

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO, SAZONALIDADE E  
CONFIABILIDADE DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE  
ESGOTO SOBRADINHO NO DISTRITO FEDERAL**

**RAFAEL MONTEIRO DE LIMA**

**ORIENTADOR(A): ARIUSKA KARLA BARBOSA AMORIM**

**CO-ORIENTADOR(A): SÍLVIA MARIA ALVES CORRÊA  
OLIVEIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E  
RECURSOS HÍDRICOS**

**BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2024  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO, SAZONALIDADE E  
CONFIABILIDADE DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO  
SOBRADINHO NO DISTRITO FEDERAL**

**RAFAEL MONTEIRO DE LIMA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E  
RECURSOS HÍDRICOS.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof<sup>ª</sup> Ariuska Karla Barbosa Amorim, DSc (UnB)  
(Orientadora)**

---

**Prof<sup>ª</sup> Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira, DSc (UFMG)  
(Co-orientadora)**

---

**Prof<sup>ª</sup> Yovanka Pérez Ginoris, DSc (UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof<sup>ª</sup> Carolina Cristiane Pinto, DSc (UFTM)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, JUNHO DE 2024**

## FICHA CATALOGRÁFICA

LIMA, RAFAEL MONTEIRO DE

Avaliação de desempenho, sazonalidade e confiabilidade da estação de tratamento de esgoto Sobradinho no Distrito Federal. [Distrito Federal] 2024.

xiv, 110p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2024).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. ETE Sobradinho

2. Lodos Ativados

3. Desempenho

4. Confiabilidade

I. ENC/FT/UnB

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LIMA, R. M. (2024). Avaliação de desempenho, sazonalidade e confiabilidade da estação de tratamento de esgoto Sobradinho no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 110p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rafael Monteiro de Lima.

TÍTULO: Avaliação de desempenho, sazonalidade e confiabilidade da estação de tratamento de esgoto Sobradinho no Distrito Federal.

GRAU: Mestre

ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Rafael Monteiro de Lima

Chácara 41, Rua 3, Vicente Pires.

72.005-645 – Brasília/DF - Brasil.

## RESUMO

O objetivo do presente estudo foi a avaliação estatística do desempenho, confiabilidade e sazonalidade da ETE Sobradinho, localizada no Distrito Federal e operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. O estudo consistiu no tratamento estatístico dos dados de monitoramento de janeiro de 2017 até outubro de 2023, englobando os períodos anterior (AR), durante (R) e depois da reforma emergencial (DR) para reparo de seu principal reator biológico aerado. Destacando-se a realização de estatísticas descritivas, diagramas de caixa, comparações por testes de Mann-Whitney e Kruskal-Wallis, além da avaliação da conformidade e análise de confiabilidade em relação a diferentes padrões de lançamento.

Os resultados indicam que o esgoto afluente à ETE Sobradinho é mais concentrado do que o típico, enquanto o efluente teve concentrações de DBO, DQO e SS dentro ou próximas das faixas indicadas como típicas pela literatura para sistemas de lodos ativados convencional.

Observou-se uma redução das eficiências de remoção de DBO, DQO e SS no período R, devido a alteração emergencial do sistema de tratamento, seguido de uma melhora no período DR. Os resultados ressaltam o impacto positivo das modificações realizadas na reforma sobre o controle operacional e, conseqüentemente, sobre a eficiência da ETE, saindo de uma mediana de remoção de DBO de 91% no período AR para 96,5% no período DR, de 82% para 92% no caso da DQO e de 82% para 95,7% no caso de SS.

A ETE apresentou interferências do período sazonal, sendo as vazões nos períodos de chuvas superiores às dos períodos de seca e, em geral, o esgoto afluente e efluente mais concentrado no período de seca em relação a todos os parâmetros. Contudo, a ETE conseguiu manter as eficiências de remoção, apresentando diferenças sazonais apenas para DQO no momento AR, SS no momento DR e PT nos momentos R e DR.

A ETE teve uma redução de mais de 60% do percentual de atendimento à outorga em relação à DBO do período AR para o período R, seguida de uma melhora no período DR alcançando uma conformidade de 99%. No período DR a ETE teve percentuais de conformidade de DQO e SS acima de 95% em relação a todos os padrões de lançamento avaliados, atendendo normativas rigorosas nesses parâmetros, como a da União Europeia.

