes não exigem limite de pH.

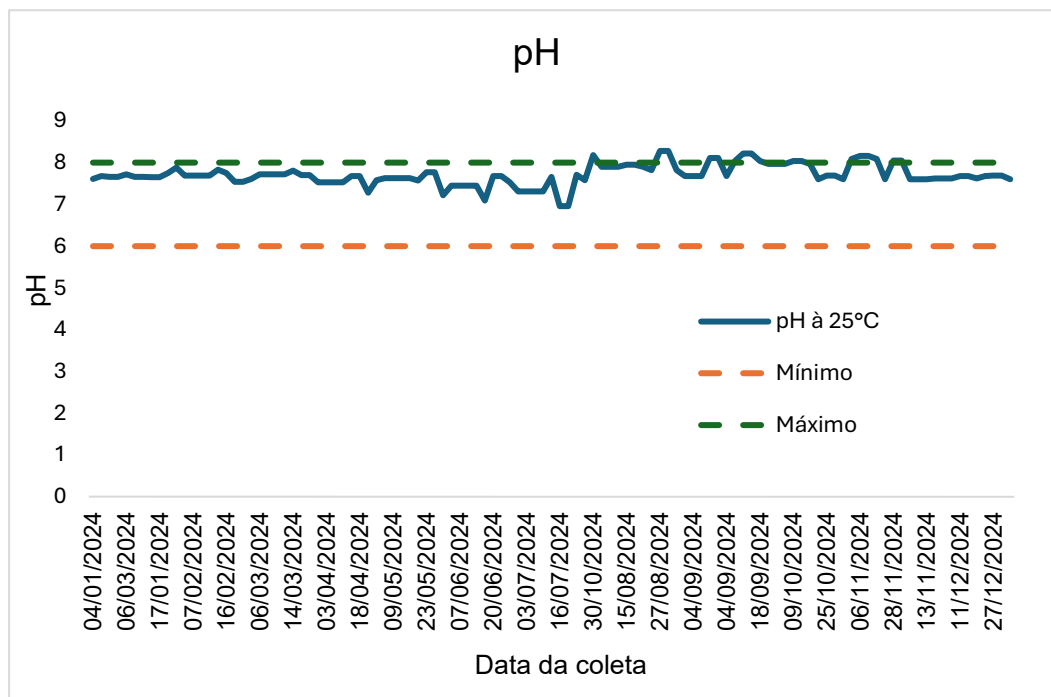


Gráfico 6 – Resultados para a Cervejaria 2 considerando a variação de pH em doze meses de medição

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O Gráfico 7 apresenta os resultados para a indústria Cosmética e os resultados evidenciam que em termos de pH, o efluente tratado está adequado a todas as Classes.

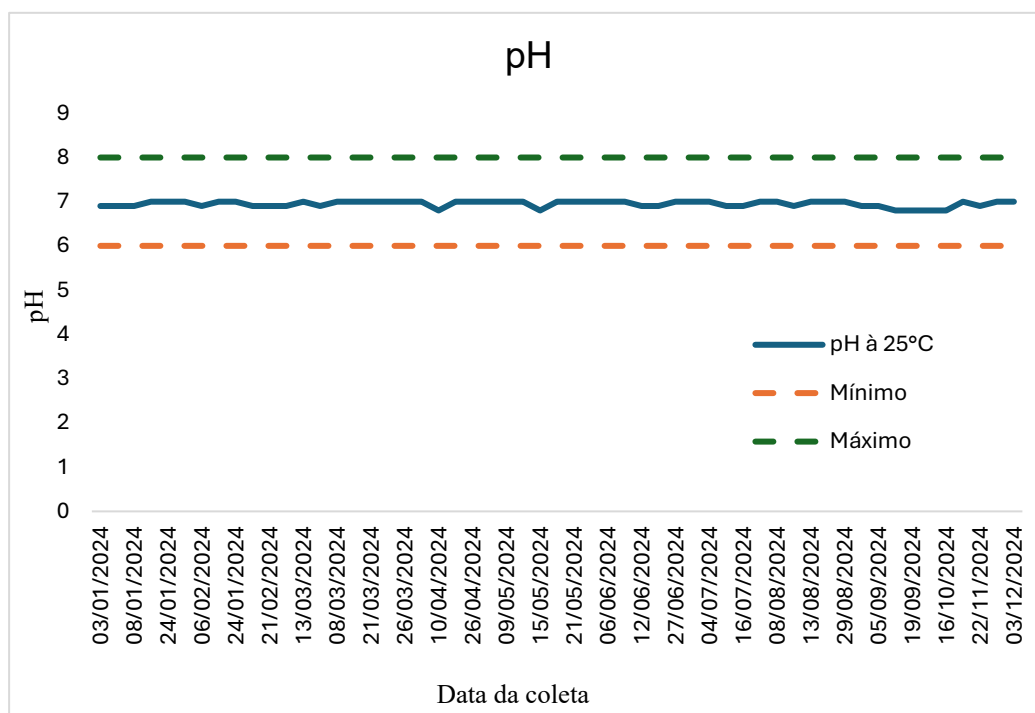


Gráfico 7 – Resultados para a Indústria Cosmética considerando a variação de pH em doze meses de medição

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O Gráfico 8 apresenta os resultados para a indústria de Fabricação de peças e os resultados evidenciam que na maioria das análises o efluente tratado atendeu ao limite estabelecido pela Classe 1. O efluente tratado, em termos de pH, está adequado para fins relacionados às Classes 2, 3 e 4, uma vez que estas classes não exigem limite de pH.

