

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LUANA NASCIMENTO VICENTE

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REATOR ANAERÓBIO SEGUIDO
DE AERÓBIO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DOMÉSTICO DE
UMA INDÚSTRIA NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

MANAUS

2026

LUANA NASCIMENTO VICENTE

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REATOR ANAERÓBIO SEGUIDO
DE AERÓBIO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DOMÉSTICO DE
UMA INDÚSTRIA NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

**Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia)
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Química da Escola Superior de
Tecnologia da Universidade do Estado do
Amazonas, para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química.**

Orientadora: Prof. Dra. Érica Simplício de Souza

MANAUS

2026

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

V633a

Vicente, Luana Nascimento

Avaliação da eficiência de reator anaeróbico seguido de aeróbico no tratamento de efluente doméstico de uma indústria no Polo Industrial de Manaus / Luana Nascimento Vicente. Manaus : [s.n], 2026.

73 f.: color.; 21.0 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Química- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2026.

Orientador: Érica Simplício de Souza.

1. Tratamento de efluentes domésticos. 2. Reator UASB. 3. Controle Estatístico de Processo. 4. Qualidade da água. 5. Eficiência de tratamento. I. Érica Simplício de Souza (Orient.) II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Título

CDU(1997)54:62

LUANA NASCIMENTO VICENTE

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REATOR ANAERÓBIO SEGUIDO
DE AERÓBIO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DOMÉSTICO DE
UMA INDÚSTRIA NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

**Monografia de Conclusão de Curso para obtenção do título de Engenheira,
Habilitação em Engenharia Química – Escola Superior de Tecnologia,
Universidade do Estado do Amazonas**

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
ERICA SIMPLICIO DE SOUZA
Data: 30/06/2026 20:25:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Érica Simplicio de Souza – Orientadora

Engenheiro José Carlos Lopes de Oliveira – Jabil



Documento assinado digitalmente
CLAIRON LIMA PINHEIRO
Data: 30/06/2026 16:40:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Clairon Lima Pinheiro – UEA

Manaus, 22 de junho de 2026.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua infinita bondade e por ter guiado meus passos ao longo de toda esta trajetória, concedendo-me força, sabedoria e coragem para enfrentar cada desafio. Sem sua graça e amparo, esta conquista não seria possível. À intercessão de Nossa Senhora, por seu cuidado materno, proteção e acolhimento nos momentos de incerteza, fortalecendo minha fé e trazendo serenidade para seguir adiante.

Aos meus pais, Lucas e Francisca, e ao meu irmão, Luan, que sempre foram meu alicerce e porto seguro em todos os momentos. Obrigada por serem meus maiores exemplos de amor, dedicação, coragem e perseverança. Sou profundamente grata por todos os sacrifícios realizados, pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos e pelo incentivo para que eu nunca desistisse dos meus objetivos. Esta conquista também pertence a vocês, pois cada etapa vencida carrega um pouco de tudo o que fizeram por mim. O amor, a confiança e o carinho que sempre recebi foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos amigos que a universidade me presenteou, Alessandra, Ana Vyktoria, Amanda, Andresa, Gustavo e Leonardo, agradeço por compartilharem comigo esta jornada. Pelas conversas, momentos de estudo, desafios superados e, principalmente, pelas risadas e memórias que tornaram essa caminhada mais leve e especial. Que nossa amizade siga além desta etapa.

Às pessoas especiais que fizeram parte dessa trajetória, Ana Vitória, Lorena e Paulo Victor, minha sincera gratidão pelo carinho, apoio e incentivo. A presença de vocês tornou tudo mais significativo.

À minha orientadora, expresso gratidão pela paciência, disponibilidade e pelos conhecimentos compartilhados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade do Estado do Amazonas (UEA), pela formação proporcionada, pelas oportunidades oferecidas e por contribuir significativamente para meu desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional ao longo desses anos.

Aos membros da banca examinadora, agradeço pela disponibilidade, atenção e pelas valiosas contribuições, que enriqueceram este trabalho e agregaram conhecimento a esta importante etapa da minha trajetória.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta caminhada. Cada gesto de apoio e contribuição recebida foi fundamental para a concretização deste sonho. Levo comigo a gratidão e o aprendizado compartilhados por todos que contribuíram para esta conquista.

RESUMO

O tratamento adequado de efluentes domésticos representa um desafio relevante para a preservação dos recursos hídricos, especialmente em áreas industrializadas, onde há geração significativa de águas residuárias. A ausência ou ineficiência desses sistemas pode comprometer a qualidade ambiental e a saúde pública, tornando essencial a adoção de tecnologias capazes de reduzir a carga poluente antes do lançamento em corpos receptores. Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de um sistema de tratamento de efluentes domésticos instalado em uma indústria localizada no Polo Industrial de Manaus, composto por reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) seguido de reator aeróbio. A pesquisa possui natureza aplicada, com abordagem quantitativa, sendo baseada na análise de dados operacionais da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). A coleta de dados foi realizada por meio do monitoramento bimestral de parâmetros físico-químicos e microbiológicos no período de 2023 a 2025, incluindo coliformes fecais, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), óleos e graxas, potencial hidrogeniônico (pH), sólidos sedimentáveis, temperatura, sulfetos e óleos vegetais e gorduras animais. Para avaliação do desempenho do sistema, foram aplicadas ferramentas de Controle Estatístico de Processo (CEP), com construção de gráficos de controle, testes de normalidade e análise da capacidade do processo. Os resultados demonstraram que a maior parte dos parâmetros apresentou conformidade com os limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente, evidenciando a eficiência do sistema de tratamento. Contudo, foram identificadas variações pontuais e presença de causas especiais, principalmente nos parâmetros de coliformes fecais e pH, indicando instabilidade estatística em determinados períodos. A análise da capacidade do processo mostrou que alguns parâmetros apresentaram desempenho satisfatório, enquanto outros evidenciaram limitações relacionadas à variabilidade operacional. Conclui-se que o sistema apresenta bom desempenho geral e atende às exigências legais na maior parte do tempo, porém necessita de aprimoramento no monitoramento e controle operacional. Medidas como aumento da frequência de análises, padronização dos procedimentos e investigação das causas de variabilidade podem contribuir para maior estabilidade e eficiência do processo.

Palavras-chave: tratamento de efluentes domésticos; reator UASB; controle estatístico de processo; qualidade da água; eficiência de tratamento.

ABSTRACT

Adequate treatment of domestic wastewater represents a significant challenge for the preservation of water resources, especially in industrialized areas where there is a substantial generation of wastewater. The absence or inefficiency of treatment systems may compromise environmental quality and public health, making it essential to adopt technologies capable of reducing pollutant loads before discharge into receiving water bodies. In this context, the present study aimed to evaluate the efficiency of a domestic wastewater treatment system installed in an industry located in the Industrial Pole of Manaus, consisting of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor followed by an aerobic reactor. The research is classified as applied, with a quantitative approach, based on the analysis of operational data from the Wastewater Treatment Plant (WWTP). Data collection was carried out through bimonthly monitoring of physicochemical and microbiological parameters from 2023 to 2025, including fecal coliforms, Biochemical Oxygen Demand (BOD), oils and greases, hydrogen potential (pH), settleable solids, temperature, sulfides, and vegetable oils and animal fats. To evaluate system performance, Statistical Process Control (SPC) tools were applied, including the construction of control charts, normality tests, and process capability analysis. The results indicated that most parameters complied with the limits established by current environmental regulations, demonstrating the effectiveness of the treatment system. However, occasional variations and the presence of special causes were identified, particularly for fecal coliforms and pH, indicating statistical instability in certain periods. Process capability analysis showed that some parameters presented satisfactory performance, while others revealed limitations related to operational variability. It is concluded that the system presents overall good performance and meets legal requirements most of the time; however, improvements in monitoring and operational control are still necessary. Measures such as increasing the frequency of analyses, standardizing procedures, and investigating causes of variability may contribute to greater stability and efficiency of the treatment process.

Keywords: domestic wastewater treatment; UASB reactor; statistical process control; water quality; treatment efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de água por setor no Brasil em 2022.....	11
Figura 2 – Percentual de efluentes processados no Brasil em 2022.....	22
Figura 3 – Processamento de efluentes captados no Brasil em 2022.....	22
Figura 4 – Configuração central da ETE em estudo.....	25
Figura 5 – Fluxograma da ETE em estudo.....	26
Figura 6 – Ilustração esquemática do reator UASB em estudo.....	27
Figura 7 – Representação esquemática do funcionamento do reator UASB, destacando a entrada do afluente, a formação da camada de lodo, o separador trifásico e as zonas de digestão e sedimentação.....	28
Figura 8 – Ilustração esquemática do reator aeróbio em estudo.....	29
Figura 9 – Ilustração esquemática do decantador em estudo.....	30
Figura 10 – Representação esquemática da etapa de desinfecção por cloração utilizando hipoclorito de sódio.....	31
Figura 11 – Representação esquemática do filtro de biogás.....	32
Figura 12 – Representação esquemática da limpeza do sistema de tratamento, destacando a remoção e a destinação final do lodo.....	32
Figura 13 – Exemplificação de um gráfico de controle.....	36
Figura 14 – Gráfico de controle $\bar{x}$	38
Figura 15 – Gráfico $\bar{x}$ com um padrão cíclico de comportamento.....	39
Figura 16 – Representação das zonas utilizadas na aplicação dos critérios de detecção de causas especiais conforme a ISO 7870-2:2013.....	40
Figura 17 – Testes causas especiais em gráficos de controle.....	41
Figura 18 – Gráfico de controle: coliformes fecais referentes ao ano de 2023. Os limites de controle estão representados pela cor amarela, o limite de especificação pela cor verde e a linha média pela cor laranja.....	49
Figura 19 – Gráfico de controle: sólidos sedimentáveis referentes ao ano de 2023. Os limites de controle estão representados pela cor amarela, o limite de especificação pela cor verde e a linha média pela cor laranja.....	49

Figura 20 – Gráficos de controle dos parâmetros analisados: (A) Coliformes fecais; (B) DBO; (C) Óleos e graxas; (D) pH; (E) Sólidos sedimentáveis; (F) Temperatura; (G) Sulfeto; (H) Óleos vegetais e gordura animal. Os limites de controle estão representados em amarelo, os limites de especificação em verde e a linha média em laranja.....	51
Figura 21 – Gráficos representando a distribuição acumulada dos parâmetros analisados: (A) Coliformes fecais; (B) DBO; (C) Óleos e graxas; (D) pH; (E) Sólidos sedimentáveis; (F) Temperatura; (G) Sulfeto; (H) Óleos vegetais e gordura animal.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de processos de tratamento de efluentes.....	14
Tabela 2 – Etapas dos processos de tratamento de efluentes.....	15
Tabela 3 – Condições de lançamento de efluentes.....	21
Tabela 3 – Condições de lançamento de efluentes.....	33
Tabela 5 – Parâmetros, frequência e metodologia.....	34
Tabela 6 – Parâmetro de ajuste (E_2).....	38
Tabela 7 – Critérios estabelecidos pela ISO 7870-2:2013 em gráficos de controle.....	39
Tabela 8 – Parâmetro de ajuste (d_2).....	45
Tabela 9 – Classificação do sistema com base no índice de capacidade do processo.....	46
Tabela 10 – Consolidação dos dados das amostras da ETE avaliada, referentes ao período de janeiro a dezembro de 2023.....	47
Tabela 11 – Consolidação dos dados das amostras da ETE avaliada, referentes ao período de janeiro a dezembro de 2024.....	48
Tabela 12 – Consolidação dos dados das amostras da ETE avaliada, referentes ao período de janeiro a dezembro de 2025.....	48
Tabela 13 – Limites utilizados na construção dos gráficos de controle dos parâmetros coliformes fecais e sólidos sedimentáveis.....	49
Tabela 14 – Limites de controle para construção de gráficos de controle dos parâmetros analisados no ano de 2023.....	50
Tabela 15 – Índices de capacidade do processo analisado.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
AM	Amazonas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CEP	Controle Estatístico de Processos
COMDEMA	Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EEE	Estação Elevatória de Esgoto
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FAS	Filtro Aerado Submerso
INPA	Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
IPAAM	Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas
ISO	Organização Internacional para Padronização
LC	Linha Média Central
LIC	Limite Inferior de Controle
LSC	Limite Superior de Controle
Máx.	Máximo
Mín.	Mínimo
NPM	Número Mais Provável
pH	Potencial Hidrogeniônico
SEMMAS	Secretária Municipal de Meio Ambiente e Sustentabilidade
SMWW	Métodos Padrão para o Exame de Água e Esgoto
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UASB	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcentagem
$>$	Maior que
$<$	Menor que
$\leq$	Menor ou igual a
O_3	Ozônio
H_2O_2	Peróxido de hidrogênio
H^+	Íon hidrônio
OH^-	Íon hidróxido
H_2S	Sulfeto de hidrogênio
$\bar{x}$	Valor médio do parâmetro
x_i	Valor específico do parâmetro no ponto i
n	Tamanho total da amostra
Rm_i	Amplitude móvel calculada para o ponto atual
x_{i+1}	Valor do parâmetro no ponto subsequente (i+1)
$\overline{Rm}$	Média calculada das amplitudes móveis
n	Tamanho total da amostra
LC_x	Linha central no gráfico de x
LSC_x	Limite superior de controle no gráfico de x
E_2	Parâmetro de ajuste específico para o gráfico de x
LIC_x	Limite inferior de controle no gráfico de x
σ	Desvio-padrão
α	Nível de significância
H_0	Hipótese nula
W	Teste de Shapiro-Wilk
a_1	Coefficiente tabelado
Cp	Capacidade do processo
Cpk	Capacidade do processo unilateral
Cps	Capacidade do processo superior
Cpi	Capacidade do processo inferior
d_2	Parâmetro de ajuste
LSE	Limite superior de especificação
LIE	Limite inferior de especificação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	09
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	11
2.1 ÁGUA.....	11
2.2 EFLUENTES.....	12
2.2.1 Efluentes Industriais.....	12
2.2.2 Efluentes Domésticos.....	13
2.3 TIPOS DE PROCESSOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	14
2.3.1 Processos Físicos.....	14
2.3.2 Processos Químicos.....	14
2.3.3 Processos Biológicos.....	15
2.4 ETAPAS DOS PROCESSOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	15
2.4.1 Tratamento Preliminar.....	16
2.4.2 Tratamento Primário.....	16
2.4.3 Tratamento Secundário.....	16
2.4.4 Tratamento Terciário.....	17
2.4.5 Importância das Etapas de Tratamento.....	17
2.5 PARÂMETROS PARA O CONTROLE DE QUALIDADE DE EFLUENTES.....	17
2.5.1 Coliformes Fecais.....	18
2.5.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	18
2.5.3 Óleos e Graxas (Totais, Vegetais e Animais).....	18
2.5.4 pH.....	19
2.5.5 Sólidos Sedimentáveis.....	19
2.5.6 Temperatura.....	19
2.5.7 Sulfetos.....	19
2.6 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL.....	20
2.7 TRATAMENTO DE EFLUENTES NO BRASIL.....	21
2.8 TRATAMENTO DE EFLUENTES EM MANAUS.....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE TRATADO.....	25
3.2 FLUXO OPERACIONAL DA ETE.....	26
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE.....	26

3.3.1 Gradeamento.....	26
3.3.2 Reator UASB.....	27
3.3.3 Reator Aeróbio.....	29
3.3.4 Decantação.....	30
3.3.5 Desinfecção.....	31
3.3.6 Filtro de Biogás.....	31
3.3.7 Limpeza do Sistema.....	32
3.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO.....	33
3.5 AQUISIÇÃO DE DADOS E PONTOS MONITORADOS.....	33
3.6 ANÁLISES DE MONITORAMENTO.....	33
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	34
3.7.1 Gráficos de Controle.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS.....	47
4.2 GRÁFICOS DE CONTROLE.....	48
4.3 TESTES DE NORMALIDADE.....	55
4.4 CAPACIDADE DO PROCESSO.....	56
5 CONCLUSÕES.....	59
6 PERSPECTIVAS.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida, indispensável para todos os processos biológicos. Embora esteja presente em grande quantidade na Terra, o uso descontrolado e a ação poluidora do ser humano têm levado ao seu esgotamento, tornando urgente a necessidade de preservação (Vasconcelos, 2020).

Com o aumento populacional e a ampliação do uso da água, houve um crescimento expressivo em seu consumo e, por consequência, na produção de esgoto, que tem contribuído para a degradação ambiental, principalmente dos recursos hídricos. Isso despertou a consciência para os impactos ambientais, incentivando uma reflexão sobre o uso responsável da água e o descarte inadequado de resíduos, sejam sólidos, líquidos ou gasosos. Em resposta, muitos países, como o Brasil, estabeleceram normas e regulamentos para proteger esse recurso vital (Vasconcelos, 2020).

No setor industrial, a água é amplamente utilizada em diversos processos, e grande parte desse volume retorna à natureza com dejetos e impróprio para uso. Quando despejada nos rios sem tratamento, essa água carregada de contaminantes intensifica a poluição. Assim, o tratamento adequado dos efluentes líquidos, como o esgoto, antes de serem lançados em corpos d'água, torna-se fundamental para mitigar os danos ambientais (Freire, 2000).

Nesse contexto, as águas residuais continuam sendo um dos maiores desafios para a preservação dos recursos hídricos no Brasil. Em muitas regiões do país, o esgoto é despejado diretamente nos rios e outros corpos d'água, resultando em poluição e, em alguns casos, contaminação, devido à presença de substâncias tóxicas e organismos patogênicos (Moraes, 2005).

O desenvolvimento e a aplicação de tecnologias capazes de assegurar a qualidade dos efluentes, seja para fins de reuso ou para o lançamento em corpos hídricos em conformidade com a legislação vigente, têm papel fundamental na preservação dos recursos hídricos (Freire, 2000). Entre as tecnologias mais empregadas destaca-se o tratamento biológico, que utiliza microrganismos para degradar a matéria orgânica presente nos efluentes, considerada uma das principais responsáveis pela poluição dos corpos d'água. Esse tratamento pode ocorrer por meio de processos aeróbios e anaeróbios, dependendo das características do sistema e dos objetivos do tratamento (Von Sperling, 1996; Sant'anna Junior, 2013).

Nesse contexto, o monitoramento dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos dos efluentes tratados é essencial para verificar a eficiência dos sistemas de tratamento e garantir o atendimento aos padrões estabelecidos pela legislação ambiental. A partir da coleta e análise

periódica de amostras, é possível avaliar o desempenho do processo e identificar oportunidades de melhoria, contribuindo para a proteção dos recursos hídricos (Morais, 2005).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a eficiência de um sistema de tratamento de efluentes domésticos instalado em uma indústria do Polo Industrial de Manaus, composto por reatores anaeróbio e aeróbio, verificando sua capacidade de remover contaminantes e atender aos padrões ambientais vigentes. Para alcançar esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Avaliar a eficiência da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) por meio da análise dos parâmetros coliformes fecais, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), óleos e graxas, potencial hidrogeniônico (pH), sólidos sedimentáveis, temperatura, sulfetos e óleos vegetais e gorduras animais, monitorados no período de 2023 a 2025;
- ii. Comparar os resultados obtidos com os limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente, verificando a conformidade do efluente tratado;
- iii. Aplicar a ferramenta Controle Estatístico de Processo (CEP), por meio da construção de gráficos de controle, para avaliar a estabilidade estatística do processo e identificar possíveis causas especiais de variação;
- iv. Verificar a aderência dos dados à distribuição normal e determinar a capacidade do processo utilizando os índices de capacidade C_p , C_{pi} , C_{ps} e C_{pk} .