A análise de confiabilidade indicou elevados percentuais de atendimento futuro aos padrões de lançamento avaliados. Contudo, para o atendimento em 95% do tempo são necessárias eficiências próximas aos limites máximos de eficiência tipicamente encontrados em sistemas de lodos ativados de taxa convencional.

## **ABSTRACT**

The objective of the present study was the statistical evaluation of performance, reliability, and seasonality of the Sobradinho Sewage Treatment Plant (STP), located in the Federal District and operated by the Environmental Sanitation Company of the Federal District. The study involved statistical treatment of monitoring data from January 2017 to October 2023, covering the periods before (BR), during (R) and after (AR) the emergency reform for the repair of its main aerated biological reactor. The study included descriptive statistics, box plots, Mann-Whitney and Kruskal-Wallis tests, as well as compliance assessment and reliability analysis based on different discharge standards.

The results indicate that the sewage inflow to the Sobradinho STP is more concentrated than the typical, while the effluent concentrations of BOD, COD and SS fall within or close to the ranges typically observed in conventional activated sludge systems.

During the R period, there was a reduction in removal efficiencies for BOD, COD, and SS due to the emergency treatment system alteration, followed by improvement in the post-repair period (DR). The modifications made during the reform positively impacted operational control and efficiency, resulting in median BOD removal increasing from 91% in the AR period to 96.5% in DR period, COD from 82% to 92%, and 82% to 95.7% from SS.

The STP exhibited seasonal variations, with flow rates during rainy periods exceeding those during dry periods. Generally, influent and effluent concentrations were higher during the dry season across all parameters. However, the STP maintained removal efficiencies, with seasonal differences observed only for COD in the AR period, SS in the DR period, and TP in the R and DR periods.

Regarding compliance, the STP experienced a more than 60% reduction in DBO compliance from the AR period to R period, followed by improvement in the DR period, achieving 99% compliance. In the DR period, the STP achieved compliance percentages above 95% for COD and SS across all evaluated discharge standards, achieving stringent regulations such as those set by the European Union.

Reliability analysis indicated high future compliance rates with discharge standards. However, achieving 95% compliance over time requires efficiencies close to the maximum limits typically observed in conventional activated sludge systems.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	4
2.1	Objetivo Geral .....	4
2.2	Objetivos Específicos .....	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1	Mudança da vazão e qualidade do esgoto afluente a ETEs.....	5
3.1.1	Varição do consumo de água .....	6
3.1.2	Influência das águas pluviais nas concentrações e na tratabilidade de esgotos domésticos .....	7
3.2	Legislações e regulamentações associadas ao tratamento de esgoto.....	9
3.3	Monitoramento, análises estatísticas e probabilísticas .....	13
3.3.1	Dados com valores discrepantes ao esperado ( <i>Outliers</i> ).....	14
3.3.2	Distribuições de Probabilidade.....	16
3.3.3	Testes de Hipóteses.....	18
3.4	Análise de Desempenho .....	20
3.5	Análise de confiabilidade .....	21
3.5.1	Concentração de projeto .....	22
3.5.2	Percentual de atendimento.....	23
4	Descrição da ETE de Estudo .....	24
4.1	Área de atendimento .....	25
4.2	Características climáticas da região.....	26
4.3	Histórico de Adequações e Reformas da ETE Sobradinho .....	27
4.4	Corpo Hídrico Receptor: Ribeirão Sobradinho .....	37
4.5	Justificativa do estudo de caso da ETE Sobradinho .....	39
5	METODOLOGIA.....	40
5.1	Sistema de Tratamento .....	27
5.1.1	Tratamento Preliminar .....	28
5.1.2	Tratamento Primário .....	28
5.1.3	Tratamento Primário Quimicamente Assistido (TPQA).....	30
5.1.4	Tratamento Secundário .....	31
5.1.5	Tratamento de Lodos .....	33
5.2	Avaliação e pré-processamento dos dados fornecidos pela CAESB.....	40
5.2.1	Limites de Detecção Instrumentais e Analíticos.....	40