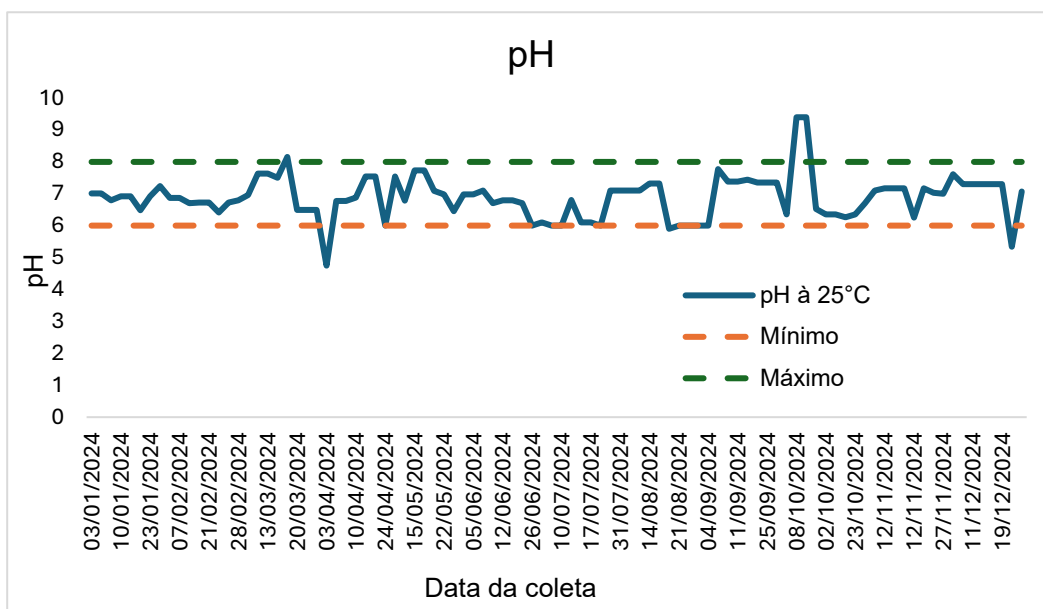


Gráfico 8 – Resultados para a Indústria de Fabricação de peças considerando a variação de pH em doze meses de medição

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O Gráfico 9 apresenta os resultados para a indústria de Vestuário e os resultados mostram que na maioria das análises o efluente tratado atendeu ao limite estabelecido pela Classe 1. O efluente tratado, em termos de pH, está adequado para fins relacionados às Classes 2, 3 e 4, uma vez que estas classes não exigem limite de pH.

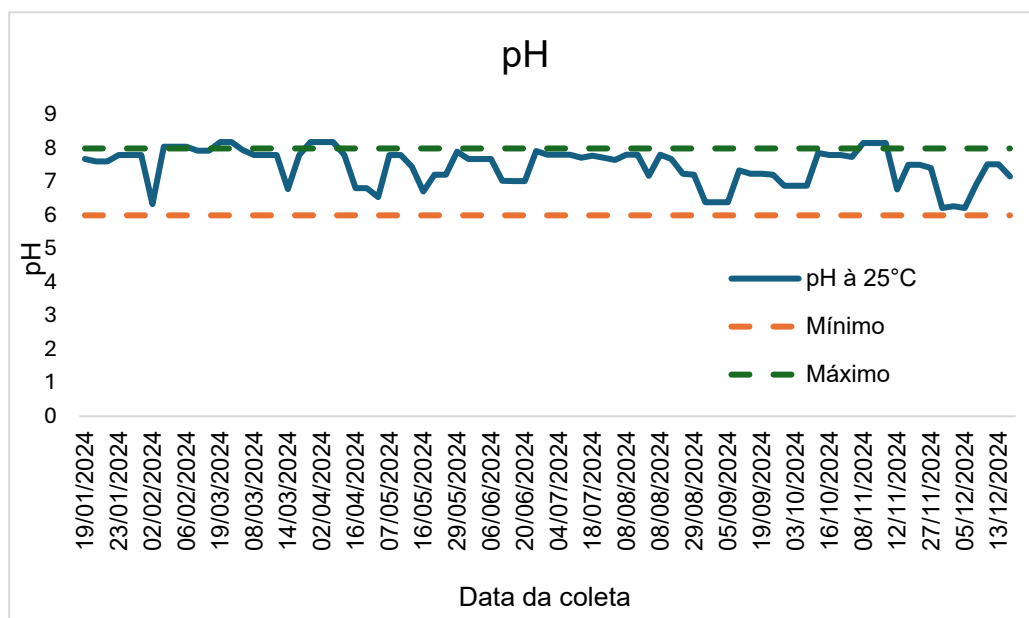


Gráfico 9 – Resultados para a Indústria de Vestuário considerando a variação de pH em doze meses de medição

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.2.2.5

Cloro Residual

O Gráfico 10 apresenta os resultados para a indústria Cervejaria 1 e os resultados mostram que na maioria das análises do efluente tratado os resultados evidenciaram a concentração de Cloro muito próxima do mínimo exigido nas Classes 1, 2 e 3. Para a Classe 4 o resultado está adequado, pois para fins de reuso agrícola não há exigência de mínimo de Cloro.