2 REVISÃO DE LITERATURA

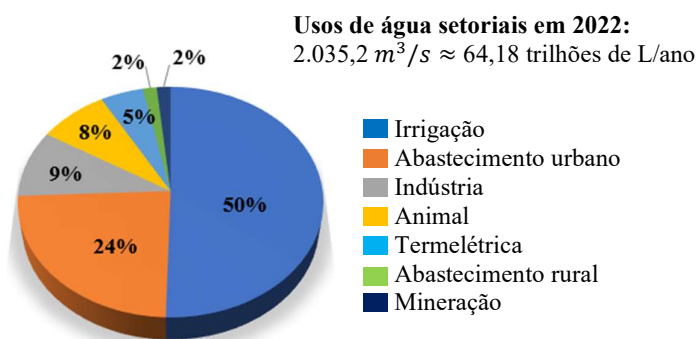
2.1 ÁGUA

A água é um recurso natural fundamental, permeando todas as matérias do ambiente, seja em contextos naturais ou influenciados pela ação humana (Telles; Costa, 2007). Com 71% da superfície terrestre coberta por água e cerca de 60% do corpo humano é composto por este líquido essencial, destaca-se a sua relevância para a manutenção da vida (Scabin; Aguirre, 2023). Para cada aplicação, a água deve atender a padrões específicos de qualidade física, química e biológica, dependendo de seu uso pretendido, para assegurar a segurança dos usuários, a qualidade do produto final e a compatibilidade com os materiais com os quais interage (Mierzwa; Hespanhol, 2005).

Nos ecossistemas, durante a evolução, os organismos vivos passaram a depender integralmente da água. Ela é essencial para as plantas realizarem a fotossíntese, garantindo a produção de oxigênio e sustentando a cadeia alimentar (Vilar, 2021). No contexto humano, devido às diversas atividades humanas, especialmente a produção de bens de consumo por meio da transformação e processamento de recursos naturais, a agricultura, a geração de energia, a indústria e saneamento básico, consomem grandes quantidades de água (Mierzwa; Hespanhol, 2005).

No Brasil, os principais usos consuntivos da água são: irrigação, abastecimento humano, dessedentação animal, indústrias, termelétricas e mineração, conforme demonstrado na Figura 1. Estudos específicos e registros de usuários têm ampliado o conhecimento sobre esses usos, documentados no Relatório Conjuntura. A Base Nacional de Referência de Usos Consuntivos da Água atualizou em 2022, incluindo dados até 2021 e projeções até 2040, conforme divulgado no 1º Boletim Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) (ANA, 2024).

Figura 1 – Consumo de água por setor no Brasil em 2022.



Fonte: ANA (2024).

O uso consuntivo da água considera três aspectos: a retirada total captada, o consumo (parcela que não retorna aos corpos hídricos) e o retorno (volume que volta aos corpos d'água). Em síntese, o consumo equivale à diferença entre a água retirada e a retornada (ANA, 2024).

O tratamento de efluentes domésticos é crucial para atender aos padrões ambientais e garantir o lançamento seguro na natureza. Além disso, o acesso à água potável, livre de contaminantes, é fundamental para prevenir doenças e garantir o bem-estar das populações. A qualidade, quantidade e regularidade do fornecimento de água são fatores críticos na prevenção de enfermidades. No entanto, a escassez ou contaminação da água pode levar a surtos de doenças, insegurança alimentar e crises econômicas, especialmente em regiões mais vulneráveis (Brasil, 2006; Pereira, 2019).

Nesse contexto, a análise das características físico-químicas das águas residuais domésticas é essencial para avaliar sua qualidade após o tratamento e antes do descarte aos corpos receptores, garantindo a segurança ambiental e a saúde pública (Pereira, 2019).

Portanto, a gestão sustentável dos recursos hídricos é um desafio global de grande importância. A disponibilidade de água em diversas regiões enfrenta uma crise sem precedentes, pois a crescente demanda por recursos hídricos, aliado às mudanças climáticas e à poluição, compromete o equilíbrio do ciclo hidrológico mundial (Fusati, 2023). A preservação dos recursos hídricos não é apenas responsabilidade de governos e indústrias, o consumo consciente doméstico também é fundamental para proteger a água e garantir sua disponibilidade para as futuras gerações (Eos Systems, 2024).

2.2 EFLUENTES

Os efluentes são resíduos líquidos ou gasosos resultantes das atividades humanas, incluindo processos industriais e esgotos domésticos, que podem ser descartados no meio ambiente após sua utilização. Essas águas residuais apresentam características variadas conforme sua origem e composição, sendo classificadas principalmente em efluentes industriais e domésticos (Von Sperling, 1996).

2.2.1 Efluentes Industriais

Os efluentes industriais são gerados durante os processos produtivos e apresentam composição variável conforme o tipo de indústria, matéria-prima utilizada e tecnologia empregada (Jordão; Pessoa, 1995). Em geral, podem conter elevada carga orgânica, nutrientes,

metais pesados, óleos, gorduras e compostos tóxicos, capazes de causar impactos significativos ao meio ambiente (CETESB, 2018; Ilha Ambiental, 2022).

Entre as principais características desses efluentes destacam-se a elevada concentração de matéria orgânica, que reduz o oxigênio dissolvido nos corpos hídricos; a presença de metais pesados, como mercúrio, chumbo e cádmio; a variação do pH; o excesso de nutrientes, como nitrogênio e fósforo; e a ocorrência de substâncias tóxicas de difícil degradação (Von Sperling, 1996; Rosal, 2024).

Quando descartados sem tratamento adequado, os efluentes industriais podem provocar contaminação de águas superficiais e subterrâneas, eutrofização, alteração do pH, bioacumulação de metais pesados e riscos à saúde humana. Esses impactos comprometem os ecossistemas aquáticos, reduzem a biodiversidade e favorecem a ocorrência de doenças associadas à contaminação hídrica (Silva, 2024).

Para minimizar esses efeitos, são empregadas tecnologias de tratamento físico, químico e biológico, incluindo processos de membranas, oxidação avançada, remoção de nutrientes e desinfecção. Além de atender às exigências legais, essas técnicas possibilitam o reúso da água e contribuem para a sustentabilidade industrial (Dinâmica Ambiental, 2024).

2.2.2 Efluentes Domésticos

Os efluentes domésticos, também denominados esgoto doméstico, são provenientes das atividades diárias realizadas em residências, estabelecimentos comerciais e instalações sanitárias. Sua composição inclui águas de banho, lavagem, restos de alimentos, excretas humanas, detergentes, sabões e outros produtos de uso cotidiano (Jordão; Pessoa, 1995).

Esses efluentes apresentam elevada concentração de matéria orgânica, nutrientes como nitrogênio e fósforo, microrganismos patogênicos e produtos químicos domésticos. Quando lançados sem tratamento nos corpos hídricos, podem provocar poluição da água, eutrofização, contaminação do solo, proliferação de doenças e desequilíbrio dos ecossistemas aquáticos (Tchobanoglous *et al.*, 2015; Tera Ambiental, 2021).

O tratamento dos efluentes domésticos ocorre, geralmente, em etapas preliminar, primária, secundária e terciária, visando a remoção de sólidos, matéria orgânica, nutrientes e microrganismos patogênicos. A adoção desses sistemas é fundamental para a preservação dos recursos hídricos, proteção da saúde pública e manutenção da qualidade ambiental (Vasconcelos, 2020).

2.3 TIPOS DE PROCESSOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Os sistemas de tratamento de efluentes, tanto domésticos quanto industriais, são constituídos por diferentes processos destinados à remoção ou transformação de contaminantes presentes na água, de modo a atender aos padrões ambientais estabelecidos pela legislação. Esses processos são tradicionalmente classificados em três categorias: físicos, químicos e biológicos, conforme ilustrado na Tabela 1. Cada categoria desempenha papel específico nas etapas do tratamento, sendo a sua combinação fundamental para assegurar a eficiência do sistema e a qualidade do efluente final (Pereira, 2019).

Tabela 1 – Tipos de processos de tratamento de efluentes.

Físicos	Químicos	Biológicos
Gradeamento	Precipitação química do fósforo	Lodos ativados
Caixas de areia	Processos de oxidação química	Filtros biológicos
Peneiramento	Ozonização	Reatores anaeróbios
Decantador primário	Radiação ultravioleta	Reatores aeróbios
Flotação	Cloração	Lagoas de estabilização
Filtros de areia e carvão ativado	Precipitação química	Desnitrificação
Microfiltração e ultrafiltração	Troca iônica	-

Fonte: Elaboração própria (2024).

2.3.1 Processos Físicos

Os processos físicos utilizam a separação de fases distintas, sendo especialmente eficazes para remover substâncias em suspensão ou com densidade diferente do esgoto, como a areia e gorduras. Esses métodos incluem a remoção de sólidos grosseiros, sedimentáveis e flutuantes, além da desidratação do lodo. Esses processos são fundamentais na preparação do efluente para os tratamentos subsequentes, garantindo a eficiência do sistema (Oliveira, 2012).

2.3.2 Processos Químicos

Os processos químicos envolvem a adição de substâncias químicas para tratar o efluente, sendo utilizados quando os processos físicos e biológicos não alcançam os resultados desejados ou precisam de aprimoramento. Esses processos são aplicados para otimizar a remoção de contaminantes ou ajustar características do efluente. Entre os principais métodos químicos adotados estão a precipitação química, oxidação avançada, cloração e desinfecção. Esses

métodos complementam os outros tratamentos, garantindo que o efluente final atenda aos padrões exigidos pela legislação ambiental (Fugita, 2018).

2.3.3 Processos Biológicos

Os processos biológicos utilizam microrganismos presentes no esgoto para decompor a matéria orgânica, reproduzindo, em condições controladas, os fenômenos naturais, em prazos economicamente viáveis. Durante o tratamento, os microrganismos transformam compostos complexos em substâncias mais simples, como os sais minerais e gás carbônico. Esses processos são divididos de duas formas de tratamento biológico, aeróbios e anaeróbios (CETESB, 2018).

2.4 ETAPAS DOS PROCESSOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Um sistema típico de tratamento de efluentes é projetado para encaminhar toda a água residual doméstica para ETE. Esses processos podem incluir até quatro etapas principais preliminar, primário, secundário e terciário, cada uma com funções específicas na remoção de poluentes e na melhoria da qualidade da água, conforme ilustrado na Tabela 2 (Tonetti *et al.*, 2018).

Tabela 2 – Etapas dos processos de tratamento de efluentes.

Etapas dos Processos de Tratamento de Efluentes	Preliminar	Gradeamento	
		Caixas de areia	
		Peneiramento	
	Primário	Decantador primário	
		Flotação	
	Secundário	Lodos ativados	
		Filtros biológicos	
		Reatores anaeróbios	
		Reatores aeróbios	
		Lagoas de estabilização	
	Terciário	Remoção de nutrientes	Desnitrificação Precipitação química do fósforo
		Filtração avançada	Filtros de areia e carvão ativado Microfiltração e ultrafiltração
		Oxidação avançada	Processos de oxidação química Ozonização
		Desinfecção	Precipitação química Cloração
		Remoção de materiais pesados	Radiação ultravioleta Troca iônica

Fonte: Elaboração própria (2024).

2.4.1 Tratamento Preliminar

O tratamento preliminar corresponde à primeira etapa do sistema de tratamento e tem como objetivo remover materiais grosseiros, areia, óleos e graxas que possam comprometer o funcionamento das unidades posteriores. Nessa fase são empregados processos físicos como gradeamento, desarenação e peneiramento (CETESB, 2018; Pereira, 2019).

O gradeamento é utilizado para reter sólidos de maiores dimensões, protegendo equipamentos como bombas e tubulações contra obstruções. Em seguida, os desarenadores ou caixas de areia promovem a sedimentação de partículas minerais mais pesadas, como areia e cascalho. Complementarmente, o peneiramento remove sólidos finos e materiais fibrosos que não foram retidos nas etapas anteriores (CETESB, 2018; Coelho, 2020).

2.4.2 Tratamento Primário

O tratamento primário tem como principal finalidade remover sólidos sedimentáveis, materiais flutuantes e parte da carga orgânica presente no efluente. Essa etapa ocorre principalmente por processos físicos e físico-químicos, reduzindo significativamente a concentração de sólidos suspensos e preparando o efluente para os tratamentos biológicos subsequentes (Coelho, 2020; Marques, 2024).

Os processos mais utilizados incluem a decantação primária e a flotação. Nos decantadores, os sólidos mais densos sedimentam, formando o lodo primário, enquanto materiais menos densos, como óleos e graxas, permanecem na superfície e são removidos. Já a flotação utiliza microbolhas de ar para promover a separação de sólidos e substâncias oleosas. Em conjunto, essas operações podem remover grande parte dos sólidos suspensos e reduzir significativamente a carga orgânica do esgoto (CETESB, 2018; Marcondes, 2012).

2.4.3 Tratamento Secundário

O tratamento secundário é responsável pela remoção da matéria orgânica biodegradável remanescente após o tratamento primário. Esse processo ocorre por meio da ação de microrganismos que utilizam a matéria orgânica presente no efluente como fonte de energia, convertendo-a em substâncias mais simples, como água, dióxido de carbono e biomassa celular (Martins, 2021; Reviva Ambiental, 2024; Tega Engenharia, 2024).

Os principais sistemas empregados são os lodos ativados, filtros biológicos, reatores anaeróbios, reatores aeróbios e lagoas de estabilização. Os processos aeróbios utilizam oxigênio para favorecer a degradação biológica, enquanto os anaeróbios ocorrem na ausência de

oxigênio, produzindo biogás como subproduto. Quando operado adequadamente, o tratamento secundário pode remover até 95% da matéria orgânica e dos sólidos suspensos presentes no efluente (Vasconcelos, 2020; Eos Consultores, 2024).

2.4.4 Tratamento Terciário

O tratamento terciário é aplicado quando se deseja obter um efluente com elevada qualidade ou destinado ao reúso. Essa etapa complementa os tratamentos anteriores por meio da remoção de nutrientes, microrganismos patogênicos, metais pesados e compostos de difícil degradação. (Schoor, 2022).

Entre os principais processos utilizados destacam-se a remoção de nitrogênio por desnitrificação, a precipitação química do fósforo, a filtração por areia e carvão ativado, os sistemas de microfiltração e ultrafiltração por membranas, os processos oxidativos avançados, a ozonização, a radiação ultravioleta, a cloração e técnicas de remoção de metais pesados, como precipitação química e troca iônica. Essas tecnologias permitem atender padrões ambientais mais rigorosos e viabilizam o reúso seguro da água tratada em aplicações industriais e urbanas (Tosetto, 2005; Vasconcelos, 2020; Saluta Saneamento, 2024).

2.4.5 Importância das Etapas de Tratamento

A combinação das etapas preliminar, primária, secundária e terciária garante a remoção progressiva dos contaminantes presentes nos efluentes, reduzindo os impactos ambientais associados ao seu descarte. Além de proteger os corpos hídricos e a saúde pública, o tratamento adequado contribui para o uso sustentável dos recursos hídricos, possibilitando o reaproveitamento da água e o atendimento à legislação ambiental vigente (Saluta Saneamento, 2024).

2.5 PARÂMETROS PARA O CONTROLE DE QUALIDADE NOS EFLUENTES

O termo parâmetro refere-se aos indicadores utilizados para caracterizar propriedades físicas, químicas e biológicas de determinada amostra. Já o padrão corresponde ao valor de referência estabelecido por normas e legislações, definindo os limites máximos ou mínimos permitidos para determinado parâmetro em um intervalo de tempo específico (Jordão; Pessoa, 2011).

No tratamento de efluentes, a avaliação desses parâmetros é essencial para o monitoramento da qualidade das águas residuárias e para a verificação da eficiência dos

processos de tratamento. Além disso, o acompanhamento desses indicadores possibilita o atendimento aos padrões estabelecidos pela legislação ambiental vigente, contribuindo para a proteção dos recursos hídricos e para o adequado funcionamento das estações de tratamento de efluentes (Jordão; Pessoa, 2011).

2.5.1 Coliformes Fecais

Os coliformes fecais constituem um grupo de bactérias gram-negativas presentes predominantemente no trato intestinal de seres humanos e animais de sangue quente. Esses microrganismos são amplamente utilizados como indicadores de contaminação fecal, uma vez que sua presença na água ou em efluentes sugere a possível ocorrência de organismos patogênicos capazes de causar doenças de veiculação hídrica (Conte *et al.*, 2004).

Devido à sua associação com matéria fecal, os coliformes fecais são considerados importantes parâmetros microbiológicos para avaliação da qualidade sanitária da água e da eficiência dos sistemas de tratamento de efluentes. Concentrações elevadas desses microrganismos podem indicar falhas nos processos de tratamento e representar riscos à saúde pública, estando associadas à transmissão de doenças gastrointestinais e outras infecções de origem hídrica. Dessa forma, o monitoramento dos coliformes fecais é fundamental para garantir a conformidade com os padrões ambientais e sanitários estabelecidos pela legislação vigente (Conte *et al.*, 2004).

2.5.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅)

A DBO representa a quantidade de oxigênio dissolvido necessária para que a matéria orgânica em um corpo d'água seja degradada por atividade bacteriana. Esse índice varia com o tempo, pois, quanto maior o período, mais matéria orgânica biodegradável é oxidada pelas bactérias aeróbicas. O tempo padrão para medições de DBO em água ou efluentes é de cinco dias. Corpos d'água com maior poluição orgânica apresentam valores mais elevados de DBO (Penha *et al.*, 2010).

2.5.3 Óleos e Graxas (Totais, Vegetais e Animais)

Os óleos e graxas são substâncias orgânicas, incluindo hidrocarbonetos e ésteres, de origem mineral, vegetal ou animal. Sua ocorrência em ambientes aquáticos naturais é incomum, sendo frequentemente associada a descargas de efluentes domésticos. Do ponto de vista analítico, estes compostos são definidos como substâncias extraíveis por solventes específicos, que permanecem após evaporação a 100°C. Entre os materiais solúveis em n-hexano

encontram-se diversos tipos de lipídios, incluindo gorduras, ceras e óleos de várias origens. Quando presentes em corpos d'água, estes materiais formam uma película superficial que compromete a oxigenação do meio aquático, além de causar impacto visual negativo (Marcondes, 2012).

2.5.4 pH

O pH é um parâmetro crucial no gerenciamento operacional das estações de tratamento, especialmente na digestão anaeróbia e em processos oxidativos, como a nitrificação no sistema de lodos ativados, cuja velocidade é influenciada pelo pH. Para a sobrevivência da vida aquática em corpos d'água, geralmente é necessário que o pH esteja entre 6 e 9. A acidez está associada à presença de dióxido de carbono livre, enquanto a alcalinidade está ligada à presença de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos (Jordão; Pessoa, 2011).

2.5.5 Sólidos Sedimentáveis

Os sólidos sedimentáveis constituem a fração mais densa dos materiais em suspensão, representando parte significativa dos lodos gerados na ETE. Esses sólidos que, quando lançados sem tratamento adequado, podem alterar o fluxo natural dos corpos d'água receptores, causando impactos como assoreamento. A determinação destes sólidos é, portanto, fundamental para avaliar a qualidade do efluente tratado, sendo este parâmetro exigido pela legislação ambiental no monitoramento de sistemas de tratamento (Promatec Ambiental, 2024).

2.5.6 Temperatura

O aumento da temperatura intensifica as reações químicas e biológicas, influenciando o metabolismo dos microrganismos e alterando as taxas de oxidação da matéria orgânica. Além disso, a temperatura funciona como um fator que seleciona a biomassa, podendo modificar sua composição. O intervalo considerado ideal para o desenvolvimento e sobrevivência dos microrganismos está entre 20°C e 30°C, com limites extremos de 4°C e 40°C. A temperatura também afeta o oxigênio dissolvido na água, reduzindo sua concentração à medida que aumenta (Von Sperling, 1997).

2.5.7 Sulfetos

O sulfeto de hidrogênio (H_2S) produz odores desagradáveis quando sua concentração excede 1 mg/L. Em sistemas de esgotamento, este composto pode se acumular na parte superior das tubulações onde, através de processos bacterianos na presença de oxigênio, converte-se em ácido sulfúrico. Este ácido possui alto potencial corrosivo, degradando significativamente as

estruturas de concreto (Jordão; Pessoa, 2011). A presença de sulfetos representa uma ameaça significativa aos ecossistemas aquáticos devido à sua toxicidade, tornando-os não apenas um problema de odor, mas também um risco potencial à biota aquática (Alves, 2006).