5.2.2	Avaliação de dados inconsistentes ou atípicos ( <i>Outliers</i> ) .....	41
5.3	Estatística Descritiva e Análise de Desempenho .....	42
5.4	Avaliação da Interferência da sazonalidade e afluência de águas pluviais.....	44
5.4.1	Determinação do período de chuvas.....	44
5.4.2	Análise estatística da interferência da sazonalidade no desempenho da ETE Sobradinho.....	45
5.5	Avaliação de conformidade da ETE em relação a sua outorga e Outros Padrões de lançamento .....	46
5.6	Análise de confiabilidade da ETE .....	47
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
6.1	Avaliação e Tratamento dos dados fornecidos pela CAESB.....	48
6.1.1	Dados Fornecidos .....	48
6.1.2	Limites de Detecção Instrumentais e Analíticos.....	49
6.1.3	Avaliação de dados inconsistentes ou atípicos ( <i>Outliers</i> ) .....	50
6.2	Estatística Descritiva e Análise de Desempenho .....	51
6.2.1	Vazão .....	51
6.2.2	Concentrações de Poluentes no Esgoto Afluente .....	53
6.2.2.1	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	53
6.2.2.2	Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	55
6.2.2.3	Sólidos em Suspensão (SS) .....	57
6.2.2.4	Nitrogênio Total (NT) .....	58
6.2.2.5	Fósforo Total (PT).....	60
6.2.2.6	<i>E. Coli</i> .....	62
6.2.2.7	Comparação com outros estudos.....	64
6.2.3	Concentrações de Poluentes no Esgoto Tratado .....	65
6.2.3.1	DBO, DQO e SS.....	65
6.2.3.2	Nutrientes.....	68
6.2.3.3	<i>E. Coli</i> .....	70
6.2.3.4	Comparação com outros estudos.....	71
6.2.4	Eficiências da ETE Sobradinho.....	72
6.2.4.1	DBO, DQO e SS:.....	72
6.2.4.2	NT, PT e <i>E. Coli</i> : .....	74
6.2.4.3	Comparação com outros estudos.....	76
6.3	Avaliação da Interferência da sazonalidade e afluência de águas pluviais.....	78

6.3.1	Determinação do período de chuvas.....	78
6.3.2	Vazão .....	79
6.3.3	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) .....	81
6.3.4	Demanda Química de Oxigênio (DQO) .....	83
6.3.5	Sólidos em Suspensão (SS) .....	85
6.3.6	Nitrogênio Total (NT).....	87
6.3.7	Fósforo Total (PT) .....	89
6.3.8	<i>E. Coli</i> .....	91
6.3.9	Avaliação geral da interferência da sazonalidade e afluência de águas pluviais	93
6.4	Avaliação da conformidade da ETE em relação aos Padrões de Lançametno ....	94
6.5	Análise de confiabilidade da ETE em relação à outorga.....	99
7	Conclusões.....	103
8	Recomendações para trabalhos futuros .....	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – N° de habitantes, percentual de habitações irregulares e disposição do esgoto doméstico das RAs Sobradinho e Sobradinho II. (CODEPLAN, 2013, 2018, 2022a) .....	26
Tabela 4.2 - Histórico de condições de operação e mudanças do tratamento da ETE Sobradinho no período de 2010 a 2020 .....	36
Tabela 4.3 – Principais parâmetros de enquadramento de águas doces de classe 3 (Fonte: Resolução CONAMA nº 357 de 2005).....	38
Tabela 5.1 – Parâmetros de dimensionamento de decantadores primários (ABNT, 2011) .	29
Tabela 5.2 - Dimensões dos Decantadores Primários da ETE Sobradinho (CAESB, 2017) .....	30
Tabela 5.3 – Vantagens e desvantagens do tratamento primário quimicamente assistido em relação ao convencional. (Jordão; Pessôa, 2014). .....	31
Tabela 5.4 – Vantagens e Desvantagens do processo de lodos ativados (Jordão e Pessôa, 2014).....	32
Tabela 5.5 – Dimensões e volume do tanque pulmão (CAESB, 2017).....	32
Tabela 5.6 - Dimensões dos decantadores secundários (CAESB, 2017).....	32
Tabela 5.7 – Parâmetros de dimensionamento de sistemas de lodos ativados (ABNT, 2011) .....	33
Tabela 5.8 – Dimensões dos Digestores Anaeróbios (CAESB, 2017) .....	34
Tabela 5.9 – Principais parâmetros de dimensionamento de digestores anaeróbios (ABNT, 2011).....	34
Tabela 5.10 – Limite de detecção dos métodos de análise de esgoto conforme o parâmetro e método analítico empregado (Fonte: CAESB, 2021).....	41
Tabela 6.1 – Número de dados de cada parâmetro conforme o ponto de amostragem fornecidos individualmente (janeiro de 2017 a outubro de 2023).....	48
Tabela 6.2 – Número de dados fornecidos e esperados de cada parâmetro, conforme o ponto de amostragem, e percentual fornecido em relação ao número de dados esperado ..	49
Tabela 6.3 – Número de dados de cada parâmetro conforme o ponto de amostragem após remoção de dados inconsistentes e <i>outliers</i> (janeiro de 2017 a outubro de 2023) .....	50
Tabela 6.4 – Estatística Descritiva anuais dos dados de vazão .....	52
Tabela 6.5 – Estatísticas Descritivas anuais dos dados de DBO afluente .....	54
Tabela 6.6 - Estatísticas Descritivas anuais dos dados de DQO afluente.....	56
Tabela 6.7 - Estatísticas Descritivas anuais das concentrações de SS afluente.....	57
Tabela 6.8 - Estatísticas Descritivas anuais das concentrações de NT afluente .....	59
Tabela 6.9 - Estatísticas Descritivas anuais das concentrações de PT afluente.....	61
Tabela 6.10 - Estatísticas Descritivas anuais dos dados de <i>E. Coli</i> .....	63
Tabela 6.11 – Faixas típicas e observadas de DBO, DQO e SS em esgotos domésticos brutos .....	64
Tabela 6.12 – Estatísticas Descritivas de DBO, DQO e SS do efluente conforme o período operacional da ETE .....	66
Tabela 6.13 – Estatísticas Descritivas de NT e PT do efluente conforme o período operacional da ETE .....	69
Tabela 6.14 – Estatísticas Descritivas de <i>E. Coli</i> do efluente conforme o período operacional da ETE .....	70
Tabela 6.15 - Faixas de DBO, DQO e SS no esgoto efluente a ETE Sobradinho nos diferentes períodos avaliados em relação outros trabalhos. ....	72