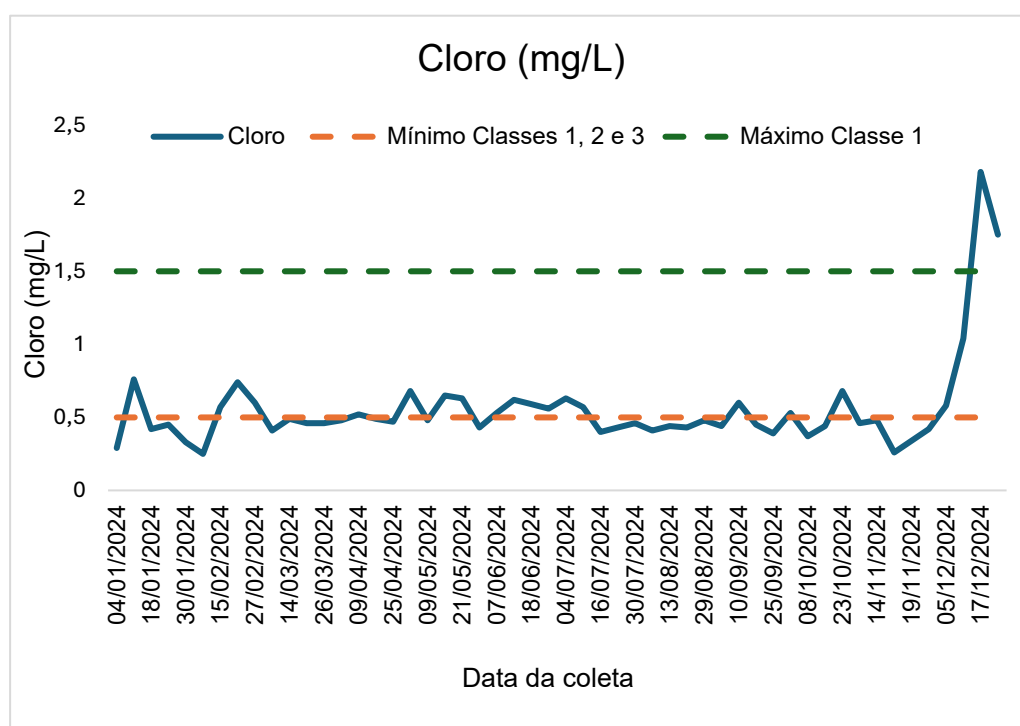


Gráfico 10 – Resultados para a Cervejaria 1 considerando a variação de Cloro Residual em doze meses de medição

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O Gráfico 11 apresenta os resultados para a indústria Cervejaria 2 os resultados evidenciam que a concentração de Cloro no efluente tratado durante todo o período analisado estava abaixo do mínimo exigido para as Classes 1, 2 e 3. Para a Classe 4 o resultado está adequado, pois para fins de reuso agrícola não há exigência de mínimo de Cloro.

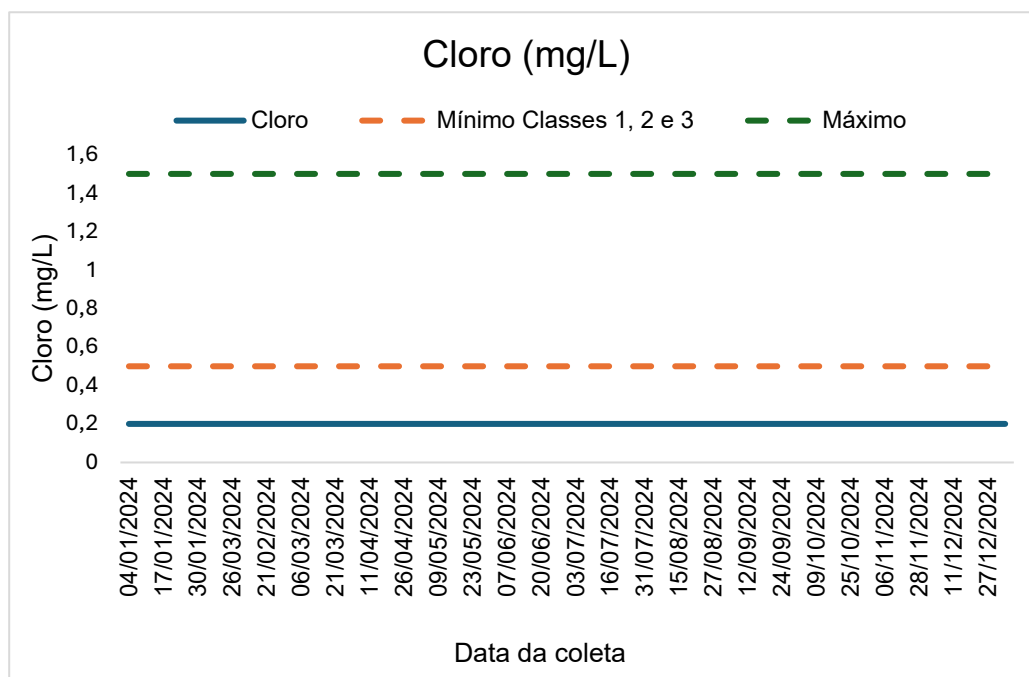


Gráfico 11 – Resultados para a Cervejaria 2 considerando a variação de Cloro Residual em doze meses de medição

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.2.2.6

Oxigênio Dissolvido

Nenhuma das empresas avaliadas realiza análise de Oxigênio Dissolvido. Contudo, para fins relacionados às Classes 1, 2 e 3 não há exigências de limites para este parâmetro.

5.2.3

Análise Geral dos Resultados

Os resultados da aplicação da metodologia evidenciaram que 100% das indústrias avaliadas realizam tratamento aeróbio. No entanto, para a Classe 4, a norma considera apenas os parâmetros de qualidade e não a forma de tratamento. Apenas uma indústria foi identificada como utilizadora do processo de filtração

convencional (areia e carvão ativado), e nenhuma das indústrias avaliadas realiza o processo de desinfecção. Dessa forma, as indústrias analisadas não poderiam inicialmente reutilizar seus efluentes tratados nas Classes 1, 2 ou 3 devido à ausência de desinfecção, considerando exclusivamente o tratamento atual dos efluentes. Esses resultados estão evidenciados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo dos tratamentos utilizados por cada uma das indústrias avaliadas

Indústria	Tratamento necessário para reuso		
	Tratamento aeróbio	Filtração convencional (areia e carvão ativado)	Cloração / membrana filtrante
Cervejaria 1	Sim	Não	Não
Cervejaria 2	Sim	Não	Não
Cosmética	Sim	Não	Não
Fabricação de peças	Sim	Não	Não
Vestuário	Sim	Sim	Não
Frigorífico	Sim	Não	Não

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Quanto aos parâmetros avaliados, somente duas indústrias (ambas do setor de cervejaria) realizaram medições de turbidez. Essas duas também foram as únicas a quantificar os sólidos totais dissolvidos, assim como o cloro residual. Já a avaliação de coliformes não foi realizada por nenhuma das indústrias citadas.

Em relação ao pH, a indústria frigorífica não realizou medições.