2.6 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

O tratamento de esgoto tem como propósito principal separar a fase líquida da fase sólida, permitindo que ambas sejam tratadas de maneira apropriada e individualizada. O objetivo é minimizar ao máximo a carga poluidora presente nos resíduos (Pereira, 2019).

No dia 8 de janeiro de 1997, foi promulgada no Brasil a Lei Nº 9.433, que estabelece como princípios que a água é um bem de domínio público, um recurso natural limitado com valor econômico. Em situações de escassez, o consumo humano e a dessedentação de animais devem ser considerados usos prioritários. O objetivo principal da lei é garantir a disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas para atender às necessidades das gerações presentes e futuras, além de reconhecer a água como um bem econômico, fornecendo ao usuário uma noção do seu valor real (Brasil, 1997).

No estado do Amazonas, o Decreto nº 28.678, de 16 de junho de 2009, regula o manejo de efluentes, determinando que seu lançamento em corpos hídricos somente seja permitido caso atendam aos padrões legais de emissão. O decreto também proíbe a prática de diluir efluentes líquidos utilizando águas não contaminadas (Amazonas, 2009).

Em Manaus, a Resolução Conselho Municipal de Desenvolvimento e Meio Ambiente (COMDEMA) nº 10, de 16 de agosto de 2010, regulamenta o tratamento de efluentes e resíduos para a cidade, incluindo diversas diretrizes específicas. Entre elas, exige a sinalização adequada dos veículos destinados à coleta de efluentes e resíduos, cujos relatórios devem ser submetidos à análise pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMMAS). Também estabelece a realização de uma vistoria anual desses veículos, realizada pela própria SEMMAS, como parte do processo de licenciamento necessário para a execução de atividades de limpeza e manutenção de sistemas de tratamento de esgotos (Brasil, 2010).

De acordo com a Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) Nº 430/2011, foram detalhadas informações sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para a gestão do lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora em corpos d'água receptores, complementando e alterando parcialmente a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005 (Brasil, 2011). Na Tabela 3, demonstra-se quais os valores máximos permitidos das condições e padrões para lançamento em corpos receptores.

Tabela 3 – Condições de lançamento de efluentes.

Parâmetros	Condições Resolução CONAMA N° 430/2011
Coliformes fecais	≤ 1000 NMP 100/mL
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Remoção Mín. de 60%
Óleos e graxas	Máx. 100,0 mg/L
pH	Entre 5,0 a 9,0
Sólidos sedimentáveis	Máx. 1,0 mL/L
Temperatura	Inferior a 40 °C
Sulfetos	Máx. 1,0 mg/L
Óleos vegetais e gorduras animais	Máx. 50,0 mg/L

Fonte: Brasil (2011).

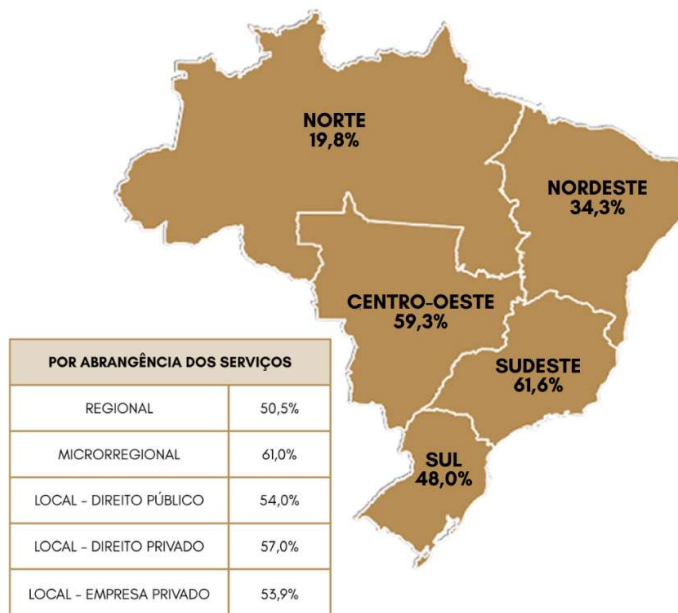
O lançamento indireto de efluentes nos corpos receptores deve atender ao estabelecido nesta Resolução, especialmente nos casos em que não existam legislações ou normas específicas, respeitando também as orientações do órgão ambiental competente e as diretrizes da operadora dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto sanitário (Pereira, 2019).

A crescente preocupação com o meio ambiente tem ganhado destaque em escala global, tornando essencial a busca por novas alternativas que reduzam tanto o volume quanto a toxicidade dos efluentes descartados em corpos hídricos (Zamora *et al.*, 1997).

2.7 TRATAMENTO DE EFLUENTES NO BRASIL

O tratamento de efluentes no Brasil apresenta grandes disparidades entre as diferentes regiões, resultado de variações socioeconômicas, geográficas e na infraestrutura de saneamento. Cada região do país enfrenta desafios únicos e possui diferentes níveis de cobertura no acesso ao tratamento de esgotos (Assembleia Legislativa do Piauí, 2024). Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), dados de 2022 revelam que somente 52,2% do total de efluentes gerados recebem tratamento, com índices regionais oscilando entre 19,8% no Norte e 61,6% no Sudeste, conforme ilustrado na Figura 2 (Brasil, 2023).

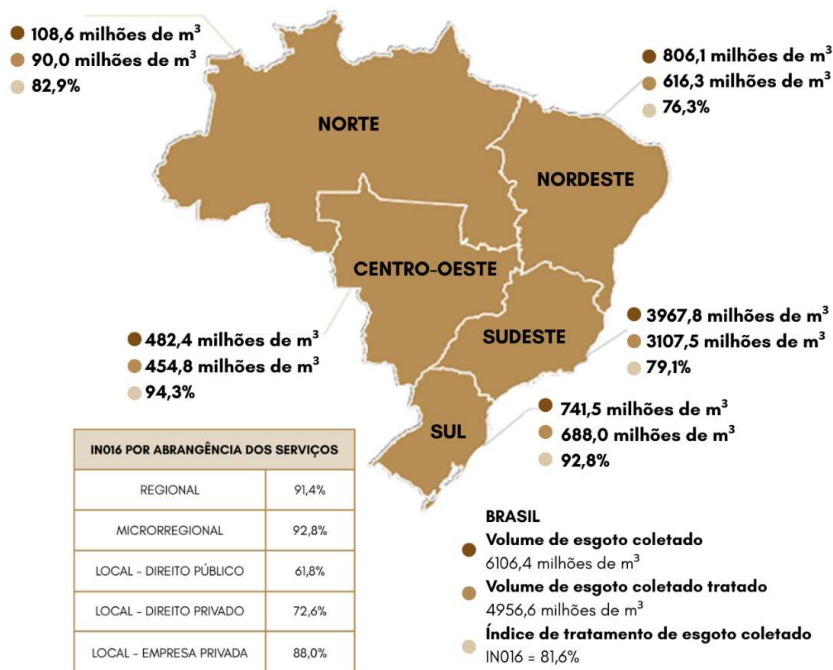
Figura 2 – Percentual de efluentes processados no Brasil em 2022.



Fonte: Brasil (2023).

No que se refere ao esgoto coletado, 81,6% é submetido a tratamento, com variações entre as regiões, indo de 76,3% no Nordeste a 94,3% no Centro-Oeste, conforme ilustrado na Figura 3 (Brasil, 2023).

Figura 3 – Processamento de efluentes captados no Brasil em 2022.



Fonte: Brasil (2023).

2.8 TRATAMENTO DE EFLUENTES EM MANAUS

A cidade de Manaus enfrenta grandes dificuldades no campo do saneamento básico, com destaque para o déficit no tratamento de efluentes. Atualmente, mais de 1,5 milhão de moradores não contam com acesso à coleta de esgoto, e apenas 21,8% do total produzido na cidade recebe tratamento adequado. Conforme o Ranking do Saneamento 2024, divulgado pelo Instituto Trata Brasil, Manaus está na 86ª posição entre as 100 maiores cidades do país, integrando a lista dos 20 municípios com os piores indicadores (Instituto Trata Brasil, 2024).

Nesse cenário, o tratamento de efluentes em Manaus está entre os mais deficientes do Brasil, resultando na degradação da qualidade dos corpos d'água que recebem esses resíduos sem tratamento. Além disso, os efluentes provenientes de indústrias, frequentemente contendo metais pesados provenientes do Polo Industrial de Manaus, agravam ainda mais as condições sanitárias da cidade (Souza Filho, 2022).

Um estudo conduzido por Márcio Luiz da Silva, doutor em Geociências e Meio Ambiente e pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), analisou a qualidade da água consumida nas áreas da calha do rio Negro, incluindo Manaus. A pesquisa revelou que a falta de saneamento básico compromete significativamente a qualidade da água, gerando impactos diretos na saúde da população. O pesquisador constatou que uma parcela significativa da água distribuída nas localidades da calha do rio Negro é inadequada para consumo humano, com várias amostras apresentando altos níveis de contaminantes, como coliformes fecais, indicando poluição por esgotos domésticos (Varela; Karla, 2013).

Pesquisas conduzidas por (Lima *et al.*, 2017) identificaram a possível presença de uma variedade de fungos patogênicos na água destinada ao consumo humano na comunidade ribeirinha Lago do Limão, localizada no município de Iranduba – AM, na região metropolitana de Manaus.

No ano de 2018, foram entregues três estações de coleta e tratamento de esgoto em Manaus. Duas delas resultaram de processos de reforma e modernização (ETE Vila Nova e ETE Aypua-Xingu), enquanto a terceira, a Estação de Tratamento de Esgoto do Timbiras (ETE/Timbiras), foi construída como uma nova unidade para atender à zona norte da cidade, abrangendo os bairros Cidade Nova 1, 2 e áreas próximas (Souza Filho, 2022).

Para reverter o atual cenário crítico do esgotamento sanitário em Manaus, é urgente que o poder público priorize melhorias na coleta e ampliação da interligação à rede de esgoto. A longo prazo, é imprescindível realizar investimentos consistentes tanto na infraestrutura de

coleta e tratamento de esgoto quanto na conexão das áreas urbanas à rede existente. Sem essas ações, a situação tende a permanecer inalterada (Souza Filho, 2022).

A falta de tratamento de águas residuais afeta de forma direta a saúde e o bem-estar da população. Situada próxima à maior floresta tropical do planeta, a garantia de acesso amplo ao saneamento básico em Manaus é essencial para preservar e proteger o meio ambiente (Instituto Trata Brasil, 2024).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE TRATADO

O efluente doméstico objeto deste estudo é produzido por uma unidade industrial situada no Distrito Industrial de Manaus, Amazonas, e gerado pela Estação de Tratamento de Efluentes situada na mesma. Esse efluente é originado das áreas de uso comum da empresa, como o refeitório, instalações sanitárias e áreas administrativas.

O objetivo principal do tratamento do efluente doméstico é qualificar as águas que chegam à ETE, garantindo a conformidade com os padrões ambientais estabelecidos pela legislação vigente.

A ETE possui uma infraestrutura projetada para tratar as águas domésticas, garantindo a redução da poluição para níveis aceitáveis, antes de seu lançamento no meio ambiente receptor. Esse processo é realizado por meio de um sistema de emissário, em conformidade com a legislação ambiental vigente, incluindo a Resolução CONAMA N° 357/2005, da Lei n° 9.433 de 8 de janeiro de 1997, Decreto n° 24.643 de 1934 e Resolução CONAMA N° 430/2011. Essas normas são estabelecidas pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária (ABES), visando proteger o meio ambiente e garantir a qualidade das águas. Na Figura 4, é possível observar a seção central da ETE da empresa estudada.

Figura 4 – Configuração central da ETE em estudo.



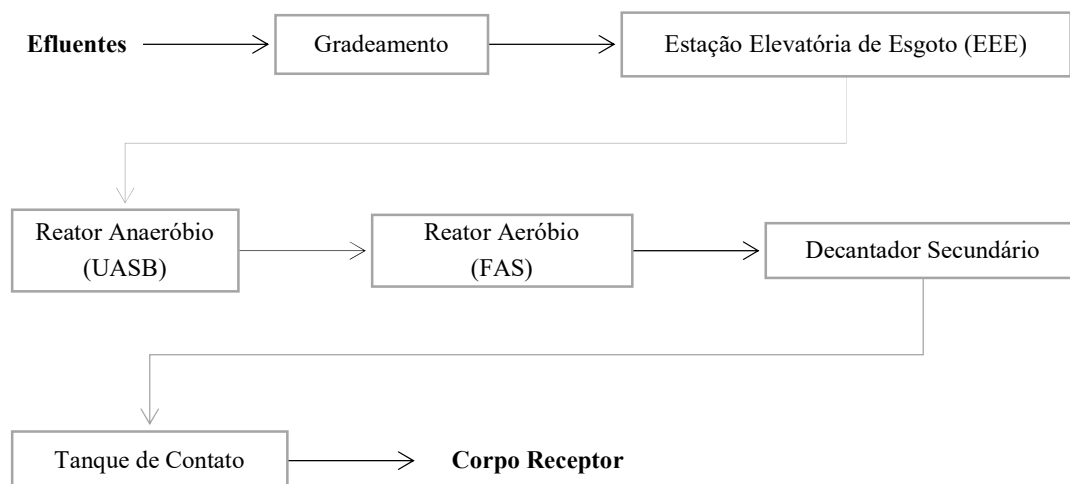
Fonte: Elaboração própria (2024).

3.2 FLUXO OPERACIONAL DA ETE

O fluxograma da ETE (Figura 5) apresenta o processo de tratamento em etapas sequenciais. Inicialmente, o efluente é direcionado ao tratamento preliminar de gradeamento fino, seguido por uma combinação de tecnologias, incluindo UASB – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente em Manta de Lodo, uma fase aeróbia FAS – Filtro Aeróbio Submerso e Decantador Secundário Lamelar.

A passagem do efluente entre os compartimentos ocorre exclusivamente por gravidade, com desníveis projetados para garantir o funcionamento correto do sistema. Além disso, o retorno do lodo gerado no Decantador é realizado automaticamente por um sistema de elevador pneumático, acionado em intervalos pré-programados por um controlador temporário monitorado pelo painel de comando elétrico.

Figura 5 – Fluxograma da ETE em estudo.



Fonte: Elaboração própria (2024).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE

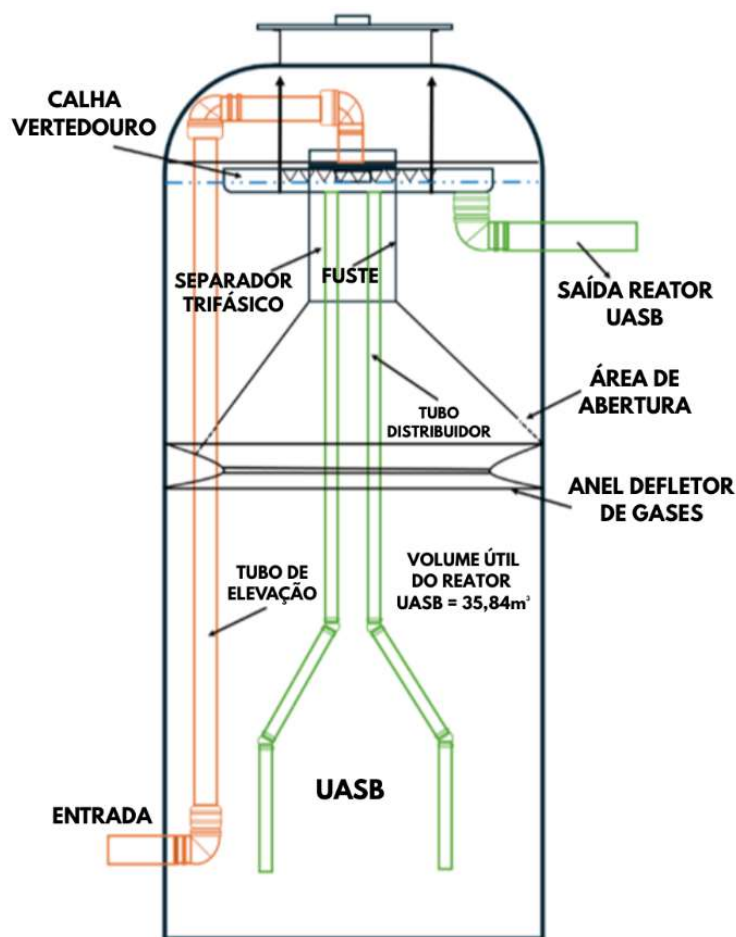
3.3.1 Gradeamento

O sistema de gradeamento utiliza barras de fibra de vidro, ferro ou aço dispostas verticalmente ou inclinadas, que retêm sólidos grosseiros permitindo o fluxo de esgotos. A ETE é composta por grades finas com espaçamento de 10 a 20 mm.

3.3.2 Reator UASB

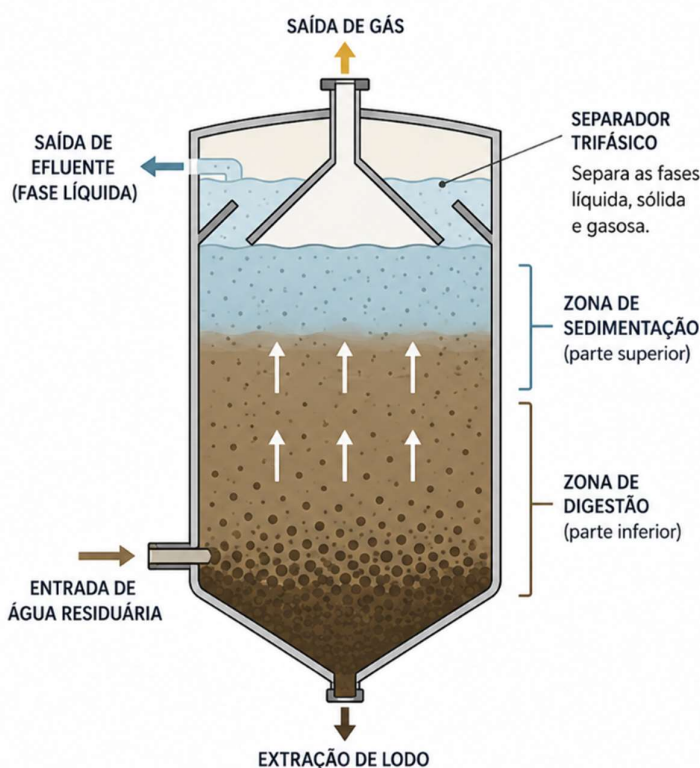
No reator UASB, demonstrado na Figura 6, as bactérias formam agregados que sedimentam facilmente, criando uma camada de lodo em seu interior. O sistema contém um dimensionamento para separar as fases líquida, sólida e gasosa. O separador trifásico divide o reator em zonas de digestão (inferior) e sedimentação (superior), com o fluxo da água residuária movendo-se ascendentemente, atravessando o separador e entrando na zona de sedimentação, conforme Figura 7.

Figura 6 – Ilustração esquemática do reator UASB em estudo.



Fonte: Indústria do Polo Industrial de Manaus (2015).

Figura 7 – Representação esquemática do funcionamento do reator UASB, destacando a entrada do afluente, a formação da camada de lodo, o separador trifásico e as zonas de digestão e sedimentação.



Fonte: Elaboração própria (2026).

3.3.2.1 Partes Constituintes do Reator UASB

O reator UASB em estudo é composto por diferentes sistemas responsáveis por seu funcionamento. O sistema de distribuição do esgoto permite a equalização do efluente por meio de um reservatório central cilíndrico localizado no topo do separador trifásico, onde ocorre a recepção do fluxo. Posteriormente, o efluente é redistribuído de forma uniforme para quatro câmaras, por meio de vertedores triangulares reguláveis instalados nas paredes do reservatório.

O sistema de descarte de lodo consiste em uma tubulação de 150 mm, com entrada posicionada na parte superior do reator. A remoção do lodo é realizada periodicamente por meio de caminhões limpa-fossa, sob responsabilidade da empresa operadora. O sistema de remoção de espuma é constituído por uma abertura no topo do separador trifásico, que permite o acesso à câmara de acúmulo, possibilitando a retirada manual quando necessário.