Tabela 6.16 – Eficiências de remoção de DBO, DQO e SS conforme o período de operação da ETE .....	73
Tabela 6.17 – Eficiências de remoção de NT, PT e <i>E. Coli</i> conforme o período de operação .....	74
Tabela 6.18 - Faixas de eficiência de remoção da ETE Sobradinho nos diferentes períodos avaliados em relação a literatura especializada .....	76
Tabela 6.19 – Valores p dos testes de Mann-Whitney para diferença sazonal dos parâmetros de monitoramento da ETE, conforme momento operacional.....	93
Tabela 6.20 – Análise de conformidade da ETE em relação a sua outorga de lançamento, conforme período operacional.....	98
Tabela 6.21 – Análise de conformidade da ETE em relação as diretrizes de lançamento de DBO, DQO e SS da Resolução CONAMA nº 430, as diretrizes dos Estados de RS e RJ e da União Europeia no período DR .....	98
Tabela 6.22 – Resultados dos testes de aderência dos dados de DBO, DQO e SS .....	99
Tabela 6.23 – Análise de confiabilidade da ETE em relação a sua outorga de lançamento, conforme período operacional.....	100
Tabela 6.24 – Análise de confiabilidade da ETE em relação aos padrões de lançamento de DBO, DQO e SS da Resolução CONAMA nº 430, das diretrizes dos Estados de RS e RJ e da União Europeia .....	101
Tabela 6.25 – Concentração de projeto para o cumprimento das diferentes diretrizes de lançamento de efluentes durante 95% do tempo .....	102