Considerando o tipo de tratamento e os parâmetros avaliados, as duas cervejarias mencionadas poderiam reutilizar seus efluentes na Classe 1, desde que incorporassem o processo de filtração e desinfecção e passassem a avaliar coliformes fecais. Contudo, os valores de turbidez dessas indústrias são superiores aos recomendados para essa classe, com médias acima de 15 NTU, indicando a necessidade de aprimorar a qualidade do efluente tratado, o que pode ser alcançado por meio da implementação de sistemas de pós-tratamento específicos. A eficácia da combinação de processos como coagulação, floculação, aeração, filtração e desinfecção por UV já foi demonstrada em estudos internacionais, com

taxas de remoção de coliformes totais e fecais superiores a 99%, atendendo plenamente aos padrões ambientais exigidos para o reuso de efluentes (Esteki *et al.*, 2024).

No que diz respeito aos sólidos totais dissolvidos, ambas as cervejarias apresentaram valores muito elevados em comparação aos limites estabelecidos para a Classe 1 (200 mg/L). Em algumas amostras, os valores superaram 1.000 mg/L. Para mitigar esse problema, é recomendável a inclusão de tecnologias de remoção no pós-tratamento, como osmose inversa, nanofiltração, destilação, ultrafiltração, osmose direta, precipitação, dessalinização, troca iônica, técnicas eletroquímicas, e adsorção. Essas tecnologias operam com base em princípios como separação por membranas, trocas iônicas e gradientes de temperatura, sendo amplamente utilizadas no tratamento de águas residuais com altos níveis de sólidos dissolvidos (Pushpalatha *et al.*, 2022).

O pH dos efluentes analisados se mantém, em sua maioria, entre 6 e 8, com eventuais excedências acima do limite superior, a exceção da Cervejaria 1 que constantemente apresenta resultados superiores a 8. No que concerne ao cloro residual, a Cervejaria 2 apresentou valores inferiores a 0,2 mg/L, indicando a ausência de desinfecção. A Cervejaria 1 apresentou variações de <0,2 a 1,09 mg/L, sugerindo desinfecção parcial em alguma etapa do processo.

Um resumo da avaliação dos parâmetros verificados e da adequação de cada um deles às Classes de reuso pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros verificados e enquadramento nas possíveis Classes

Tipo de Indústria	Parâmetros Verificados e Enquadramento em Classes					
	Turbidez	Coli. Fecais	SDT	pH	Cloro Residual	O.D.
Cervejaria 1	Verificado: Sim Adequado: Classe 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Nenhum	Verificado: Sim Adequado: Classes 2, 3 e 4 (Sem referência)	Verificado: Sim Adequado: Classes 2, 3 e 4	Verificado: Sim Adequado: Classes 1, 2 e 3 (parcial) Classe 4	Verificado: Não Adequado: Classes 1, 2 e 3 (Sem referência)
Cervejaria 2	Verificado: Sim Adequado: Classe 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Nenhum	Verificado: Sim Adequado: Classes 2, 3 e 4 (Sem referência)	Verificado: Sim Adequado: Classe 1 (parcial) Classes 2, 3 e 4	Verificado: Sim Adequado: Classe 4	Verificado: Não Adequado: Classes 1, 2 e 3 (Sem referência)
Cosmética	Verificado: Não Adequado: Classe 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Nenhum	Verificado: Não Adequado: Classes 2, 3, 4 (Sem referência)	Verificado: Sim Adequado: Classes 1, 2, 3 e 4	Verificado: Não Adequado: Classe 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Classes 1, 2 e 3 (Sem referência)
Fabricação de peças	Verificado: Não Adequado: Classe 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Nenhum	Verificado: Não Adequado: Classes 2, 3, 4 (Sem referência)	Verificado: Sim Adequado: Classe 1 (parcial) Classes 2, 3 e 4	Verificado: Não Adequado: Classe 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Classes 1, 2 e 3 (Sem referência)
Vestuário	Verificado: Não Adequado: Classe 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Nenhum	Verificado: Não Adequado: Classes 2, 3, 4 (Sem referência)	Verificado: Sim Adequado: Classe 1 (parcial) Classes 2, 3 e 4	Verificado: Não Adequado: Classe 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Classes 1, 2 e 3 (Sem referência)
Frigorífico	Verificado: Não Adequado: Classe 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Nenhum	Verificado: Não Adequado: Classes 2, 3, 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Classes 2, 3, 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Classe 4 (Sem referência)	Verificado: Não Adequado: Classes 1, 2 e 3 (Sem referência)

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Com base na Tabela 3 é possível identificar que para atender à Classe 4, a Cervejaria 1 precisa incluir a verificação de coliformes fecais (CF), uma vez que esse parâmetro é exigido mesmo nos limites mais permissivos e atualmente não é monitorado, além de monitorar o oxigênio dissolvido. Para alcançar a Classe 3, além da verificação de CF, é necessário ajustar a Turbidez e o Cloro Residual. A Classe 2 exige as mesmas ações da Classe 3, mantendo o mesmo limite para CF, porém, modificando os limites para turbidez. Para a Classe 1, de padrão mais restritivo, é indispensável não apenas a verificação de CF, mas também a melhoria dos valores de turbidez, SDT, pH e cloro residual, garantindo conformidade com os limites mais exigentes.

Em relação à Cervejaria 2, para se adequar à Classe 4, deve passar a monitorar CF, atualmente não verificado e monitorar o oxigênio dissolvido. Para a Classe 3, assim como na Cervejaria 1, além de monitorar o CF, é necessário ajustar a Turbidez e o Cloro Residual. Para a Classe 2 é necessário adequar Turbidez, monitorar CF e ajustar o cloro residual. Para a Classe 1, será preciso além das ações listadas para a Classe 2, ajustar SDT e garantir ainda a conformidade do pH, hoje considerado apenas parcialmente adequado.