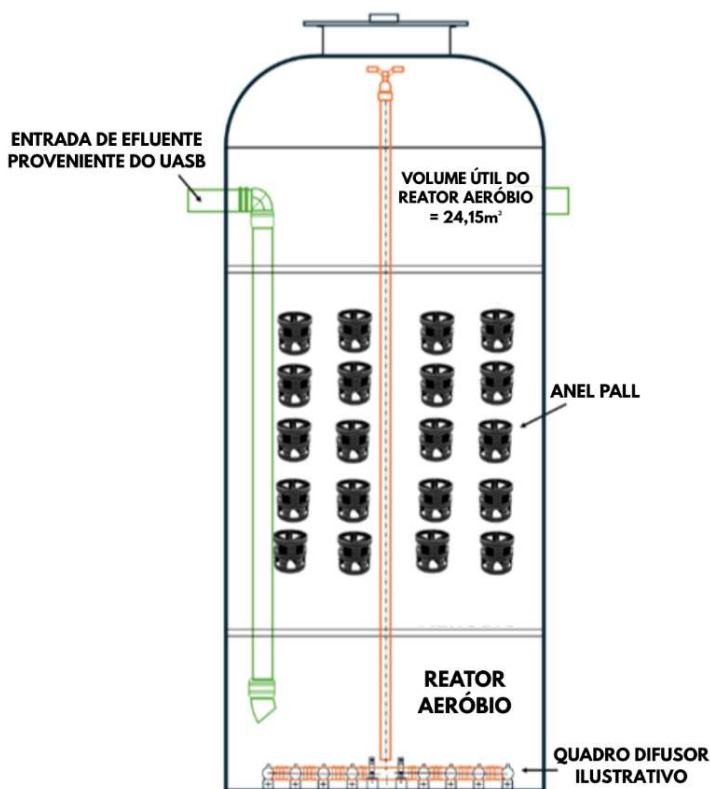
O acesso à parte superior do reator, para fins de operação e manutenção, é feito por meio de uma escada em fibra de vidro fixada à estrutura. Os reatores existentes são interligados por

passarelas do mesmo material. O acesso às regiões internas pode ser realizado por bocais de inspeção localizados no topo, bem como por um bocal elíptico disposto na lateral do reator.

3.3.3 Reator Aeróbio

O sistema estudado utiliza o modelo de Filtro Aeróbio Submerso (FAS), ilustrado na Figura 8, com meio suporte estruturado em material plástico, no qual não ocorre retenção física da biomassa por filtração, eliminando, assim, a necessidade de operações de contra lavagem. Após o processo de filtração biológica, o efluente é encaminhado a um decantador secundário para sedimentação do lodo, o que contribui para a simplificação operacional da unidade, reduzindo custos e complexidade ao dispensar etapas como contra lavagem e injeção adicional de ar.

Figura 8 – Ilustração esquemática do reator aeróbio.



Fonte: Indústria do Polo Industrial de Manaus (2015).

O meio suporte empregado é do tipo Pall Ring (Anel Pall), constituído por estruturas cilíndricas com aberturas distribuídas em todas as direções, favorecendo a circulação do fluido e a distribuição do ar na massa líquida. Essa configuração proporciona maior área superficial

específica para a aderência e crescimento de microrganismos, sem provocar obstruções no sistema.

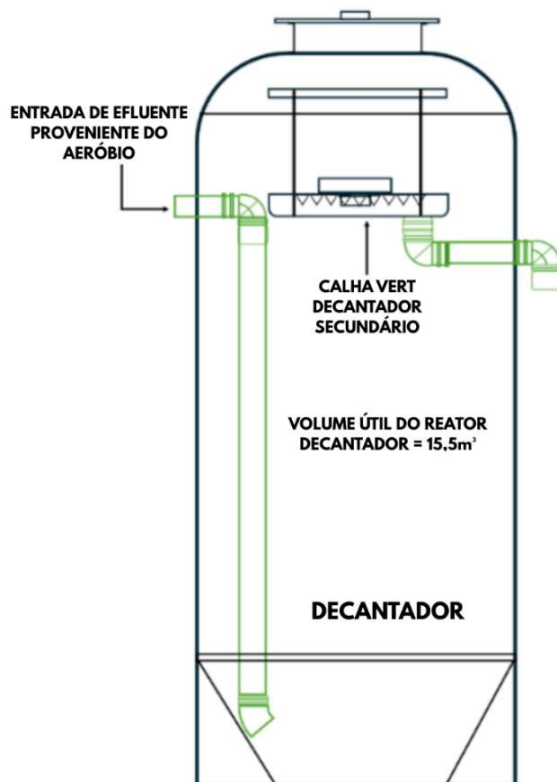
A aeração é realizada por difusores de ar de bolhas finas com membranas, responsáveis pela introdução de ar no tanque. Esses dispositivos apresentam comportamento expansível durante a operação e retração quando desligados, o que contribui para a prevenção de entupimentos.

O sistema de aeração é alimentado por sopradores de ar com funcionamento contínuo, que demandam apenas manutenção preventiva básica, incluindo verificação de filtros e níveis de óleo. O sistema conta com um soprador principal e outro reserva, com comutação automática, garantindo a continuidade da operação em casos de falha ou necessidade de manutenção.

3.3.4 Decantação

A decantação secundária compreende um volume correspondente a no mínimo 1,50 horas de tempo de detenção hidráulica e taxa de aplicação hidráulica igual a $1,3 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, sendo o lodo nesta etapa do tratamento classificado como de sedimentabilidade média-ruim, ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Ilustração esquemática do decantador em estudo.



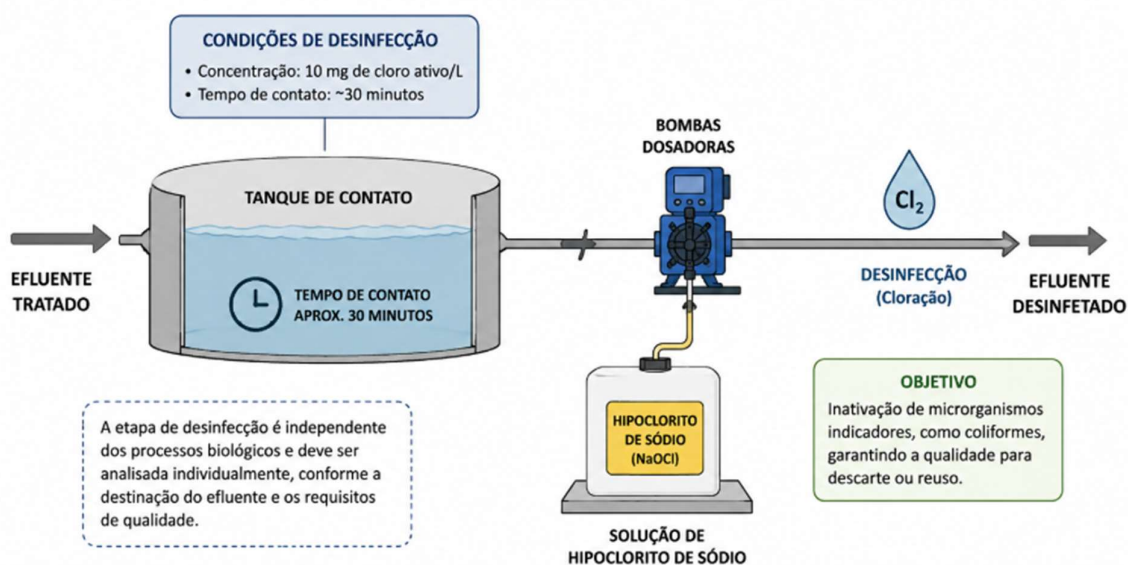
Fonte: Indústria do Polo Industrial de Manaus (2015).

3.3.5 Desinfecção

O sistema de desinfecção adotado, ilustrado na Figura 10, foi definido em função da destinação do efluente tratado, sendo recomendada a cloração nos casos de reuso com potencial de contato humano. O processo emprega hipoclorito de sódio, dosado por meio de bombas dosadoras, com tempo de contato de aproximadamente 30 minutos em tanque específico e concentração de 10 mg de cloro ativo/L, visando à inativação de microrganismos indicadores, como coliformes.

A etapa de desinfecção é independente dos processos biológicos de tratamento, devendo ser analisada de forma individual, considerando as características do efluente final e os requisitos específicos de qualidade estabelecidos para seu descarte ou reuso.

Figura 10 – Representação esquemática da etapa de desinfecção por cloração utilizando hipoclorito de sódio.

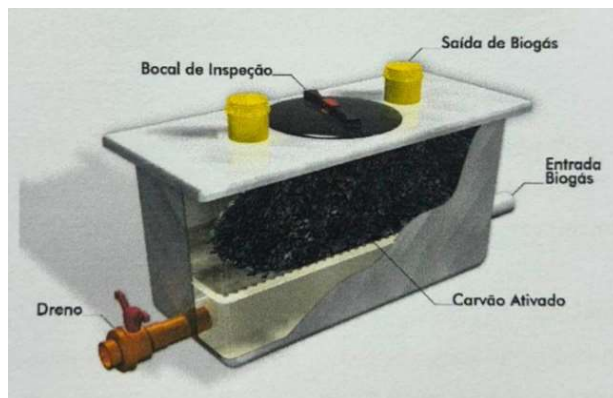


Fonte: Elaboração própria (2026).

3.3.6 Filtro de Biogás

A ETE adota um filtro de carvão ativado, demonstrado na Figura 11, para coletar e neutralizar gases gerados pelos reatores UASB. Com técnicas modernas, é possível criar peneiras moleculares de carvão para separação de gases, aproveitando sua distribuição específica de tamanho de poros.

Figura 11 – Representação esquemática do filtro de biogás.

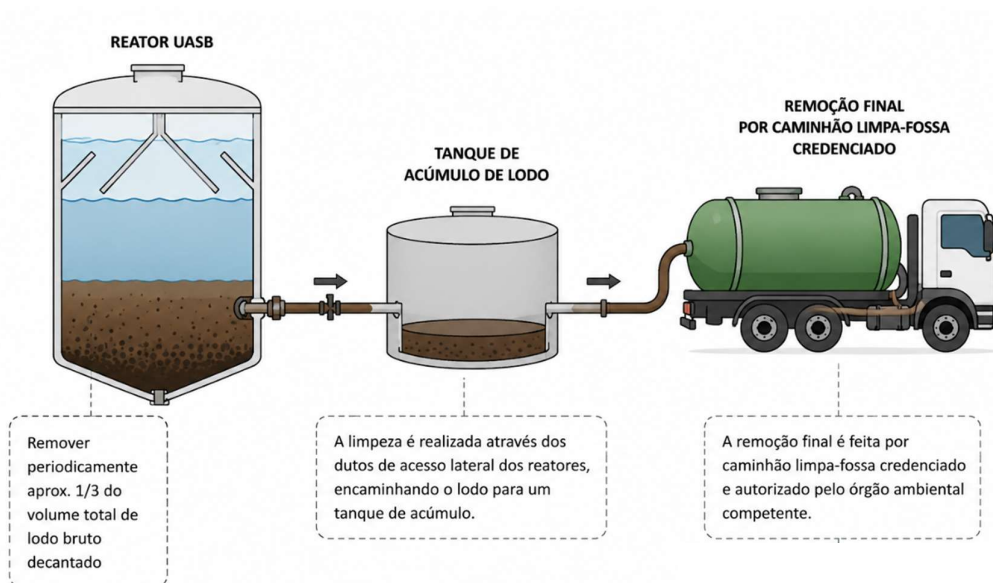


Fonte: Indústria do Polo Industrial de Manaus (2015).

3.3.7 Limpeza do Sistema

No reator UASB, deve-se remover periodicamente aproximadamente 1/3 do volume total de lodo bruto decantado, mantendo uma população mínima de microrganismos para não comprometer o tratamento. A limpeza é realizada através de dutos de acesso lateral dos reatores, encaminhando o lodo para um tanque de acúmulo. A remoção final é feita por caminhão limpa-fossa credenciado e autorizado pelo órgão ambiental competente, sendo o lodo destinado a local apropriado, ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Representação esquemática da limpeza do sistema de tratamento, destacando a remoção e a destinação final do lodo.



Fonte: Elaboração própria (2026).

3.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO

A avaliação da eficiência do tratamento foi avaliada com base nos parâmetros de monitoramento estabelecidos pela empresa, conforme apresentado na Tabela 4. Esses parâmetros estão alinhados com as diretrizes do Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas (IPAAM) e com os padrões de lançamento de efluentes estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 430/2011, que revoga e altera a Resolução N° 357/2005.

Tabela 4 – Condições de lançamento de efluentes.

Parâmetros	Condições Resolução CONAMA N° 430/2011
Coliformes fecais	≤ 1000 NMP 100/mL
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Remoção Mín. de 60%
Óleos e graxas	Máx. 100,0 mg/L
pH	Entre 5,0 a 9,0
Sólidos sedimentáveis	Máx. 1,0 mL/L
Temperatura	Inferior a 40 °C
Sulfetos	Máx. 1,0 mg/L
Óleos vegetais e gorduras animais	Máx. 50,0 mg/L

Fonte: Brasil (2011).

3.5 AQUISIÇÃO DE DADOS E PONTOS MONITORADOS

O presente trabalho utilizou dados fornecidos pela indústria, obtidos por meio de monitoramento bimestral, realizado entre fevereiro de 2023 a dezembro de 2025. Esses dados abrangem informações sobre o controle de operação da ETE, coletadas na entrada (efluente bruto) e saída do tratamento (água tratada), totalizando dois pontos de monitoramento.

Os parâmetros avaliados estão listados na Tabela 4. As amostras foram recolhidas em recipientes do tipo bombona e enviadas ao laboratório terceirizado contratado pela indústria para realização das análises.

3.6 ANÁLISES DE MONITORAMENTO

Todas as análises realizadas têm como finalidade melhorar o processo e assegurar que os resultados estejam em conformidade com os padrões exigidos. O objetivo principal é demonstrar a eficácia do tratamento. As análises são feitas a cada dois meses dentro de um período de um ano, pelo laboratório autorizado, com a coleta simultânea de amostras de efluente

bruto e tratado para avaliação, ilustrado na Tabela 5. As metodologias de análise utilizadas pelo laboratório são encontradas no Métodos Padrão para o Exame de Água e Esgoto (SMWW).

Tabela 5 – Parâmetros, frequência e metodologia.

Parâmetros	Frequência	Metodologia
Coliformes fecais	Bimestral	SMWW, 23ª Edição, Método 9221 B e C
DBO ₅	Bimestral	SMWW, 23ª Edição, Método 5210B
Óleos e graxas totais	Bimestral	SMWW, 23ª Edição, Método 5520 B
pH	Bimestral	SMWW, 23ª Edição, Método 4500-H+ B
Sólidos sedimentáveis	Bimestral	SMWW, 23ª Edição, Método 2540F
Temperatura	Bimestral	SMWW, 23ª Edição, Método 2550 B
Sulfeto	Bimestral	HACH, Método 8131, 11 ^a ed, 2018
Óleos vegetais e gordura animal	Bimestral	SMWW, 23ª Edição, Método 5520 B

Fonte: Elaboração própria (2024).

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O Controle Estatístico de Processo (CEP) consiste em um conjunto de princípios gerenciais, técnicas e habilidades derivadas da estatística e da engenharia. Seu objetivo principal é assegurar a estabilidade e promover a melhoria contínua de processos produtivos e administrativos (Todelo *et al.*, 2012).

Na Engenharia Química, o CEP configura-se como uma metodologia fundamentada em ferramentas estatísticas que permite monitorar e controlar variáveis críticas dos processos. Em específico, em Estações de Tratamento de Efluentes, essa abordagem torna-se essencial para avaliar e garantir a eficiência na remoção de poluentes, promovendo resultados consistentes e sustentáveis (Luz, 2020).

Para sua implementação efetiva, o CEP utiliza um conjunto de ferramentas conhecidas, que incluem: Fluxograma, Diagrama de Ishikawa (causa e efeito), Folha de Verificação, Histograma, Diagrama de Dispersão, Diagrama de Pareto e Gráficos de Controle (também chamados de Cartas de Controle ou Gráficos de Shewhart) (Paladini, 2019).

Dentre essas ferramentas, os gráficos de controle se destacam como o método mais frequentemente utilizado para monitoramento de processos, permitindo uma análise precisa da variabilidade e do desempenho.

3.7.1 Gráficos de Controle

Os gráficos de controle são ferramentas fundamentais do CEP, permitindo identificar variações atípicas características de processos ou produtos. Esses gráficos operam mediante a definição de uma faixa de controle aceitável ao longo do tempo, possibilitando não apenas a medição e monitoramento dos resultados, mas também a comparação com os limites de especificação estabelecidos por clientes ou normas regulatórias (Paladini, 2019).

Em Estações de Tratamento de Efluentes, considerando-a como um sistema produtivo, com fluxos de entrada (esgoto bruto), transformação (estruturas e equipamentos) e saída (água tratada), os gráficos de controle constituem uma ferramenta essencial para acompanhar e aprimorar o processo de tratamento, garantindo o rigoroso atendimento aos parâmetros legais (Souza, 2018). Consequentemente, é viável aplicar gráficos de controle em Estações de Tratamento de Efluentes.

Há duas categorias principais de gráfico de controle: os gráficos de atributos e gráficos de variáveis. Os gráficos de atributos avaliam características qualitativas, classificando os elementos produzidos em categorias discretas de aceitação ou rejeição. Em contrapartida, os gráficos de variáveis utilizam medições quantitativas, permitindo uma análise mais detalhada das características de qualidade através de escalas contínuas de mensuração (Henning *et al.*, 2014).

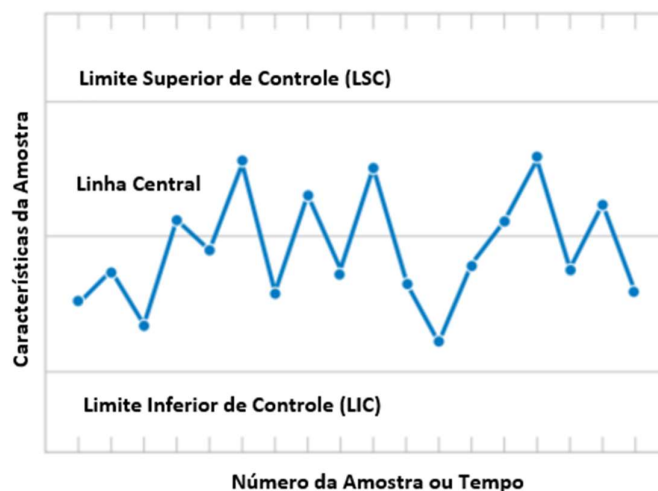
Essa diferenciação possibilita uma abordagem flexível e abrangente no monitoramento de processos, adaptando-se às especificidades de cada sistema de tratamento.

3.7.1.1 Construção Gráfica

Na representação gráfica de controle estatístico, o eixo horizontal exibe os números das amostras ou observações, enquanto o vertical apresenta os valores do parâmetro analisado. O gráfico possui três linhas horizontais fundamentais, demonstrado na Figura 13: a linha média

central (LC), que representa o valor esperado do processo, ladeada pelos limites superior (LSC) e inferior (LIC) de controle, estabelecendo os intervalos de variação aceitáveis (Luz, 2020).

Figura 13 – Exemplificação de um gráfico de controle.



Fonte: Montgomery (2018).

Os limites de controle são definidos para que, em um processo estável, praticamente todas as amostras estejam dentro deles. Quando um ponto ultrapassa esses limites, indica que o processo está desviando de sua normalidade, sinalizando a necessidade de investigação e ações corretivas para identificar e eliminar as causas específicas desse comportamento anômalo (Costa; Epprecht; Carpinetti, 2004).

Tipicamente, os limites de controle são estabelecidos a três desvios padrão da média processual, proporcionando uma área que minimiza alarmes falsos. Essa abordagem define estatisticamente um intervalo de confiança com precisão de 99,73%, permitindo identificar pontos fora da curva que se distanciam significativamente do conjunto de dados analisado (Paladini, 2019).