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Localização da ETE Sobradinho e limite aproximado da sua área (CAESB, 2017).....	24
Figura 4.2 – Localização da ETE e das RAs atendidas em relação ao DF.....	25
Figura 4.3 – Bacia Hidrográfica do Ribeirão Sobradinho com indicação e delimitação das áreas de contribuição dos seus principais afluentes .....	37
Figura 5.1 – Imagem de satélite da ETE Sobradinho, com identificação das unidades.....	27
Figura 5.2 – Fluxograma ETE Sobradinho.....	28
Figura 5.3 - Fluxograma da ETE Sobradinho com operação emergencial através empregando Tratamento Primário Quimicamente Assistido .....	30
Figura 5.4 – Fluxograma da metodologia de análise de consistência, detecção e exclusão de outliers .....	42
Figura 6.1 - Série temporal de vazões médias diárias do período de janeiro de 2017 a outubro de 2023.....	51
Figura 6.2 – Diagramas de caixa anuais das vazões afluentes à ETE, de janeiro de 2017 a outubro de 2023.....	53
Figura 6.3 – Série Temporal de DBO no esgoto afluente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020 .....	54
Figura 6.4 - Diagramas de caixa anuais de DBO, de janeiro de 2017 a outubro de 2023... ..	55
Figura 6.5 – Série Temporal DQO esgoto afluente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020 .....	55
Figura 6.6 - Diagramas de caixa anuais de DQO, de janeiro de 2017 a outubro de 2023 ..	56
Figura 6.7 – Série Temporal dados de sólidos suspensos totais esgoto afluente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020.....	57
Figura 6.8 - Diagramas de caixa anuais de SS, de janeiro de 2017 a outubro de 2023.....	58
Figura 6.9 – Série Temporal de nitrogênio total do esgoto afluente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020 .....	59
Figura 6.10 - Diagramas de caixa anuais das concentrações afluentes de NT, de janeiro de 2017 a outubro de 2023 .....	60
Figura 6.11 – Série Temporal de nitrogênio total do esgoto afluente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020 .....	61
Figura 6.12 - Diagramas de caixa anuais das concentrações afluentes de NT, de janeiro de 2017 a outubro de 2023 .....	62
Figura 6.13 – Série Temporal de <i>E. Coli</i> do esgoto afluente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020 .....	62
Figura 6.14 - Diagramas de caixa anuais das concentrações afluentes de <i>E. Coli</i> , de janeiro de 2017 a outubro de 2023 .....	63
Figura 6.15 – Série Temporal e Diagramas de caixa de DBO do efluente tratado conforme período operacional da ETE .....	65
Figura 6.16 – Série Temporal e Diagramas de caixa de DQO do efluente tratado conforme período operacional da ETE .....	66
Figura 6.17 – Série Temporal e Diagramas de caixa de SS do efluente final conforme período operacional da ETE .....	66
Figura 6.18 – Série Temporal e Diagramas de caixa de NT do efluente final conforme período operacional da ETE .....	68

Figura 6.19 – Série Temporal e Diagramas de caixa de PT do efluente final conforme período operacional da ETE .....	68
Figura 6.20 - Série Temporal e Diagramas de caixa de <i>E. Coli</i> do efluente tratado conforme período operacional da ETE .....	70
Figura 6.21 - Diagramas de caixa das eficiências de remoção da ETE para os parâmetros de DBO, DQO e SS nos intervalos temporais de operação analisados.....	72
Figura 6.22 – Diagramas de caixa da eficiência de remoção de NT, PT e E. Coli conforme período de operação da ETE.....	74
Figura 6.23 – Diagrama de caixas da chuva acumulada mensal da estação pluviométrica da ETE Sobradinho no período de 2017 a fevereiro de 2023 .....	78
Figura 6.24 - Diagrama de caixas mensal elaborado a partir das vazões médias diárias do período de 2017 a 2019 .....	79
Figura 6.25 - Diagrama de caixas mensal elaborado a partir das vazões médias diárias do período de 2020 a outubro de 2023 .....	80
Figura 6.26 – Série temporal e diagrama de dispersão da precipitação acumulada mensal e vazão média mensal da ETE Sobradinho no período de 2017 a 2019. ....	80
Figura 6.27 – Série temporal e diagrama de dispersão da precipitação acumulada mensal e vazão média mensal no período de janeiro de 2020 a fevereiro de 2023.....	81
Figura 6.28 – Diagrama de caixas da concentração de DBO no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	82
Figura 6.29 - Diagrama de caixas da concentração de DBO no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	82
Figura 6.30 - Diagrama de caixas da eficiência de redução de DBO conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	83
Figura 6.31 – Diagrama de caixas da concentração de DQO no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	84
Figura 6.32 - Diagrama de caixas da concentração de DQO no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	84
Figura 6.33 - Diagrama de caixas da eficiência de redução de DQO conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	85
Figura 6.34 – Diagrama de caixas da concentração de SS no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	86
Figura 6.35 - Diagrama de caixas da concentração de SS no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	86
Figura 6.36 - Diagrama de caixas da eficiência de remoção de SS no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	87
Figura 6.37 – Diagrama de caixas da concentração de NT no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	88
Figura 6.38 - Diagrama de caixas da concentração de NT no efluente da ETE conforme sazonalidade e momento operacional .....	88
Figura 6.39 - Diagrama de caixas da eficiência de remoção de NT conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	89
Figura 6.40 – Diagrama de caixas da concentração de PT no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	90
Figura 6.41 - Diagrama de caixas da concentração de PT no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE .....	90