A indústria cosmética apresenta uma situação mais complexa. Para se enquadrar na Classe 4, será necessário passar a monitorar e ajustar se necessário CF e oxigênio dissolvido (OD). Para atingir a Classe 3, é preciso monitorar e verificar Turbidez, CF, cloro residual. A Classe 2 exige as mesmas ações da Classe 3. Por fim, para a Classe 1, é necessário manter todos esses controles e passar a monitorar e avaliar SDT, pH, além de ter valores mais restritivos para Coliformes e cloro residual.

As mesmas ações de monitoramento e verificação são necessárias para as indústrias de fabricação de peças e vestírios.

Finalmente, a situação do frigorífico é a mais crítica entre as indústrias avaliadas. Dessa forma além das ações já citadas para as indústrias cosmética, fabricação de peças e vestírios para enquadramento nas Classes 1, 2, 3 e 4, é necessário passar a monitorar e avaliar o pH para enquadramento na Classe 1. O tratamento de águas residuais de matadouros por meio de processos combinados, como flotação por ar dissolvido, biorreatores de membrana e osmose inversa,

mostra-se promissor para o reuso da água, além de possibilitar a geração de energia por meio da produção de biogás (Philipp *et al.*, 2021).

5.3

ADAPTAÇÃO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES VISANDO O REUSO NÃO INDUSTRIAL

De maneira geral, com base nos resultados apresentados, o presente trabalho propõe diretrizes para alinhar o tratamento e a qualidade dos efluentes às exigências do reuso. As orientações visam promover a eficiência operacional, assegurar a conformidade com as normas técnicas e viabilizar a aplicação segura e eficaz dos efluentes tratados em diferentes finalidades.

5.3.1

Definição da Classe de Reuso

A primeira etapa consiste em estabelecer a classe de reuso pretendida (Classe 1, 2, 3 ou 4) com base nas finalidades específicas de utilização da água tratada. A definição da classe é essencial para orientar as exigências de qualidade a serem atendidas e garantir que o efluente reuso seja seguro e adequado à sua aplicação. As classes são determinadas de acordo com os limites máximos permitidos para diversos parâmetros de qualidade, como coliformes fecais, turbidez, sólidos dissolvidos totais, pH, oxigênio dissolvido e cloro residual.

Apresenta-se aqui uma síntese das quatro classes e suas possíveis aplicações não potáveis no contexto de edificações industriais:

- a) *Classe 1*: Indica a mais alta qualidade de reuso, adequada para usos com maior risco de contato humano. Aplicações típicas incluem:
- ♦ Descarga em vasos sanitários e mictórios;
 - ♦ Limpeza de pisos e superfícies internas;
 - ♦ Lavagem de uniformes e tecidos industriais;
 - ♦ Sistemas fechados de resfriamento com potencial de exposição;
 - ♦ Jardins e áreas verdes internas.

b) *Classe 2*: Indica qualidade intermediária, com exigências sanitárias ainda elevadas. É adequada para usos com contato humano eventual ou indireto, como:

- ♦ Lavagem de áreas externas e pisos de galpões;
- ♦ Irrigação de jardins externos e paisagismo;
- ♦ Sistemas de combate a incêndio;
- ♦ Reposição de água em torres de resfriamento (sem contato direto com o ar interno).

c) *Classe 3*: Reuso com menor exigência sanitária, limitado a aplicações com baixo risco de contato humano, como:

- ♦ Lavagem de veículos e equipamentos industriais;
- ♦ Lavagem de pisos em áreas técnicas e depósitos;
- ♦ Irrigação de áreas verdes com acesso restrito;
- ♦ Sistemas industriais fechados com baixo risco de exposição.

d) *Classe 4*: Reuso de qualidade mínima permitida, destinado a aplicações sem contato humano direto, como:

- ♦ Geração de água de vedação;
- ♦ Lavagem de pisos externos em áreas isoladas;
- ♦ Reposição de água em sistemas industriais sem conexão com ambientes ocupados;
- ♦ Umectação de vias internas para controle de poeira.

A escolha da classe deve considerar não apenas o tipo de uso pretendido, mas também os custos e complexidade do tratamento necessário, uma vez que classes superiores demandam tecnologias mais complexas e controle mais rigoroso dos parâmetros de qualidade.

5.3.2

Adequação dos Processos de Tratamento

Após a definição da classe, deve-se avaliar a capacidade atual do sistema de tratamento e promover as adequações necessárias. Para atender às exigências das classes superiores, é comum a necessidade de incorporar ou reforçar etapas como:

- ♦ Tratamento biológico aeróbio, para redução de matéria orgânica e melhora do oxigênio dissolvido (OD);
- ♦ Filtração em areia e carvão ativado, visando à redução de turbidez e de sólidos dissolvidos totais (SDT);
- ♦ Desinfecção eficiente, por meio de cloração, ozônio ou radiação UV, especialmente para controle de coliformes fecais.

5.3.3

Verificação dos Parâmetros de Qualidade

Realizar medições dos parâmetros relevantes para cada classe, como turbidez, sólidos dissolvidos totais, coliformes fecais, cloro residual, oxigênio dissolvido e pH, assegurando o atendimento aos padrões preestabelecidos.

Além disso, é recomendado que o efluente de cada indústria seja avaliado previamente por meio de caracterização físico-química e microbiológica, a fim de verificar a necessidade de analisar parâmetros adicionais que possam comprometer a segurança ou a eficácia do reuso. Certas atividades industriais geram poluentes específicos que não estão contemplados entre os parâmetros básicos normativos, mas que podem ter impacto significativo na qualidade da água. Por exemplo:

- ♦ Indústrias cosméticas e de limpeza podem gerar efluentes com surfactantes, corantes e fragrâncias sintéticas, que exigem tratamentos avançados de remoção de compostos orgânicos;
- ♦ Indústrias metalúrgicas ou de fabricação de peças podem apresentar traços de óleos, graxas, metais pesados e solventes industriais, demandando avaliação toxicológica e tratamento específico;

- ♦ Indústrias alimentícias e frigoríficas geram alta carga orgânica e nutrientes (nitrogênio e fósforo), o que pode comprometer o oxigênio dissolvido e exigir monitoramento adicional de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO).