3.7.1.2 Gráfico de Controle para Medidas Individuais

Em ambientes industriais, na Estação de Tratamento de Efluentes, a lentidão nos processos de tratamento pode levar ao acúmulo de amostras, afetando negativamente a eficiência das operações. O gráfico de controle para medidas individuais torna-se uma ferramenta essencial para monitorar e otimizar o tratamento de efluentes, permitindo intervenções rápidas e precisas na qualidade do processamento (Montgomery, 2009).

Por motivos dos dados analisados serem coletados em intervalos bimestrais, há a necessidade de utilização do gráfico de controle de valor individual ($\bar{x}$), porque é adequado para

situações com baixa frequência de coleta. Dessa forma, os limites de controle serão determinados pelas equações específicas abaixo (Equações 1-6) de controle estatístico de processo (Silva, 2023).

$$\bar{x} = \frac{\sum_n^i x_i}{n} \quad (1)$$

$$Rm_i = |x_i - x_{i+1}| \quad (2)$$

$$\overline{Rm} = \frac{\sum_{n-1}^i Rm_i}{n - 1} \quad (3)$$

$$LC_x = \bar{x} \quad (4)$$

$$LSC_x = \bar{x} + E_2 \times \overline{Rm} \quad (5)$$

$$LIC_x = \bar{x} - E_2 \times \overline{Rm} \quad (6)$$

Onde:

$\bar{x}$ – Valor médio do parâmetro aplicado.

x_i – Valor específico do parâmetro no ponto i.

x_{i+1} – Valor do parâmetro no ponto subsequente (i + 1).

n – Tamanho total da amostra em estudo.

Rm_i – Amplitude móvel calculada para o ponto atual.

$\overline{Rm}$ – Média calculada das amplitudes móveis.

E_2 – Parâmetro de ajuste específico para o gráfico de x.

LSC_x – Limite superior de controle no gráfico de x.

LC_x – Linha central no gráfico de x.

LIC_x – Limite inferior de controle para o parâmetro x no gráfico.

O parâmetro de ajuste (E_2) corresponde a uma constante, cujo valor varia conforme o tipo de gráfico de controle e o tamanho da amostra analisada, demonstrada na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetro de ajuste (E_2).

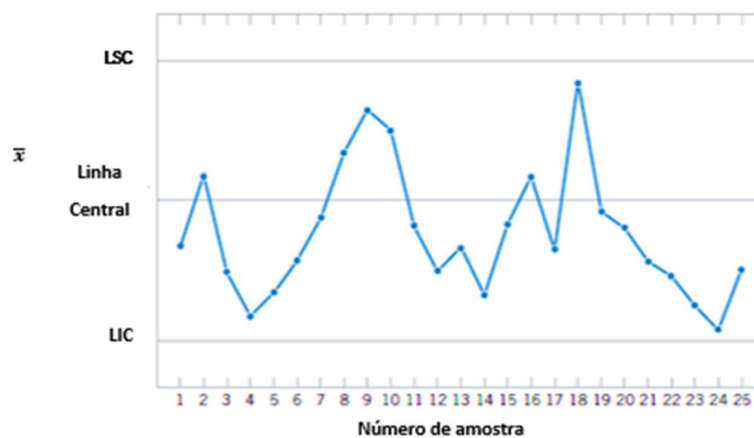
n	E_2
2	2,660
3	1,772
4	1,457
5	1,290

Fonte: Montgomery (2018).

Na análise realizada, foram utilizados os dados correspondentes ao exercício de 2023 para estabelecer os parâmetros iniciais de controle nos gráficos, caracterizando a etapa 1 do processo. As delimitações foram processadas através da ferramenta Microsoft Excel. Posteriormente, a etapa 2 compreende uma análise detalhada dos gráficos, abrangendo as informações compiladas nos anos de 2024 a 2025.

3.7.1.3 Interpretação dos Gráficos de Controle

O gráfico de controle pode indicar uma condição anormal quando pontos ultrapassam os limites de controle ou apresentam padrões não aleatórios, conforme Figura 14. A aleatoriedade esperada seria uma distribuição uniforme em torno da linha central (Montgomery, 2009).

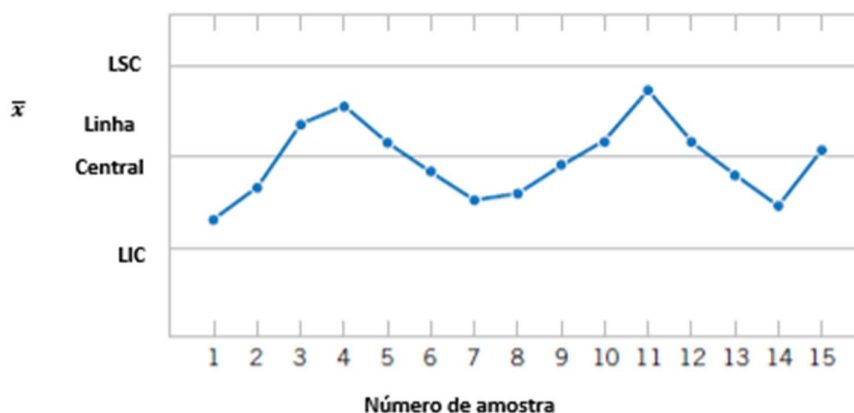
Figura 14 – Gráfico de controle $\bar{x}$.

Fonte: Montgomery (2018).

Além dos limites, outros indicadores são considerados na análise, como sequências consecutivas de pontos ascendentes ou descendentes e comportamento cíclico da média amostral, mesmo quando todos os pontos estão dentro dos limites de controle. Essas

características auxiliam na identificação de variações sistemáticas que podem sinalizar problemas no processo ou na qualidade, conforme Figura 15 (Montgomery, 2009).

Figura 15 – Gráfico $\bar{x}$ com um padrão cíclico de comportamento.



Fonte: Montgomery (2018).

De acordo com, a ISO 7870-2:2013 – Gráficos de Controle – Parte 2: Gráficos de Controle de Shewhart, a análise de gráficos de controle pode ser realizada com base em oito critérios destinados à identificação de comportamentos não aleatórios nos dados, demonstrado na Tabela 7. A aplicação desses critérios permite avaliar a estabilidade estatística do processo e detectar possíveis causas especiais de variação. Com base nas diretrizes propostas por Montgomery (2009), a identificação de um processo fora de controle ocorre quando é observada qualquer uma das seguintes condições:

Tabela 7 – Critérios estabelecidos pela ISO 7870-2:2013 em gráficos de controle.

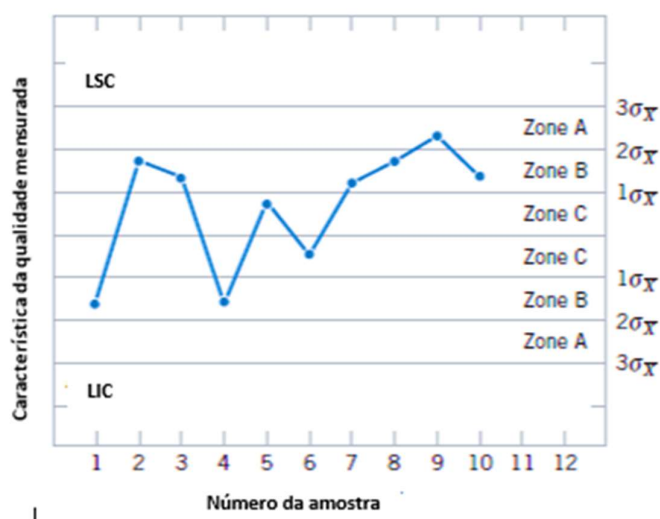
Critérios	Características
1	Qualquer ponto fora dos limites 3-sigma.
2	Seis pontos consecutivos localizados do mesmo lado da linha central, situados na zona C ou em zonas mais afastadas.
3	Série de seis pontos consecutivos com tendência contínua de crescimento ou de diminuição.
4	Quatorze pontos seguidos apresentando alternância sistemática entre valores crescentes e decrescentes.
5	Dois de três pontos consecutivos caírem além do limite 2-sigma (zona A), do mesmo lado da linha central.

Critérios	Características
6	Quatro de cinco pontos consecutivos caírem a uma distância de 1-sigma (zonas B ou A), do mesmo lado da linha central.
7	Quinze pontos consecutivos concentrados na região central do gráfico, distribuídos em ambos os lados da linha média do processo.
8	Oito pontos consecutivos caírem em ambos os lados da linha central, sem nenhum na zona C.

Fonte: Montgomery (2009).

Para utilizá-los, é necessário segmentar o intervalo entre os limites de controle, como demonstrado na Figura 16. Nesta figura, um gráfico de controle exibe os limites correspondentes a 1σ , 2σ e 3σ , que atuam como limites de aviso e são denominadas zonas A, B e C, dispostas de forma simétrica em relação à linha central (Silva, 2023).

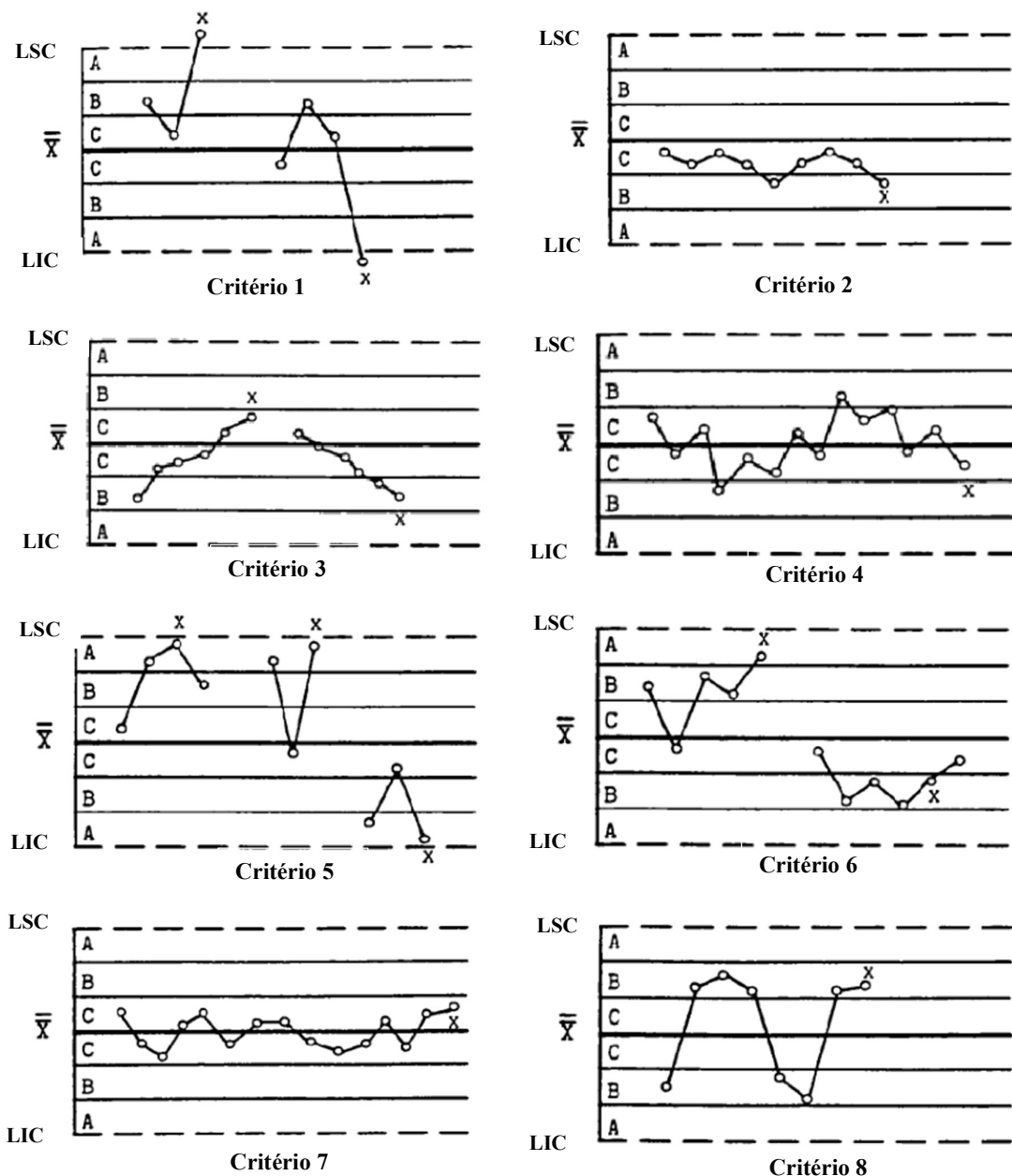
Figura 16 – Representação das zonas utilizadas na aplicação dos critérios de detecção de causas especiais conforme a ISO 7870-2:2013.



Fonte: Montgomery (2018).

Nelson (1985) analisou os oito critérios para identificar causas especiais em gráficos de controle, considerando os limites de controle superior (LSC) e inferior (LIC) e a média do parâmetro processual, conforme Figura 17.

Figura 17 – Testes causas especiais em gráficos de controle.



Fonte: Nelson (1985).

A Figura 17 apresenta os oito critérios utilizados para a identificação de causas especiais de variação em gráficos de controle. O critério 1 é caracterizado pela ocorrência de pontos fora dos limites de controle, indicando a presença de causas não aleatórias, como falhas operacionais, erros de medição ou problemas associados ao processo. Além disso, quanto maior a magnitude da alteração, mais rapidamente o gráfico tende a emitir um sinal de alerta (Nelson, 1985).

O critério 2 é identificado pela presença de uma sequência de pontos localizados no mesmo lado da linha central, sugerindo um deslocamento da média do processo. Esse comportamento pode estar relacionado a mudanças em matérias-primas, equipamentos ou procedimentos operacionais (Nelson, 1985).

O critério 3 caracteriza-se pela ocorrência de uma tendência contínua de aumento ou redução dos valores observados, indicando alterações graduais no processo, que podem ser decorrentes do desgaste de equipamentos ou de mudanças nas condições operacionais (Nelson, 1985).

O critério 4 corresponde à alternância sucessiva entre valores crescentes e decrescentes, evidenciando uma variação sistemática que pode estar associada ao uso alternado de equipamentos, operadores ou fornecedores distintos (Nelson, 1985).

O critério 5 é caracterizado pela concentração de pontos próximos aos limites de controle, indicando possíveis alterações na média do processo. Esse comportamento pode estar relacionado a ajustes excessivos dos parâmetros operacionais. De forma semelhante, o critério 6 também sinaliza deslocamentos da média, porém de maneira mais sutil e gradual (Nelson, 1985).

O critério 7 é identificado pela concentração de pontos próximos à linha central, sugerindo baixa variabilidade dos dados ou possíveis limitações do sistema de medição utilizado. Por fim, o critério 8, conhecido como padrão de mistura, caracteriza-se pela ausência de pontos próximos à linha central e pela concentração das observações em regiões mais afastadas do gráfico, indicando a possível presença de diferentes fontes de variação no processo (Nelson, 1985).

Na falta desses padrões, presume-se que o processo apresenta variação somente devido a causas naturais. Contudo, é recomendável validar essa hipótese por meio de um teste de normalidade (Silva, 2023). Portanto, os gráficos elaborados neste trabalho foram analisados conforme a norma ISO 7870-2:2013 – Gráficos de Controle – Parte 2: Gráficos de Controle de Shewhart. As avaliações foram realizadas de forma manual, juntamente com a construção dos gráficos na ferramenta Microsoft Excel.

3.7.1.4 Teste de Normalidade

A distribuição normal, também conhecida como distribuição de Gauss, caracteriza-se por uma curva simétrica em forma de sino, centralizada em torno de seu ponto médio. O teste de normalidade objetiva verificar se um conjunto de dados de uma variável pode ser adequadamente representado por uma distribuição normal. Embora recursos gráficos como o

histograma e normal plot sejam comumente utilizados para essa avaliação, esses métodos visuais não fornecem uma confirmação precisa sobre a proximidade da distribuição com a normalidade. Para uma avaliação mais rigorosa da normalidade, são necessários testes estatísticos formais que possam quantificar objetivamente o grau de aderência à distribuição normal (Lopes; Branco; Soares, 2013).

Nesse contexto, o teste de Shapiro-Wilk destaca-se na avaliação de normalidade em amostras reduzidas, fornecendo o valor-p, que representa a probabilidade de os dados serem originários de uma população com distribuição normal. A interpretação do teste segue a seguinte lógica: quando $\text{valor-p} \leq \alpha$ (geralmente 0,05 ou 5%), rejeita-se a hipótese nula (H_0), indicando que os dados não seguem distribuição normal. Quando $\text{valor-p} > \alpha$, não se rejeita H_0 , sugerindo que a distribuição normal é uma possibilidade para o conjunto de dados (Hanusz; Tarasinska; Zielinski, 2016).

O nível de significância (α), estabelecido comumente em 0,05, representa o risco percentual de concluir incorretamente que os dados não apresentam distribuição normal. Em síntese, um valor-p superior a 0,05 permite considerar que os dados seguem uma distribuição normal (Hanusz; Tarasinska; Zielinski, 2016). Para calcular o teste de Shapiro-Wilk, utiliza-se a equação 7.

$$W = \frac{b^2}{s^2} = \frac{(\sum_{i=1}^n a_1 x_i)^2}{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)} \quad (7)$$

Onde:

W – Teste de Shapiro-Wilk

n – Quantidade total de dados

x_i – Valor do parâmetro em cada ponto

$\bar{x}$ – Média dos valores do parâmetro

a_1 – Coeficientes tabelados

Dessa forma, os testes de normalidade de Shapiro-Wilk serão processados com o suporte das ferramentas Microsoft Excel com suplemento de Real Statistics e Minitab.

3.7.1.5 Capacidade do Processo

Na implementação do CEP, a análise de capacidade é fundamental para avaliar se um processo com comportamento conhecido pode produzir serviços dentro das especificações predeterminadas. As métricas principais são a capacidade do processo (Cp) e a capacidade do

processo unilateral (Cpk). O Cp representa a razão entre a faixa de especificação e a variação natural do processo, sendo que quanto maior seu valor, melhor o processo atende às especificações. O Cpk corresponde ao valor mínimo entre a capacidade do processo superior (Cps) e inferior (Cpi), calculado pela razão do valor absoluto da diferença entre limites e 3σ (Paladini, 2019; Coutinho, 2020; Silva, 2023). As equações 8, 9, 10 e 11 demonstram esses cálculos:

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (8)$$

$$Cpk = \min \{Cpi, Cps\} \quad (9)$$

$$Cpi = \frac{\bar{x} - LIE}{3\sigma} \quad (10)$$

$$Cps = \frac{LSE - \bar{x}}{3\sigma} \quad (11)$$

Onde:

Cp – Capacidade do processo

LSE – Limite superior de especificação

LIE – Limite inferior de especificação

Cpk – Capacidade do processo unilateral

Cpi – Capacidade do processo inferior

Cps – Capacidade do processo superior

$\bar{x}$ – Média dos valores do parâmetro

σ – Desvio padrão

Quando o desvio-padrão (σ) não é conhecido, são aplicados fatores de correção para ajustar os cálculos. Nesse caso, as equações 8, 10 e 11 são modificadas, resultando nas equações 12, 13 e 14, respectivamente (Silva, 2023).

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6 \frac{Rm}{d_2}} \quad (12)$$

$$Cpi = \frac{\bar{x} - LIE}{3 \frac{Rm}{d_2}} \quad (13)$$

$$Cps = \frac{LSE - \bar{x}}{3 \frac{\overline{Rm}}{d_2}} \quad (14)$$

Onde:

Cp – Capacidade do processo

LSE – Limite superior de especificação

LIE – Limite inferior de especificação

Rm – Amplitude móvel calculada para o ponto atual

d_2 – Parâmetro de ajuste tabelado

Cpi – Capacidade do processo inferior

$\bar{x}$ – Média dos valores do parâmetro

$\overline{Rm}$ – Média calculada das amplitudes móveis

Cps – Capacidade do processo superior

O parâmetro de ajuste d_2 está disponível em tabela e pode ser consultado na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetro de ajuste (d_2).

n	d_2
2	1,128
3	1,693
4	2,059
5	2,326

Fonte: Montgomery (2018).

Para os índices de capacidade, valores mais elevados indicam melhor desempenho processual. A classificação da capacidade do processo, ilustrado na Tabela 9, varia conforme o valor de Cp : processos com $Cp < 1,00$ são considerados incapazes, com resultados provavelmente fora da tolerância; processos com Cp entre 1,00 e 1,33 são razoavelmente capazes, com aproximadamente 0,27% de saídas fora da especificação; processos com $Cp > 1,33$ são considerados capazes, com mais de 99,73% dos resultados dentro da tolerância. Processos classificados como capazes permitem pequenas variações em materiais, métodos, máquinas e ambiente sem comprometer a qualidade (Kent, 2016; Silva, 2023). Os cálculos de capacidade do processo serão desenvolvidos de forma manual no Microsoft Excel.

Tabela 9 – Classificação do sistema com base no índice de capacidade do processo.

Valor do parâmetro	Classificação do sistema
$Cp < 1,00$	Incapaz
$1,00 \leq Cp \leq 1,33$	Razoavelmente capaz
$Cp > 1,33$	Capaz

Fonte: Kent (2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados referentes aos gráficos de controle, à verificação da normalidade dos dados e à análise da capacidade do processo. Também serão abordados os principais fatores que influenciaram tais resultados, além de ser realizada a comparação entre os valores obtidos e os limites estabelecidos pelas normas aplicáveis, quando pertinente.

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Os relatórios bimestrais com os resultados dos parâmetros definidos pela legislação ambiental, descritos na Tabela 1 no item 2.6, foram disponibilizados pelo laboratório licenciado responsável pelas análises.

Os dados referentes aos anos 2023, 2024 e 2025, estão disponíveis nas Tabelas 10, 11 e 12 e foram utilizados para a construção dos gráficos de controle e demais avaliações realizadas.

Tabela 10 – Consolidação dos dados das amostras da ETE avaliada, referentes ao período de janeiro a dezembro de 2023.

Parâmetro	Unidade	Fev/23	Abr/23	Jun/23	Ago/23	Out/23	Dez/23
Coliformes fecais	NPM 100/mL	705	623	427	1150	894	901
DBO	%	94,5	95,2	97,6	94	98,8	98,6
Óleos e graxas	mg/L	8,9	6,5	10,7	13	11,5	14,8
pH	-	6,83	6,75	7,01	6,65	7,46	6,84
Sólidos sedimentáveis	mg/L	0,3	1,98	0,1	0,2	0,5	0,2
Temperatura	°C	29,4	30,8	28,2	31,5	31,6	29,4
Sulfetos	mg/L	0,27	0,18	0,15	0,2	0,16	0,22
Óleos vegetais e gordura animal	mg/L	16,4	13,8	20	12	13	14

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 11 – Consolidação dos dados das amostras da ETE avaliada, referentes ao período de janeiro a dezembro de 2024.

Parâmetro	Unidade	Fev/24	Abr/24	Jun/24	Ago/24	Out/24	Dez/24
Coliformes fecais	NPM 100/mL	604	746	788	950	980	910
DBO	%	98	87	94	89	67	92
Óleos e graxas	mg/L	13,3	14,2	15,2	14	10,9	10
pH	-	7,13	6,17	7,3	7,75	6,73	6,5
Sólidos sedimentáveis	mg/L	0,5	0,8	0,5	0,6	0,8	0,3
Temperatura	°C	30,3	30,3	31,2	28	31,9	30,5
Sulfetos	mg/L	0,3	0,35	0,32	0,18	0,28	0,4
Óleos vegetais e gordura animal	mg/L	12,7	12,5	12	11,5	11	10,5

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 12 – Consolidação dos dados das amostras da ETE avaliada, referentes ao período de janeiro a dezembro de 2025.

Parâmetro	Unidade	Fev/25	Abr/25	Jun/25	Ago/25	Out/25	Dez/25
Coliformes fecais	NPM 100/mL	758	513	812	918	823	833
DBO	%	69	71	86	85,9	88	65,1
Óleos e graxas	mg/L	11,8	10	14,3	9,56	9,5	9,9
pH	-	8,89	5,67	7,71	7,38	5,92	5,07
Sólidos sedimentáveis	mg/L	0,5	0,1	0,5	0,3	0,2	0,5
Temperatura	°C	29	25,5	29,4	28,2	39,6	26,8
Sulfetos	mg/L	0,42	0,38	0,3	0,18	0,2	0,15
Óleos vegetais e gordura animal	mg/L	9,5	9	8,8	9,3	6,7	9,3

Fonte: Elaboração própria (2026).

4.2 GRÁFICO DE CONTROLE

Foram determinados a média e os limites de controle superior e inferior com base nas Equações 1 a 6. Em seguida, após a elaboração dos gráficos de controle, os dados do ano de 2020, que serviram de base para o cálculo dos limites, foram inseridos nos gráficos. Verificou-se que, para os parâmetros de coliformes fecais e sólidos sedimentáveis, houve ocorrência de pontos fora dos limites estabelecidos. Assim, os resultados iniciais desses dois parâmetros estão apresentados nas Figuras 16 e 17, pois foram os únicos que exibiram esse comportamento.

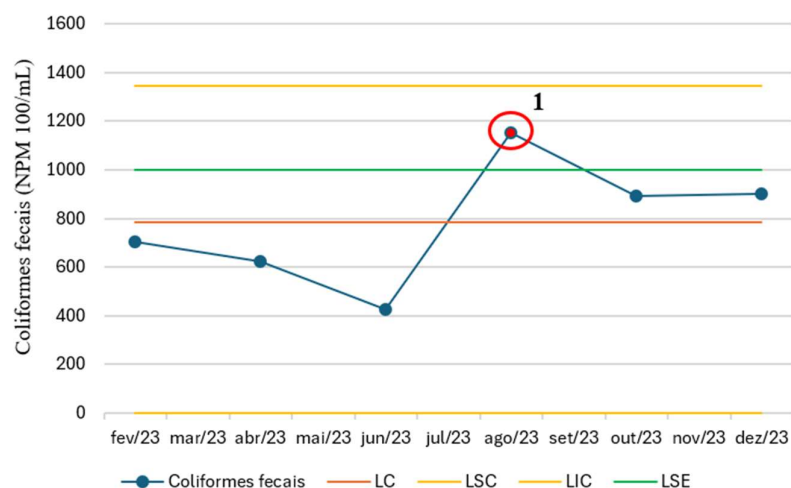
Ressalta-se que os limites inferiores calculados para coliformes fecais e sólidos sedimentáveis apresentaram valores negativos. Nessas situações, tais limites foram ajustados para zero, conforme indicado na Tabela 13.

Tabela 13 – Limites utilizados na construção dos gráficos de controle dos parâmetros coliformes fecais e sólidos sedimentáveis.

Parâmetro	Unidade	Média	LIC	LSC	LSE
Coliformes fecais	NPM 100/mL	784	0	1344,38	≤ 1000
Sólidos sedimentáveis	mg/L	0,55	0	2,52	1,0

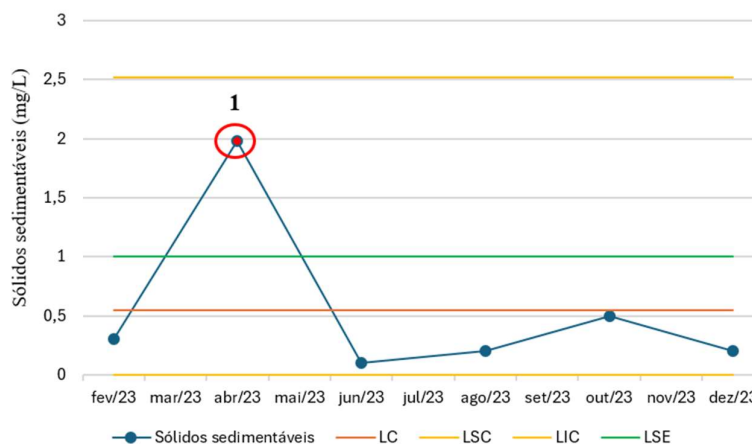
Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 18 – Gráfico de controle: coliformes fecais referentes ao ano de 2023. Os limites de controle estão representados pela cor amarela, o limite de especificação pela cor verde e a linha média pela cor laranja.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 19 – Gráfico de controle: sólidos sedimentáveis referentes ao ano de 2023. Os limites de controle estão representados pela cor amarela, o limite de especificação pela cor verde e a linha média pela cor laranja.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Para coliformes fecais, observa-se na Figura 18 que o valor referente ao mês de agosto ultrapassa o limite de especificação, configurando uma não conformidade pontual, conforme os critérios estabelecidos na norma ISO 7870-2:2013. O gráfico de controle ao longo de 2023 evidencia inicialmente uma tendência de redução dos valores até o mês de junho, seguida por um aumento acentuado que atinge o pico em agosto e posterior estabilização nos meses subsequentes.

Embora todos os pontos permaneçam dentro dos limites de controle, indicando que o processo se mantém sob controle estatístico, o valor observado em agosto excede o limite de especificação, demonstrando que o processo, apesar de estável, não atende integralmente aos requisitos estabelecidos. Além disso, a presença de três pontos consecutivos abaixo da linha média seguidos de três pontos acima sugere uma mudança no comportamento do processo, indicando possível influência de causa especial e reforçando a necessidade de investigação, mesmo em condições aparentemente controladas.

No caso dos sólidos sedimentáveis, conforme apresentado na Figura 19, o gráfico de controle ao longo de 2023 indica, de forma geral, um comportamento estável do processo, com a maioria dos valores próximos à linha média e dentro dos limites de controle. No entanto, destaca-se o valor observado no mês de abril, significativamente superior aos demais, caracterizando um ponto atípico. Esse valor também ultrapassa o limite de especificação, evidenciando uma não conformidade pontual. Tal ocorrência sugere a presença de uma causa especial, indicando a necessidade de investigação, mesmo que o processo, nos demais períodos, se mantenha sob controle estatístico.

Considerando que as Figuras 18 e 19 apresentaram pontos que excederam os limites de controle no ano de 2023, esses valores foram removidos e, em seguida, recalcularam-se os novos limites. Posteriormente, os dados foram replotados, resultando em um conjunto em que todos os pontos passaram a se situar dentro dos limites de controle, conforme apresentado na Tabela 14 para todos os parâmetros analisados.

Tabela 14 – Limites de controle para construção de gráficos de controle dos parâmetros analisados no ano de 2023.

Parâmetro	Média	LIC	LSC
Coliformes fecais (<i>NPM 100/mL</i>)	710,0	520,48	899,53
DBO (%)	96,45	90,23	100
Óleos e graxas (<i>mg/L</i>)	10,9	3,61	18,19

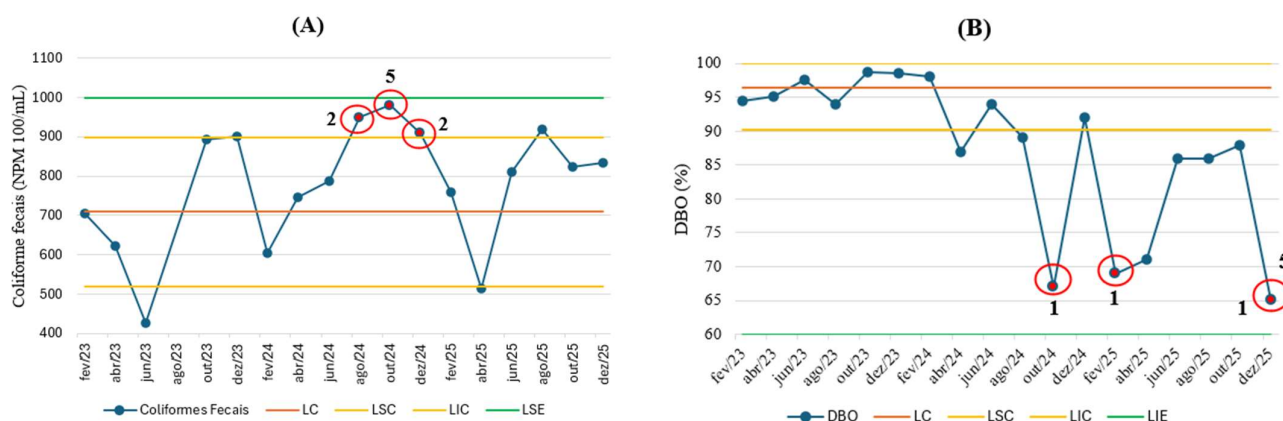
Parâmetro	Média	LIC	LSC
pH	7,0	5,79	8,06
Sólidos sedimentáveis (<i>mg/L</i>)	0,3	0,0	0,73
Temperatura (°C)	30,15	25,04	35,26
Sulfeto (<i>mg/L</i>)	0,20	0,053	0,34
Óleos vegetais e gordura animal (<i>mg/L</i>)	14,87	4,87	24,87

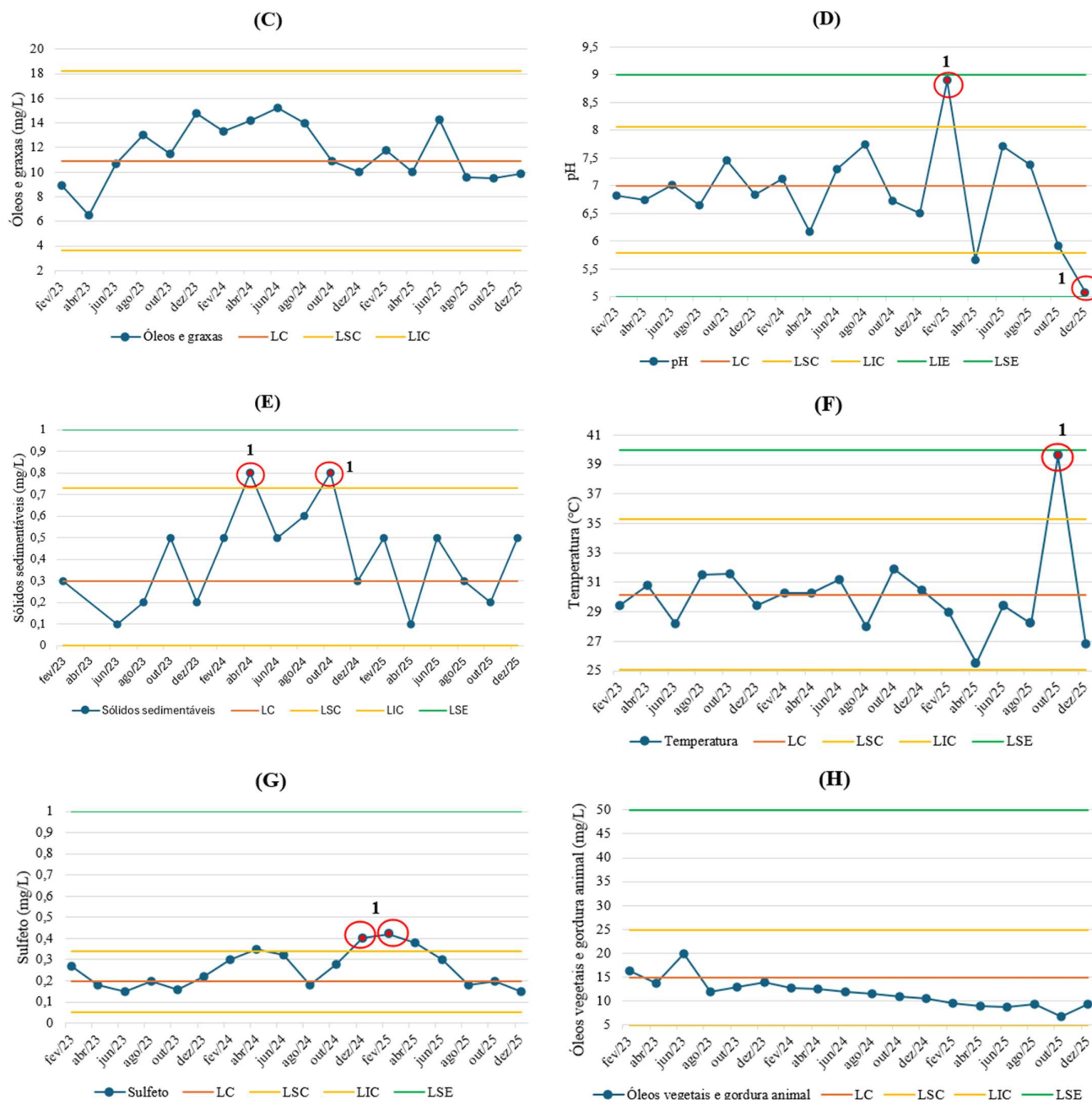
Fonte: Elaboração própria (2026).

O limite superior de remoção de DBO apresentado na Tabela 8 foi fixado em 100%, uma vez que o valor obtido por meio do cálculo ultrapassou esse limite teórico. Observa-se, ainda, que os demais limites determinados encontram-se em conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação vigente (Tabela 4, item 3.4).

Após o cálculo dos limites de controle, foram construídos os gráficos utilizando os dados referentes ao período de 2023 a 2025, com a devida plotagem dos valores, conforme ilustrado na Figura 20. Posteriormente, realizou-se a análise dos processos com base nos critérios estabelecidos no subitem 3.7.1.3.

Figura 20 – Gráficos de controle dos parâmetros analisados: (A) Coliformes fecais; (B) DBO; (C) Óleos e graxas; (D) pH; (E) Sólidos sedimentáveis; (F) Temperatura; (G) Sulfeto; (H) Óleos vegetais e gordura animal. Os limites de controle estão representados em amarelo, os limites de especificação em verde e a linha média em laranja.





Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 20 (A), referente aos coliformes fecais, observa-se que a maior parte dos resultados permanece dentro dos limites de controle e abaixo do limite de especificação, evidenciando conformidade com a legislação vigente. Entretanto, o processo não apresenta estabilidade estatística plena em decorrência da ocorrência de padrões não aleatórios e de registros pontuais fora dos limites de controle. Destacam-se sequências de pontos consecutivos posicionados no mesmo lado da linha central, caracterizando o critério 2 da ISO 7870-2:2013,

além de indícios de deslocamento da média do processo, associados ao critério 5. Essas ocorrências podem estar relacionadas a oscilações nas características do efluente. Apesar disso, os resultados demonstram desempenho satisfatório na remoção de microrganismos, mantendo o efluente tratado em conformidade com os padrões legais.

Para a remoção de DBO, apresentada na Figura 20 (B), todos os resultados atendem ao limite de especificação estabelecido pela legislação. Contudo, a presença de pontos abaixo do limite inferior de controle caracteriza o critério 1 da ISO 7870-2:2013, indicando a ocorrência de causas especiais de variação. Adicionalmente, verifica-se uma redução gradual dos valores ao longo do período monitorado, sugerindo uma mudança na média do processo (critério 5). Esse comportamento pode estar associado a melhorias na eficiência do tratamento biológico ou a alterações na composição do efluente. Como a DBO constitui um dos principais indicadores da carga orgânica biodegradável, os resultados evidenciam a eficiência da ETE na remoção desse parâmetro.

Os resultados de óleos e graxas, apresentados na Figura 20 (C), permanecem integralmente dentro dos limites de controle, sem evidências de tendências, sequências ou deslocamentos da média. Tal comportamento demonstra estabilidade operacional e controle estatístico do processo, indicando eficiência dos mecanismos de retenção e remoção desses compostos. Além disso, todos os valores encontram-se significativamente abaixo do limite de especificação. Ressalta-se que o limite superior de especificação de 100 mg/L não foi representado graficamente devido à escala adotada, uma vez que o limite superior de controle calculado foi de 18,19 mg/L.

Em relação ao pH (Figura 20 (D)), verifica-se predominância de resultados dentro dos limites de controle. Contudo, foram identificados dois pontos fora desses limites, sendo um acima do limite superior de controle e outro abaixo do limite inferior. Essa condição caracteriza o critério 1 da ISO 7870-2:2013 e evidencia a presença de causas especiais de variação. Tais oscilações podem estar associadas a alterações na composição do efluente ou a ajustes operacionais realizados durante o tratamento. Ainda assim, a maior parte dos resultados permaneceu em conformidade com os padrões legais, indicando condições adequadas para o funcionamento dos processos biológicos.