5.3.4

Monitoramento e Melhoria Contínua

Implementar monitoramento periódico para identificar desvios de qualidade e realizar melhorias nos processos de tratamento e industriais. Solucionar problemas comuns, como turbidez elevada, por meio do redimensionamento e da operação eficiente de decantadores primários, otimização dos processos aeróbios e inclusão de etapas de filtração para reduzir partículas em suspensão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a amostra analisada nesta pesquisa não seja representativa do setor industrial como um todo, os resultados obtidos fornecem indicativos relevantes sobre o reuso de efluentes nas indústrias estudadas. Os dados analisados permitem identificar tendências e desafios que podem ser considerados em estudos futuros e na implementação de práticas de reuso, mesmo que não reflitam integralmente a realidade de outras empresas ou setores.

Os objetivos desta pesquisa foram atendidos, visto que a verificação do nível de preparo para implementação do reuso nas empresas foi realizada.

Em relação às normas avaliadas, observou-se que o Brasil ainda apresenta lacunas regulatórias significativas, sobretudo no que se refere ao reuso industrial. Normas como a ABNT NBR 13969:1997 e a Resolução CNRH nº 54/2005 fornecem diretrizes gerais, mas não abrangem com profundidade os requisitos técnicos para diferentes tipos de reuso, deixando a cargo do empreendedor a definição de parâmetros específicos. Em contrapartida, normas internacionais como a Usepa (2012) e a ISO 20426:2018 apresentam diretrizes mais específicas e segmentadas por aplicação, incluindo recomendações de limites para turbidez (≤ 2 NTU), coliformes termotolerantes ($\leq 2,2$ NMP/100 mL para usos irrestritos), DBO (≤ 10 mg/L) e presença de patógenos, o que confere maior segurança sanitária e previsibilidade ao processo de licenciamento.

A metodologia utilizada contribuiu para o alcance dos objetivos, porém há limitações além da mencionada, como a ausência de legislações mais específicas acerca do reuso de efluente industrial e custos de implementação da etapa terciária de tratamento. Todavia, é possível ver um potencial na viabilidade da implementação do reuso nessas indústrias.

As cervejarias foram as únicas indústrias que realizaram medições de turbidez, SDT e cloro residual, o que evidencia uma maior atenção ao monitoramento da qualidade da água. Contudo, ambas apresentaram turbidez acima de 15 NTU e SDT superior a 1.000 mg/L, valores incompatíveis com os limites das Classes 1 a 3. O pH variou entre 6 e 8, mas em alguns casos ultrapassou

o limite da Classe 1. A ausência de desinfecção e filtração compromete a possibilidade de reuso seguro, restringindo seu potencial à Classe 4, desde que aplicada a finalidades agrícolas com restrições. Essas indústrias se destacam pelo uso de tratamento aeróbio, mas carecem de etapas terciárias fundamentais para elevar a qualidade do efluente.

A Indústria Cosmética, apesar de possuir um sistema de tratamento aeróbio, há ausência de monitoramento de turbidez, SDT e coliformes, comprometendo a avaliação do efluente quanto à segurança sanitária. O pH apresentou conformidade com os limites normativos, sendo adequado para as Classes 2 a 4. No entanto, sem desinfecção ou filtração, o reuso ficaria restrito a aplicações de baixo risco.

A Fábrica de Peças apresentou valores de pH adequados à Classe 1, mas também não realizou medições de parâmetros como turbidez, coliformes e cloro residual. Assim como nas demais, o sistema de tratamento é aeróbio, sem filtração ou cloração, restringindo sua aplicabilidade em termos de reuso.

A Indústria de Vestuário foi a única a implementar filtração convencional com areia e carvão ativado, o que representa um avanço em relação às demais. Também apresentou pH dentro dos limites recomendados, mas não monitorou coliformes ou cloro residual. Isso limita o uso do efluente a aplicações da Classe 4, embora com potencial de avanço para classes superiores caso adote desinfecção.

A indústria frigorífica possui sistema mais complexo, incluindo tratamento físico-químico e biológico por lodos ativados. Apesar disso, não realiza medições de pH, turbidez, coliformes ou cloro residual, dificultando qualquer avaliação quanto ao enquadramento do efluente para reuso. A ausência de filtração e desinfecção impede a classificação do efluente além da Classe 4.

Verificou-se que a adoção de tratamento aeróbio é comum a todas as indústrias analisadas. No entanto, nenhuma delas realiza desinfecção e apenas uma utiliza filtração convencional. Essas duas etapas, amplamente recomendadas por normas como a Usepa (2012), NBR 16783:2019 e ISO 20426:2018, são essenciais para garantir a segurança microbiológica e reduzir turbidez, especialmente em aplicações de maior exposição humana.

Dessa forma, é possível concluir que, para viabilizar o reuso em níveis mais exigentes, como usos urbanos e industriais com maior contato humano, será necessário incorporar etapas adicionais de tratamento, especialmente filtração, desinfecção e monitoramento de coliformes e turbidez, além de realizar análises mais abrangentes em indústrias com efluentes complexos.

Para pesquisas futuras, recomenda-se:

- ♦ Avaliar a viabilidade do reuso de efluentes em aplicações industriais específicas, como resfriamento ou limpeza de equipamentos;
- ♦ Investigar o impacto econômico de longo prazo da adoção do reuso para diferentes tipos de indústrias;
- ♦ Realizar estudos com foco no reuso potável indireto e sua aceitação social;
- ♦ Desenvolver propostas normativas para reuso industrial, adaptadas à realidade brasileira, com base em referências internacionais.

Sendo assim, a presente pesquisa reforça a importância do reuso como estratégia essencial para a sustentabilidade hídrica no setor industrial, e evidencia a necessidade de avanços normativos e tecnológicos para sua efetiva implementação em território nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13969**: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15527**: Aproveitamento de Água de Chuva de Coberturas para Fins Não Potáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16783**: Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2024**: informe anual. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura2024_04122024.pdf. Acesso em: 23 mar. 2025.