Na Figura 20 (E), referente aos sólidos sedimentáveis, os resultados mantêm-se predominantemente dentro dos limites de controle. Entretanto, a ocorrência de pontos acima do limite superior de controle caracteriza o critério 1 da ISO 7870-2:2013, indicando a influência de causas especiais de variação. Essas ocorrências podem estar relacionadas a falhas pontuais na remoção de sólidos ou a oscilações na carga efluente. Embora o processo não apresente

controle estatístico completo, todos os resultados permanecem dentro do limite de especificação estabelecido pela legislação, evidenciando desempenho ambiental satisfatório.

Para a temperatura (Figura 20 (F)), observa-se comportamento predominantemente estável, com a maioria dos resultados situada dentro dos limites de controle. No entanto, foi registrado um valor acima tanto do limite superior de controle quanto do limite de especificação, configurando o critério 1 da ISO 7870-2:2013. Esse evento pode estar relacionado a condições climáticas específicas ou a alterações operacionais temporárias. Apesar dessa ocorrência isolada, os demais resultados mantiveram-se dentro da faixa esperada de operação.

A Figura 20 (G) apresenta os resultados de sulfeto, que permanecem majoritariamente dentro dos limites de controle. Todavia, a presença de pontos acima do limite superior de controle caracteriza o critério 1 da ISO 7870-2:2013. Essas oscilações podem estar associadas a alterações na degradação anaeróbia da matéria orgânica ou a mudanças na composição do efluente. Mesmo diante dessas variações, todos os resultados permaneceram abaixo do limite de especificação, demonstrando conformidade com a legislação vigente.

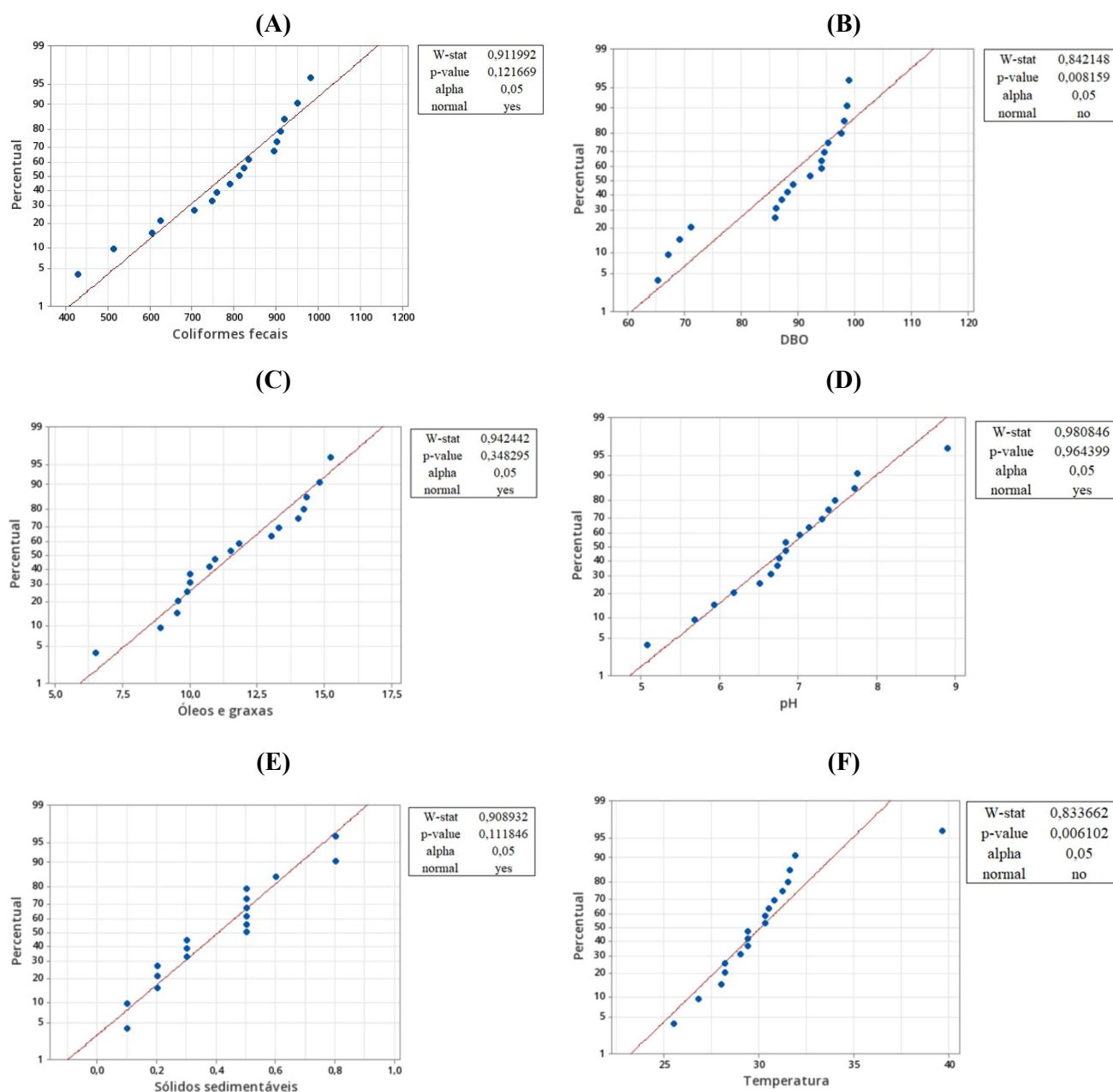
Por fim, a Figura 20 (H) demonstra que os valores de óleos vegetais e gordura animal permanecem integralmente dentro dos limites de controle, sem evidências de padrões não aleatórios ou deslocamentos significativos da média. Esse comportamento indica estabilidade estatística e consistência operacional na remoção desses compostos. Adicionalmente, todos os resultados atendem aos limites de especificação estabelecidos pela legislação, confirmando a conformidade ambiental do sistema.

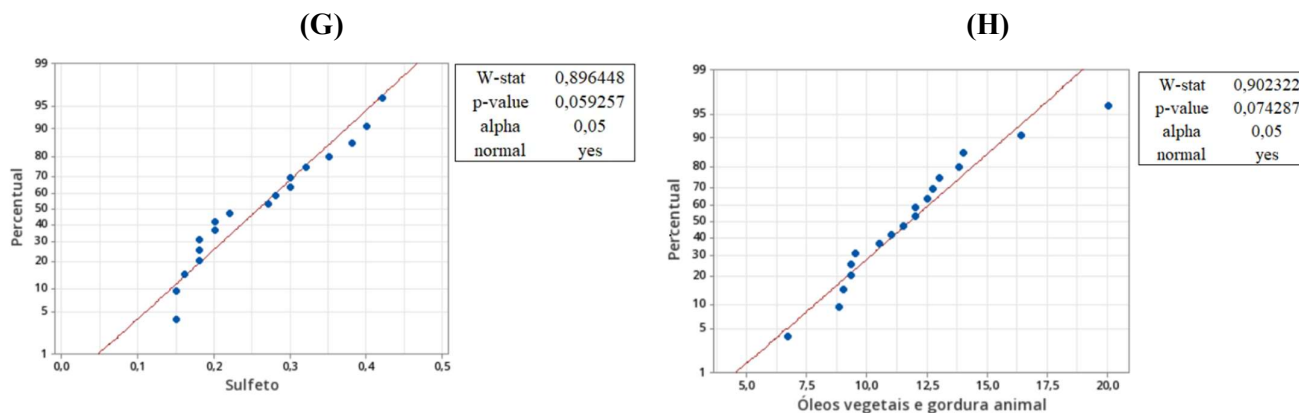
De modo geral, os resultados apresentados na Figura 20 indicam que, embora alguns parâmetros apresentem sinais de causas especiais de variação e, conseqüentemente, ausência de controle estatístico pleno, a maior parte dos valores monitorados atende aos limites de especificação estabelecidos pela legislação ambiental, Resolução CONAMA N° 430/11. Esse cenário demonstra que a estação de tratamento possui desempenho satisfatório e capacidade de absorver variações operacionais sem comprometer significativamente a qualidade do efluente tratado. Ainda assim, a identificação de padrões não aleatórios reforça a necessidade de investigar suas possíveis causas, visando aumentar a estabilidade, a previsibilidade e a eficiência do processo.

4.3 TESTES DE NORMALIDADE

Após a análise dos gráficos de controle, procedeu-se à realização dos testes de normalidade. A Figura 21 apresenta as curvas de distribuição acumulada dos parâmetros avaliados com base nos gráficos de controle.

Figura 21 – Gráficos representando a distribuição acumulada dos parâmetros analisados: (A) Coliformes fecais; (B) DBO; (C) Óleos e graxas; (D) pH; (E) Sólidos sedimentáveis; (F) Temperatura; (G) Sulfeto; (H) Óleos vegetais e gordura animal.





Fonte: Elaboração própria (2026).

De modo geral, observa-se que 75% dos conjuntos de dados apresentaram p-value superior a 0,05, indicando que a maioria dos parâmetros analisados segue uma distribuição normal. A Figura 21 evidencia que os dados de DBO (B) e Temperatura (F) não se ajustam satisfatoriamente à reta de referência em vermelho, representativa da distribuição normal teórica. Tal desvio de normalidade pode ser atribuído à influência de causas especiais, previamente identificadas por meio dos gráficos de controle.

No que se refere aos parâmetros coliformes fecais (A), óleos e graxas (C), pH (D), sólidos sedimentáveis (E), sulfeto (G) e óleos vegetais e gordura animal (H), observa-se que, apesar da presença de anomalias no processo, os dados apresentaram bom ajuste à distribuição normal. Com base nos resultados obtidos nos testes de normalidade, procedeu-se ao cálculo dos índices de capacidade, a fim de possibilitar uma avaliação mais aprofundada do desempenho do processo.

4.4 CAPACIDADE DO PROCESSO

Para os parâmetros que apresentam apenas um limite de especificação, seja inferior ou superior, a determinação do índice de capacidade potencial (C_p) não pôde ser realizada, uma vez que esse índice requer a existência simultânea dos limites inferior (LIE) e superior (LSE). Entre os parâmetros avaliados neste estudo, apenas o pH possui ambos os limites definidos, possibilitando o cálculo do C_p .

Da mesma forma, a ausência de um dos limites de especificação influenciou a determinação dos índices de capacidade do processo, tornando possível apenas o cálculo do índice de capacidade inferior (C_{pi}) ou do índice de capacidade superior (C_{ps}), conforme o caso, sendo estes utilizados para a obtenção do C_{pk} .

Dessa forma, embora a classificação da capacidade do processo seja tradicionalmente baseada no índice Cp, neste estudo, para os parâmetros com limites unilaterais, a classificação foi realizada com base no índice Cpk, adotando-se os mesmos critérios apresentados na Tabela 9. Embora esses indicadores sejam tradicionalmente aplicados a processos cujos dados apresentam distribuição normal, os resultados obtidos e apresentados na Tabela 15 demonstram que sua utilização foi adequada para a avaliação dos parâmetros analisados neste trabalho.

Tabela 15 – Índices de capacidade do processo analisado.

Parâmetros	Cp	Cpk	Cpi	Cps
Coliformes fecais (<i>NPM 100/mL</i>)	-	0,72	-	0,72
DBO (%)	-	1,67	1,67	-
Óleos e graxas (<i>mg/L</i>)	-	17,0	-	17,0
pH	0,82	0,82	0,82	0,82
Sólidos sedimentáveis (<i>mg/L</i>)	-	1,053	-	1,053
Temperatura (°C)	-	1,23	-	1,23
Sulfeto (<i>mg/L</i>)	-	4,85	-	4,85
Óleos vegetais e gordura animal (<i>mg/L</i>)	-	8,154	-	8,154

Fonte: Elaboração própria (2026).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 15, observa-se o desempenho dos principais parâmetros de qualidade analisados por meio dos índices de capacidade do processo (Cp, Cpk, Cpi e Cps). A classificação foi realizada com base nos critérios apresentados na Tabela 6.

Observa-se que o comportamento do processo não é homogêneo entre os parâmetros analisados, evidenciando diferenças importantes na capacidade do sistema ao longo das variáveis monitoradas. Embora alguns parâmetros apresentem índices de capacidade elevados, outros demonstram limitações significativas, refletindo a presença de variabilidade e possível ausência de controle estatístico adequado.

Os parâmetros DBO, óleos e graxas, sulfeto e óleos vegetais e gordura animal apresentaram valores de Cpk superiores a 1,33, sendo considerados capazes conforme a classificação adotada. Em especial, os elevados valores observados para óleos e graxas e óleos vegetais e gordura animal indicam que esses parâmetros operam com ampla margem em relação aos limites de especificação, sugerindo baixa variabilidade e bom desempenho operacional nesses aspectos.

Por outro lado, o parâmetro coliformes fecais apresentou Cpk de 0,72, classificando o processo como incapaz. Esse resultado indica que a variabilidade associada a esse parâmetro é elevada, comprometendo a capacidade do sistema em atender consistentemente aos limites estabelecidos. Situação semelhante é observada para o pH, cujo valor de Cpk inferior a 1,00 também indica incapacidade do processo, sugerindo necessidade de maior controle operacional.

Os parâmetros sólidos sedimentáveis (Cpk = 1,053) e temperatura (Cpk = 1,23) apresentaram desempenho intermediário, sendo classificados como razoavelmente capazes. Esses resultados indicam que o processo se encontra próximo de condições adequadas de operação para essas variáveis, porém ainda sujeito a oscilações que podem ser reduzidas.

A diferença observada entre os parâmetros pode estar associada, principalmente, à variabilidade da composição do efluente gerado na unidade industrial, característica inerente aos sistemas de tratamento. Embora classificado como doméstico, sua carga poluente sofre influência direta das atividades desenvolvidas na empresa, como variações no número de colaboradores, uso de sanitários e o refeitório, além de práticas de limpeza e higienização ao longo do tempo. Essa variabilidade tende a impactar de forma mais significativa parâmetros microbiológicos, como os coliformes fecais, justificando o menor desempenho observado.

Além disso, fatores operacionais também podem ter contribuído para os resultados obtidos, como variações nas condições de operação dos reatores anaeróbio e aeróbio e eventuais limitações na padronização dos procedimentos operacionais. Esses aspectos influenciam diretamente a estabilidade do processo, refletindo nos índices de capacidade calculados.

Outro ponto relevante refere-se à frequência de amostragem utilizada, uma vez que a adoção de coletas bimestrais pode não representar adequadamente a dinâmica de um sistema contínuo, como o tratamento de efluentes. Dessa forma, oscilações importantes podem não ser captadas entre os períodos de amostragem, dificultando a identificação de causas especiais e a implementação de ações corretivas em tempo adequado.

Dessa maneira, os resultados indicam que, embora o sistema apresente bom desempenho para determinados parâmetros, ainda existem limitações relacionadas à variabilidade e ao controle do processo, especialmente para variáveis mais sensíveis. Isso evidencia a necessidade de aprimoramento no monitoramento e no controle operacional, visando maior estabilidade e confiabilidade do sistema como um todo.

5 CONCLUSÕES

A partir da análise dos parâmetros de monitoramento da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), foi possível avaliar a eficiência do sistema composto por reator anaeróbio seguido de tratamento aeróbio no tratamento de efluente doméstico gerado em ambiente industrial. De modo geral, o sistema apresentou desempenho satisfatório, garantindo a remoção adequada dos poluentes e o atendimento à legislação ambiental vigente.

Nesse contexto, evidenciou-se a importância da aplicação do Controle Estatístico de Processos (CEP) como ferramenta de gestão operacional. Essa abordagem permitiu identificar padrões de variação e avaliar, com maior precisão, a estabilidade e a capacidade do processo, contribuindo para o aprimoramento da qualidade do tratamento e para o atendimento aos padrões exigidos pela legislação.

A escolha dos gráficos de controle para valores individuais mostrou-se adequada em função da periodicidade das análises, possibilitando a identificação de padrões de não aleatoriedade, como sequências e mudanças na média do processo. Esses comportamentos indicam a presença de causas especiais, as quais, além de fatores operacionais como variações nas condições de operação dos reatores e possíveis falhas humanas, estão fortemente associadas à variabilidade do efluente gerado na unidade industrial, influenciada pelas atividades internas, como uso de sanitários, refeitório e práticas de limpeza.

Os testes de normalidade indicaram que nem todos os parâmetros apresentaram comportamento conforme a distribuição normal, evidenciando a influência dessas causas especiais. Ainda assim, a análise da capacidade do processo demonstrou resultados distintos entre os parâmetros: alguns apresentaram desempenho satisfatório, sendo classificados como capazes, enquanto outros foram considerados razoavelmente capazes. Destaca-se o parâmetro de coliformes fecais, que foi classificado como incapaz, indicando elevada variabilidade e menor confiabilidade no atendimento contínuo aos limites estabelecidos.

De modo geral, a maioria dos parâmetros avaliados apresentou conformidade com os limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente, em especial os definidos pelo CONAMA, evidenciando que o sistema atende aos requisitos legais. No entanto, as não conformidades observadas, ainda que pontuais, indicam fragilidades operacionais e a necessidade de aprimoramento no controle do processo.

Por fim, ressalta-se que este estudo representa um passo inicial para a implementação de uma gestão mais robusta do sistema de tratamento. A adoção de medidas como o aumento da frequência de monitoramento, a padronização dos procedimentos operacionais, o

alinhamento técnico com a empresa terceirizada responsável pela manutenção e a análise sistemática das causas de não aleatoriedade são fundamentais para reduzir a variabilidade do processo, promover maior estabilidade operacional e elevar o desempenho global da estação de tratamento.

6 PERSPECTIVAS

O presente trabalho tem como perspectivas:

- ✓ Ampliar o período de monitoramento da ETE, permitindo a obtenção de uma base de dados mais representativa para análises estatísticas.
- ✓ Investigar as causas associadas à elevada variabilidade dos parâmetros coliformes fecais e pH, visando aumentar a capacidade e a estabilidade do processo.
- ✓ Implementar rotinas de Controle Estatístico de Processo (CEP) na operação da ETE, auxiliando na tomada de decisões e na melhoria contínua do sistema.
- ✓ Estudar a viabilidade da implantação de tecnologias complementares que possibilitem o reuso da água tratada, visando aumentar a eficiência operacional da ETE e promover o uso sustentável dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ÁGUA E EFLUENTES. Matéria orgânica no esgoto. *Água e Efluentes*, 6 nov. 2020. Disponível em: <https://www.aguaeefluentes.com.br/post/mat%C3%A9ria-org%C3%A2nica-no-esgoto>. Acesso em: 17 nov. 2024.

ALPHENZ. Tratamento de efluentes e reúso da água no meio agrícola. *Alphenz*, 2023. Disponível em: <https://www.alphenz.com.br/noticias/tratamento-de-efluentes-e-reuso-da-agua-no-meio-agricola>. Acesso em: 17 nov. 2024.

ALVES, M. **Qualidade físico-química de efluentes domésticos e de piscicultura da cidade de Pentecoste, Ceará**. Monografia (Graduação em Engenharia de Pesca) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Fortaleza, CE, 2010.

ALVES, V. P. Remoção de sulfeto em uma estação de tratamento de efluentes de níquel por oxidação úmida. 2006. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

AMAZONAS. **Decreto nº 28.678, de 16 de junho de 2009**. Regulamenta a Lei nº 3.167, de 27 de agosto de 2007, que reformula as normas disciplinadoras da Política Estadual de Recursos Hídricos e do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Manaus, AM: Diário Oficial do Estado do Amazonas [2009].

ANA. Informe anual. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023**. [Brasília, DF]: ANA, 2024. Disponível em: [conjunturainforme2023.pdf](#). Acesso em: 24 out 2024.

ARAÚJO, K. S. de. ANTONELLI, R. GAYDECZKA, B. GRANATO, A. C. MALPASS, G. R. P. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. **Revista Ambiente & Água**, 11(2), 387–401. 2016. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1862>. Disponível em: <https://www.scielo.br/2016>. Acesso em: 12 out. 2024.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO PIAUÍ. Índice de esgotos tratados no Nordeste é de apenas 30,2%. *Assembleia Legislativa do Piauí*, 2023. Disponível em:

<https://www.al.pi.leg.br/tv/noticias-tv-1/indice-de-esgotos-tratados-no-nordeste-e-de- apenas-30-2>. Acesso em: 16 set. 2024.

BRASIL. **Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do ART. 21 da Constituição Federal, e altera o ART. 1º da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União. Brasília, DF, n. 6, p. 470, 09 jan., 1997. Seção 1.

BRASIL. Manaus. **Lei n.º 1760, de 19 de maio de 2018**. Regulamenta a atividade de serviço público de abastecimento de água e esgotamento sanitário no município de Manaus. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=176060>. Acesso em: 30 nov. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2006. 212 p. (Série B. Textos Básicos de Saúde).

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Diagnóstico temático: serviços de água e esgoto: visão geral: ano de referência 2022**. Brasília, DF: SNSA, 2023.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Processos de tratamento de esgotos: guia do profissional em treinamento – nível 1**. Brasília: Ministério das Cidades, 2008. 72 p.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de Maio de 2011**. Dispões sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução Nº 357, de 17 de Março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Publicado no DOU, n. 92, p. 89, 15 de maio de 2011.

BRITO, Z. S. de. **Identificação dos sólidos flutuantes dos efluentes da cidade de Pombal-PB**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2015.

CAIXA FORTE. **ETE Biológica: o que é, como funciona e sua importância ambiental.** Caixa Forte, 2024. Disponível em: <https://caixaforte.ind.br/blog/ete-biologica-o-que-e-como-funciona-e-sua-importancia-ambiental>. Acesso em: 19 nov. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Fundamentos do controle de poluição das águas.** Coordenação: Carlos Roberto dos Santos, Lina Maria Aché e Tânia Mara Tavares Gasi. São Paulo: CETESB, jul. 2018.

COELHO, I. **O impacto ambiental do sabão e do detergente.** *Boomi*, 10 abr. 2023. Disponível em: <https://boomi.com.br/o-impacto-ambiental-do-sabao-e-do-detergente>. Acesso em: 17 nov. 2024.

COELHO, L. **Gestão de efluentes e emissões.** Brasil, Editora Senac São Paulo, 2020.

CONTE, V. D. COLOMBO, M. ZANROSSO, A. V. SALVADOR, M. **Qualidade microbiológica de águas tratadas e não tratadas na região Nordeste do Rio Grande do Sul.** *Infarma*, v. 16, n. 11-12, p. 83-84, 2004.

COSTA, A. F. B. EPPRECHT, E. K. CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade.** São Paulo: Atlas, 2004. 334 p.

COSTA, E. D. J. SANTOS, E. N. F. MELO, C. M. T. Utilização de resinas de troca iônica para redução de sólidos totais e turbidez. **Revista Inova Ciência & Tecnologia/Innovative Science & Technology Journal**, v. 8, p. e0221156, 2022. DOI: 10.46921/rict2022-1156. Disponível em: <https://periodicos.iftm.edu.br/index.php/inova/article/view/1156>. Acesso em: 20 nov. 2024.

COUTINHO, T. O que é capacidade do processo? Aprenda a analisar. *Voitto*, 27 nov. 2020. Disponível em: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/capabilidade-do-processo>. Acesso em: 28 nov. 2024.

DEGANI, V. A importância do reúso e tratamento de efluentes para a proteção do meio ambiente. Degani Vaduz, 24 ago. 2021. Disponível em: <https://www.deganivaduz.com.br/a-importancia-do-reuso-e-tratamento-de-efluentes-para-a-protecao-do-meio-ambiente/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

DINÂMICA AMBIENTAL. Tecnologias Inovadoras Revolucionam o Tratamento de Efluentes Industriais. *Dinâmica Ambiental*, 2024. Disponível em: <https://dinamicambiental.com.br/blog/meio-ambiente/tecnologias-inovadoras-revolucionam-o-tratamento-de-efluentes-industriais/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

ECOSCIENCES. Tratamento de efluentes domésticos. *Ecosciences*, 2024. Disponível em: <https://ecosciences.com.br/tratamento-de-efluentes-domesticos/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

EOS SYSTEMS. Qual será o futuro da água no mundo. *Eos Systems*, 2024. Disponível em: <https://www.eossystems.com.br/futuro-da-agua/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

FREIRE, R. S. PELEGRINI, R. KUBOTA, L. T. DURÁN, N. Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 504–511, 2000. DOI: 10.1590/S0100-40422000000400013. Disponível em: <https://www.scielo.br/2000>. Acesso em: 16 out. 2024.

FUGITA, S. R. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Fundamentos do controle de poluição das águas**. São Paulo: CETESB, 2018.

FUSATI. **Consumo de água e a sustentabilidade em tempos atuais**. *Fusati*, 2023. Disponível em: <https://www.fusati.com.br/consumo-de-agua-e-a-sustentabilidade-em-tempos-atuais/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

HACH. Nitrato e Nitrito. *HACH*, 2024. Disponível em: <https://pt.hach.com/parameters/nitrate>. Acesso em: 23 nov. 2024.

HANUSZ, Z. TARASINSKA, J. ZIELINSKI, W. Shapiro–Wilk test with known mean. *REVSTAT-Statistical Journal*, v. 14, n. 1, p. 89–100, 2016.

HENNING, E. WALTER, O. M. C. F. SOUZA, N. S. de. SAMOBYL, R. W. Um estudo para a aplicação de gráficos de controle estatístico de processo em indicadores de qualidade de água potável. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, v.9, p 2 - 13, 2014.

ILHA AMBIENTAL. Efluentes industriais: quais os principais tipos? *Ilha Ambiental*, 15 mar. 2022. Disponível em: <https://www.ilhaambiental.com.br/efluentes-industriais-quais-os-principais-tipos/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

INDÚSTRIA DO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS. *Projeto de aprovação da estação compacta de tratamento de esgoto: unidade Manaus*. Manaus, fev. 2015. Documento interno não publicado.

INSTITUTO TRATA BRASIL. 355 anos de Manaus: panorama do saneamento básico. *Trata Brasil*, 24 out. 2024. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/355-anos-manaus-panorama-do-saneamento-basico/>. Acesso em: 22 nov. 2024.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Três estados do Norte têm os piores índices de coleta e tratamento de esgoto do país. *Trata Brasil*, 2024. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/tres-estados-do-norte-tem-os-piores-indices-de-coleta-e-tratamento-de-esgoto-do-pais/>. Acesso em: 23 nov. 2024.

JORDÃO, E. P. PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3.ed., Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária – ABES, 1995.

JORDÃO, E. P. PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6 ed. Rio de Janeiro, 1050p. 2011.

JÚNIOR, M. A. F. da C. LIMA, S. F. V. dos S. **Tratamento de Esgoto**. Escola de Governo do RN. ACS CAERN, 2014. Disponível em: <http://www.escoladegoverno.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=12037&ACT=null&PAGE=null&PARM=null&LBL=NOT%C3%83+CIA>. Acesso em: 19 nov. 2024.

KASVI. **Sistemas de filtração**. *Kasvi*, 2024. Disponível em: <https://kasvi.com.br/sistemas-filtracao>. Acesso em: 20 nov. 2024.

KENT, R. **Quality management in plastics processing: strategies, targets, techniques and tools**. Amsterdam: Elsevier, 2016.

LIMA, A. K. S. de. RODRIGUES, J. R. SOUZA, I. da S. de. RODRIGUES, J. C. SOUZA, T. C. de. MAIA, C. R. FERNANDES, O. C. C. (2017). Fungos isolados da água de consumo de uma comunidade ribeirinha do médio Rio Solimões, Amazonas-Brasil: potencial patogênico. **Revista Ambiente & Água**, 12(6), 1017–1024. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2018>. Disponível em: <https://www.scielo.br/2017>. Acesso em: 15 out. 2024.

LOPES, M. de M. BRANCO, V. T. F. C. SOARES, J. B. (2013). Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. **Transportes**, 21(1), 59–66. DOI: <https://doi.org/10.4237/transportes.v21i1.566>. Disponível em: <https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/566>. Acesso em: 20 nov. 2024.

LUZ, T. G. da. **Controle estatístico de processo (CEP) aplicado na avaliação de uma estação de tratamento de efluentes**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2020.

MARCONDES, J. G. **Tratamento de efluentes**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis, Fundação Educacional do Município de Assis, Assis, 2012.

MARINHO, I. Q. Tratamento de efluentes da indústria alimentícia. 2017. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MARQUES, F. **Conheça as etapas do processo de tratamento de efluentes**. *Acquablog*, 2024. Disponível em: <https://acquablog.acquasolution.com/etapas-do-processo-de-tratamento-de-efluentes>. Acesso em: 19 nov. 2024.

MARTINS, A. B. de C. ROCHA, J. P. SANTANA, C. G. de. Análise dos impactos causados pelo lançamento de efluentes domésticos não tratados e sua relação com a capacidade de autodepuração de um corpo hídrico. **Revista do CEDS**, v. 9, n. 9, ago./dez. 2018. Disponível em: http://sou.undb.edu.br/ceds/revista?utm_source=direto. Acesso em: 17 nov. 2024.

MARTINS, C. Conheça os níveis de tratamento de esgoto para uma melhor gestão do seu efluente. *Trilho Ambiental*, 8 fev. 2021. Disponível em: <https://www.trilhoambiental.org/post/conheca-os-niveis-de-tratamento-de-esgoto-para-uma-melhor-gestao-do-seu-efluente>. Acesso em: 19 nov. 2024.

MEYER, S. T. **O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública**. Cad. Saúde Públ., Rio de Janeiro, 10 (1): 99-110, Jan/Mar, 1994.

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

MONTGOMERY, D. C. **Estatística Aplicada e Controle de Qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied statistics and probability for engineers*. Hoboken, Nj Wiley, 2018.

MORAIS, J. L. **Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados, isolados e integrados com processos biológicos tradicionais, para tratamento de chorume de aterro sanitário**. Curitiba, 2005. 229 f. Tese (Doutorado em Química) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MULTIÁGUA. Os tipos de efluentes industriais e os danos que eles causam. *Multiágua*, 2024. Disponível em: <https://multiagua.com.br/os-tipo-de-efluentes-industriais-e-os-danos-que-eles-causam>. Acesso em: 17 nov. 2024.

NASCIMENTO, V. A. do. SANTANA, M. das V. FREITAS, W. A. SILVA, H. de J. B. da. SILVA, H. D. de A. DOURADO, J. B. de O. L. OLIVEIRA, B. L. M de. **Estudo sobre a remoção de metais pesados em efluentes**. Teresina, PI: Universidade Federal do Piauí, Centro de Tecnologia; Caxias, MA: Faculdade do Vale do Itapecuru, 2019.

NELSON, L. S. Interpretando as Cartas de Controle Shewhart $\bar{X}$. **Jornal de Tecnologia da Qualidade**, 17(2), 114–116. 1985.

OLIVEIRA, S. S. **Remoção microbiológica de nitrogênio, fósforo, DQO e DBO em uma estação de tratamento de efluentes numa fábrica de concentrados de bebidas**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.

PALADINI, E. P. **Gestão da Qualidade: Teoria e Prática**. 4^a ed, 2019.

PENHA, E. das M. SOUZA, A. M. de; SANTIAGO, M. C. P. de A. CENDON, B. R. SILVA, R. R. de B. **Manual de operação e manutenção da estação de tratamento de efluentes da Embrapa Agroindústria de Alimentos**. Rio de Janeiro: Embrapa Agroindústria de Alimentos, 2010. 24 p. (Documentos, ISSN 1516-8247; 106).

PEREIRA, J. T. S. **Estudo da eficiência de lodos ativados no tratamento de efluentes de uma indústria de bebidas**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2019.

PROMATEC AMBIENTAL. Sólidos sedimentáveis. *Promatec Ambiental*, 2024. Disponível em: <https://www.promatecambiental.com.br/ensaios-acreditados-3/solidos-sedimentaveis/>. Acesso em: 22 nov. 2024.

RASÕES, M. A. A. **Estudo sobre a Precipitação Química de Fósforo como forma de Remediação do Estado Trófico da Lagoa das Furnas, S. Miguel – Açores**. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente. Lisboa, 2008.

REISMANN, H. VIEIRA, B. RODRIGUES, T. M. Remoção de nitrogênio e fósforo de efluentes. *Tratamento de Água*, 6 out. 2021. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/remocao-nitrogenio-fosforo-efluentes>. Acesso em: 5 nov. 2024.

REVIVA AMBIENTAL. Níveis de tratamento de esgoto: preliminar, primário, secundário e terciário. *Reviva Ambiental*, 2024. Disponível em: <https://revivaambiental.com/niveis-de-tratamento-de-esgoto-preliminar-primario-secundario-e-terciario>. Acesso em: 19 nov. 2024.

ROSAL, C. Análise de metais pesados na água. *Microambiental*, 13 mar. 2024. Disponível em: <https://microambiental.com.br/analises-de-agua/analise-de-metais-pesados-na-agua/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

ROSOLEN, V. HERPIN, U. Qualidade ambiental e saúde pública: um estudo de caso de poluição do solo com esgoto doméstico. *Geografia, Rio Claro*, v. 34, n. 2, p. 299-306, mai.-ago. 2009.

SALUTA SANEAMENTO. O tratamento terciário de água. *Saluta*, 2024. Disponível em: <https://saluta.com.br/o-tratamento-terciario-de-agua/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SANESUL. Importância do tratamento de esgoto. *Saneamento Básico de Mato Grosso do Sul*, 2024. Disponível em: <https://www.sanesul.ms.gov.br/importancia-do-tratamento-de-esgoto>. Acesso em: 18 nov. 2024.

SANT'ANNA JUNIOR., G. L. Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000200002>. Disponível: <https://www.scielo.br/2013>. Acesso em: 24 set. 2024.

SCABIN, D. AGUIRRE, C. Prateleira ambiental - Água. São Paulo: *Secretaria do Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística*, 2023. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/agua/>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SCHORR, A. de. Tratamento de águas e efluentes. Brasil, Freitas Bastos, 2022.

SILVA, A. I. G. da. Engenharias. Volume 28, Edição 135, jun. 2024. Publicado em: 26 jun. 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/impactos-causados-pelos-lancamentos-de-efluentes-em-corpos-hidricos/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

SILVA, B. M. T. Avaliação da eficiência de uma estação de tratamento de efluentes de esgotamento sanitário utilizando o controle estatístico de processos. Recife, 2023. 56 p.: il., tab.

SILVA, D. de O. CARVALHO, A. R. P. Tratamento de efluentes. *Kurita do Brasil*, 2023. Disponível em: <https://kurita.com.br/artigos-tecnicos/tratamento-de-efluentes/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

SOUZA FILHO, A. **Tratamento terciário de efluente de uma indústria de refrigerantes visando ao reuso – um estudo de caso**. 2009. xi, 100 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2009. Orientadoras: Magali Christe Cammarota e Alcina Maria Fonseca Xavier.

SOUZA FILHO, E. A. ALVES, S. B. M. Análise das condições de esgotamento sanitário na cidade de Manaus-Amazonas. *Geofronter*, Campo Grande, v. 8, p. 1-21, 2022. Disponível em: <http://periodicosonline.uems.br/index.php/GEOF/index>. Acesso em: 22 nov. 2024.

SOUZA, G. A. Aplicação de gráficos de controle estatístico de processo para avaliação de desempenho de estações de tratamento de água. 2018. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1270M.PDF>. Acesso em: 28 nov 2024.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington, DC: American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environment Federation (WEF), 2017.

SUPERBAC. DBO e DQO: entenda como é possível fazer a redução de carga orgânica. *Superbac*, 9 jun. 2022. Disponível em: <https://www.superbac.com.br/blog/dbo-e-dqo-entenda-como-e-possivel-fazer-a-reducao-de-carga-organica/>. Acesso em: 18 nov. 2024.

SUPERBAC. Efluentes Industriais: Impactos Ambientais. *Superbac*, 2022. Disponível em: (<https://www.superbac.com.br/blog/efluentes-industriais-impactos-ambientais/>). Acesso em: 17 nov. 2024.

TEGA ENGENHARIA. Como funciona uma estação de tratamento de esgoto. *Tega Engenharia*, 22 abr. 2024. Disponível em: <https://tegaengenharia.com.br/artigos/funciona-estacao-tratamento-de-esgoto>. Acesso em: 19 nov. 2024.

TELLES, D. D. COSTA, R. H. P. G. Reúso da água: Conceitos, Teorias e Práticas. 1º edição, São Paulo, Brasil: Editora Blucher, 2007.

TERA AMBIENTAL. Conheça os danos causados pelos efluentes não tratados. *Tera Ambiental*, 22 jul. 2021. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/bid/350779/conheca-os-danos-causados-pelos-efluentes-nao-tratados>. Acesso em: 17 nov. 2024.

TERA AMBIENTAL. Saiba a diferença entre esgoto sanitário e efluente industrial. *Tera Ambiental*, 23 nov. 2016. Disponível em: <<https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/bid/314718/saiba-a-diferen-a-entre-esgoto-sanit-rio-e-efluente-industrial>>. Acesso em: 17 nov. 2024.

TERA AMBIENTAL. Tratamento biológico aeróbio e anaeróbio de efluentes. *Tera Ambiental*, 2024. Disponível em: <<https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/tratamento-biologico-aerobio-e-anaerobio-de-efluentes>>. Acesso em: 13 set. 2024.

TCHOBANOGLUS, G.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F.; ABU-ORF, M.; BOWDEN, G.; PFRANG, W. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5. ed. Brasil: McGraw Hill Brasil, 2015.

TODELO, J. C.; BORRÁS, M, A, A.; MERGULHÃO, R, C.; MENDES, G, H, S. *Qualidade: Gestão e Métodos*. 1ª ed, 2012.

TONETTI, A. L. BRASIL, A. L. MADRID, F. J. P. L. FIGUEIREDO, I. C. S. SCHNEIDER, J. CRUZ, L. M. O. DUARTE, N. C. FERNANDES, P. M. COASACA, R. L. GARCIA, R. S. MAGALHÃES, T. M. *Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas referencial para a escolha de soluções*. Campinas, São Paulo: Biblioteca UNICAMP, p. 51, 2018.

TOSETTO, M. de S. *Tratamento terciário de esgoto sanitário para fins de reúso urbano*. 2005. 228 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. Orientadores: Ricardo de Lima Isaac, Regina Maura Bueno Franco. 2005

TRADENER. A importância da água na geração de energia elétrica. *Tradener*, 22 mar. 2022. Disponível em: <https://tradener.com.br/2022/03/22/%EF%BF%BC%EF%BF%BCa-importancia-da-agua-na-geracao-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 13 nov. 2024.

TRATAMENTO DE ÁGUA. Tratamento biológico de efluentes. *Tratamento de Água*, 29 jun. 2020. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/tratamento-biologico-efluentes/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

TRATAMENTO DE ÁGUA. Tratamento de efluentes nas indústrias farmacêuticas e a legislação ambiental. *Tratamento de Água*, 2022. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/tratamento-efluentes-industrias-farmaceuticas-legislacao-ambiental/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

VARELA, U. KARLA, J. Pesquisadores se voltam para questões relacionadas ao uso sustentável da água. *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM)*, 25 abr. 2013. Disponível em: <https://www.fapeam.am.gov.br/pesquisadores-se-voltam-para-questoes-relacionadas-ao-uso-sustentavel-da-agua/>. Acesso em: 22 nov. 2024.

VASCONCELOS, R. C. *Tratamento de Efluentes Líquidos: Uma perspectiva para o desenvolvimento sustentável*. Campina Grade: Editora Ampla, p. 8, 2020.

VILAR, D. A importância da água para as plantas. *AgricOnline*, 21 abr. 2021. Disponível em: <https://agronline.com.br/portal/artigo/a-importancia-da-agua-para-as-plantas/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

VON SPERLING, M. Lodos ativados. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

ZAMORA, P. P. ESPOSITO, E. REYES, J. DURÁN, N. Remediação de efluentes derivados da indústria de papel e celulose. Tratamento biológico e foto catalítico. **Química Nova**, Campinas: v.20, n.2, 1997.