AQUAPOLO. **Quem somos**. 2025. Disponível em: <https://www.aquapolo.com.br/quem-somos/>. Acesso em: 22 mar. 2025.

BARROS, Helder Moraes Mendes; VERIATO, Mara Karinne Lopes; SOUZA, Leandro de Pádua; CHICÓ, Luciana Rodrigues; BAROSI, Karina Xavier Leite. Reuso de água na agricultura. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 5, p. 3, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/286491844_Reuso_de_agua_na_agricultura. Acesso em: 14 abr. 2025.

BITTON, Gabriel. **Wastewater Microbiology**. 3. ed. New York: Wiley-Liss, 2005. Disponível em: https://sannhiquangngai.com/uploads/page/2018_11/wastewatermicrobiologygabrielbitton.pdf. Acesso em: 14 abr. 2025.

BRASIL. **Lei nº 11.445**, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm. Acesso em: 23 mar. 2025.

BRASIL. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005,

para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm. Acesso em: 23 mar. 2025.

BRASIL. **Lei nº 14.546**, de 04 de abril de 2023. Altera a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (Lei de Saneamento Básico), para estabelecer medidas de prevenção a desperdícios, de aproveitamento das águas de chuva e de reuso não potável das águas cinzas. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/lei/114546.htm. Acesso em: 14 abr. 2025.

BRASIL. **Resolução CNRH nº 54**, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 29 nov. 2005. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2054.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2025.

IICA – Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura. **Critérios de qualidade da água de reuso**: relatório técnico contendo proposta de critérios de qualidade para a água de reuso, definindo padrões para cada modalidade. Brasília: Interáguas, 2017.

BRUM, Marília de Marco; WARTCHOW, Dieter. Estudo de sistemas unitários como alternativa transitória para coleta de esgoto. ID nº 283. In: Rede de Saneamento e Abastecimento de Água. Congresso Internacional RESAG (3.: 2017: Belo Horizonte). 3º Congresso Internacional RESAG 2017 [recurso eletrônico]. **Anais...** 3. <http://hdl.handle.net/10183/175195>. São Paulo: RESAG, [2018]. 2017.

CEARÁ. Conselho Estadual do Meio Ambiente (Coema). **Resolução nº 2**, de 02 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias SEMACE nº 154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 05 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMACE nº 151, de 25 de novembro de 2002. Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, 21 fev. 2017. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=337973>. Acesso em: abr. 2025.

CORNELLI, Renata; AMARAL, Fernando Gonçalves; DANILEVICZ, Ângela de Moura Ferreira; GUIMARÃES, Lia Buarque de Macedo. Métodos de tratamento de esgotos domésticos: uma revisão sistemática. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 16, n. 2, p. 20-36, 2014. Disponível em: <https://ojs.revista.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/4423/3007>. Acesso em: 14 abr. 2025.

COSTA, Daniela Moraes da; SILVA, Jhully Laiane Souza da; BARRETO, Monique Sandra Oliveira Dias; BARRETO, Gilberto Caldeira. Reuso de Efluentes Tratados para Fins de Operação de Torres de Resfriamento / Reuse of Treated Wastewater for Cooling Tower Purposes. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 4, p. 2568-2577, 2020. <https://doi.org/10.34115/basrv4n4-032>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/14387/11963>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CREMONINI, Jaqueline; NEDEL, Tamires; HIGARASHI, Martha Mayumi. Tratamento de efluentes da indústria de frigoríficos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 4, n. 12, p. 124-138, dez. 2018. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-ambiental/tratamento-de-efluentes>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ESTEKI, Razieh; EHRAMPOUSH, Mohammad Hassan; NASAB, Habibeh; EBRAHIMI, Ali Asghar. Investigating the improvement of the quality of industrial effluents for reuse with added processes: coagulation, flocculation, multi-layer filter and UV. **Scientific Reports**, v. 14, article 3971, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54310-7>

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Statistics**. 2010. Disponível em: <https://www.fao.org/statistics/en/>. Acesso em: 23 mar. 2025.

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Conservação e reuso da água em edificações**. São Paulo: FIESP; ANA; SindusCon-SP, 2005. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/municipioverdeazul/2011/11/ManualConservacaoReusoAguaEdificacoes.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. **Manual Prático de Análise de Água**. 4. ed. Brasília: FUNASA, 2013. Disponível em: https://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manual_pratico_de_analise_de_agua_2.pdf. Acesso em: 14 abr. 2025.

GIORDANO, Gandhi. **Avaliação ambiental de um balneário e estudo de alternativa para controle da poluição utilizando o processo eletrolítico para o tratamento de esgotos**. Niterói, Rio de Janeiro, 1999. 137 p. Dissertação de Mestrado (Ciência Ambiental) Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 1999.

GIORDANO, Gandhi. Tratamento e controle de efluentes industriais. **Revista ABES**, v. 4, n. 76, p. 1-84, 2004. Disponível em: <https://www.drresolution.com.br/wp-content/uploads/sites/1838/2023/12/tratamento-controle-efluentes-industriais-1.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

GOETTEN, Willian Jucelio. **Proposta metodológica de atuação da vigilância sanitária municipal na fiscalização e regularização do sistema de esgotamento sanitário: estudo de caso no município de Benedito Novo, SC**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira,

2015. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/22477>. Acesso em: 14 abr. 2025.

HESPANHOL, Ivanildo. Reuso potável direto e o desafio dos poluentes emergentes. **Revista USP**, n. 106, p. 79-94, 2015. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p79-94>. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/109120>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 20426:2018** – Guidelines for health risk assessment and management for non-potable water reuse. Geneva: ISO, 2018.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 16075-1:2020** – Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects – Part 1: The basis of a reuse project for irrigation. Geneva: ISO, 2020.

KUNZ, Airton; PERALTA-ZAMORA, Patricio; MORAES, Sandra Gomes; DURÁN, Nelson. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/WZkZzMz4JLhpmxvBq5GfPqB/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LEAL, Tarcísio Wolff. **Tratamento de efluentes têxteis por processos adsorptivos visando o reuso da água**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/128714/329571.pdf;jsessionid=05AEDC31837FE1036216CBC21C712385>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LINHARES, Bruno Delvaz. **Filtros granulares (areia e carvão ativado) para pós-tratamento de efluentes de reator UASB**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29106>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LOPES, Sabrina Rodrigues. **A utilização do reuso de efluente industrial: uma análise do impacto no consumo de água na cervejaria no Brasil**. 2022. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Pesca) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/64740>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MACHADO, Rodrigo Matuella. **Caracterização e avaliação da redução da toxicidade dos efluentes de uma indústria metal-mecânica**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2014. <http://hdl.handle.net/10183/110764>. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/110764/000952997.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MELO, Elisa Dias de; MOUNTEER, Ann Honor. Panorama da indústria de cosméticos e efluentes líquidos gerados. **Sustentare**, Três Corações, v. 1, n. 1,

p. 131-151, 2017. Disponível em: http://periodicos.unincor.br/index.php/sustentare/article/view/4512/pdf_9. Acesso em: 14 abr. 2025.

NORO, Etan Alexandre. **Sistema combinado de esgotamento sanitário: alternativa viabilizadora de sistemas de esgoto**. 2012. 78 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. <http://hdl.handle.net/10183/63204>. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/63204/000861997.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ONU Brasil. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>. Acesso em: 23 mar. 2025.

PALOSCHI, Vanessa Nayara. **Tratamento de efluente de matadouro e frigorífico de suínos utilizando a eletrocoagulação: avaliação dos parâmetros operacionais**. 2020. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, 2020. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5416>. Acesso em: 14 abr. 2025.

PHILIPP, Maximilian; MASMOUDI JABRI, Khaoula; WELLMANN, Johannes; AKROUT, Hanene; BOUSSELM, Latifa; GEIBEN, Sven-Uwe. Slaughterhouse wastewater treatment: a review on recycling and reuse possibilities. **Water**, 13, n. 22, p. 3175, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13223175>

PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Texto completo do PROSAB 2006**. Brasília: FINEP, 2006. Disponível em: http://www.finep.gov.br/arquivos_legados/fundos_setoriais/acao_transversal/documentos/Texto_completo_PROSAB.PDF. Acesso em: 14 abr. 2025.

PUB – Singapore's National Water Agency. **NEWater**. 2021. Disponível em: <https://www.pub.gov.sg/Public/WaterLoop/OurWaterStory/NEWater>. Acesso em: 22 mar. 2025.

PUSHPALATHA, N.; VINOD, Sreeja; KARTHIK, R.; SARAVANAN, G. Total dissolved solids and their removal techniques. international **Journal of Environmental Sustainability and Protection**, v. 2, p. 13-20, 2022. <http://dx.doi.org/10.35745/ijesp2022v02.02.0002>

RIO DE JANEIRO. **Decreto nº 47.403**, de 15 de dezembro de 2020. Dispõe sobre a Política de Reúso de Água para Fins não Potáveis no âmbito do Estado do Rio de Janeiro. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 3 abr. 2020. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/rj/decreto-n-47403-2020-rio-de-janeiro-dispoe-sobre-a-politica-de-reuso-de-agua-para-fins-nao-potaveis-no-ambito-do-estado-do-rio-de-janeiro>. Acesso em: 21 mar. 2025.

SANTOS, Laíssy Messias dos; SOUSA, Íkaro Damião Hora; TORRES, Taiane Aparecida Santos; MENDONÇA, Luciana Coêlho. Reuso de águas residuais na irrigação: mapeamento sistemático na literatura. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 5,

n. 3, 2023. Disponível em: <https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/316>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SIMATE, Geoffrey S.; CLUETT, John; IYUKE, Sunny; MUSAPATIKA, Evans; NDLOVU, Sehliselo; WALUBITA, Lubinda; ALVAREZ, Alex. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. **Desalination**, v. 273, n. 273, p. 235-247, 2011. 10.1016/j.desal.2011.02.035.

SILVA, Dafne Fernanda Alves e; SILVA, Elisa Inácio da; SILVEIRA, Louise da; ANÍCIO, Sabrina de Oliveira; BRANCO FILHO, Thelmo de Carvalho Teixeira; MALHEIROS, Tadeu Fabrício. Situação da economia circular a partir do Novo Marco Legal do Saneamento Básico no Brasil. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental – IPEA**, 29, 2023. DOI:10.38116/brua29art5. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/12175/1/BRUA_29_Artigo_5_situacao_da_Economia_circular_a_partir_do_marco_legal.pdf. Acesso em: 14 abr. 2025.

SILVA, Leandro de Oliveira. Uso de Biodigestores em Estação de Tratamento de Esgoto. **Uniciências**, v. 28, n. 1, p. 25-31, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2024v28n1p25-31>. Disponível em: <https://uniciencias.pgsscogna.com.br/uniciencias/article/view/12040>. Acesso em: 23 mar. 2025.

SOUZA, Wemerson; CORREA, Willian. Reuso urbano de água nas organizações para fins não potáveis. **Anais do 1º Simpósio de TCC, das Faculdades FINOM e Tecsoma**. 2019; 792-813. Disponível em: <https://finom.edu.br/assets/uploads/cursos/tcc/202104131204524.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

TOCHETTO, Márcio. **Gestão comparativa de sistemas de coleta e tratamento de esgoto visando a universalização e a sustentabilidade**. 2021. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, 2021. Disponível em: <http://tede.upf.br:8080/jspui/handle/tede/2179>. Acesso em: 14 abr. 2025.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **2012 Guidelines for Water Reuse**. Washington, D.C.: EPA, 2012. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2025.

VERONEZE, Maria Luiza. **Avaliação da produção de biogás a partir de água residuária de cervejaria**. 2019. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná, 2019. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/4349>. Acesso em: 14 abr. 2025.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996.

WHO – World Health Organization. **Potable reuse: guidance for producing safe drinking-water**. Geneva: WHO, 2017.