Figura 6.42 - Diagrama de caixas da eficiência de redução de PT no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE.....	91
Figura 6.43 – Diagrama de caixas da concentração de <i>E. Coli</i> no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE.....	92
Figura 6.44 - Diagrama de caixas da concentração de <i>E. Coli</i> no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE.....	92
Figura 6.45 - Diagrama de caixas da eficiência de redução de <i>E. Coli</i> no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE.....	93
Figura 6.46 - Série temporal de Vazão em função do momento de operação da ETE em comparação com a outorga de lançamento.....	95
Figura 6.47 - Série temporal de DBO em função do momento de operação da ETE em comparação com a outorga de lançamento.....	96
Figura 6.48 – Serie temporal de carga orgânica em função do momento de operação da ETE em comparação com a outorga de lançamento.....	97

## LISTA DE ABREVIACÕES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
AIQ	Amplitude Interquartis
AR	Antes da Reforma
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CDC	Coeficiente de Confiabilidade
CV	Coeficiente de Variação
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DF	Distrito Federal
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DR	Depois da Reforma
<i>E. Coli</i>	<i>Escherichia Coli</i>
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
LA	Lodos Ativados
LDM	Limite de Detecção do Método
MO	Matéria Orgânica
NOVACAP	Companhia Urbanizadora da Nova Capital
NT	Nitrogênio Total
OD	Oxigênio Dissolvido
PT	Fósforo Total
QMPS	Vazão Máxima de Período Seco
R	Em Reforma
RA	Região Administrativa
RJ	Rio de Janeiro
RS	Rio Grande do Sul
SEDUH	Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação no DF
SES	Sistema de Esgotamento Sanitário
SS	Sólidos em Suspensão
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico
TPQA	Tratamento Primário Quimicamente Assistido
UE	União Europeia

# 1 INTRODUÇÃO

O Esgotamento sanitário é um serviço de saneamento básico e direito de todo brasileiro, devendo sua prestação ser universalizada e efetiva (Brasil, 2007). Contudo, no Brasil cerca de 45% da população não possui coleta de esgoto e cerca de 49,2% não tem seu esgoto tratado antes do lançamento final (SNIS, 2022)

Nas regiões urbanas do Distrito Federal (DF) se observa um nível de atendimento elevado em relação ao cenário nacional. Cerca de 93,1% da população urbana do DF possui coleta e tratamento de esgoto, contudo, esse serviço se dá de forma heterogênea ao longo do seu território, havendo regiões como o Plano Piloto, em que o índice de tratamento passa dos 99,9%, e regiões como Sobradinho e Sobradinho II em que cerca de 87,7% têm acesso ao serviço de esgotamento sanitário (CODEPLAN, 2022a).

Embora fundamental, o acesso a sistemas de esgotamento sanitário (SES) não garante a efetividade do serviço, devendo também ser avaliada a sua qualidade. A Lei Federal nº 11.445 (Brasil, 2007) conceitua efetividade de forma ampla, envolvendo aspectos técnicos, sociais, econômicos e ambientais. Visando garantir essa efetividade, existem as normas técnicas brasileiras como a de projetos de redes de coletoras de esgoto sanitário (NBR 9649/86) e a de projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário (NBR 12209/2011); além das Resoluções CONAMA nº 430/2011 e 357/2005.

Em geral o foco dos órgãos regulatórios está sob o aspecto ambiental, sendo esse avaliado por meio da eficiência do tratamento do esgoto e da não geração de impacto ambiental superior ao regulamentado por meio da outorga de lançamento de esgoto sanitário, elaborada com base nas diretrizes das resoluções CONAMA nº 357/2005 e 430/2011. Assim, a outorga de lançamento de esgoto sanitário possui a dupla função de regulamentar a qualidade do efluente tratado que atenda as exigências mínimas de eficiência do tratamento de esgoto e que, após a mistura com o corpo hídrico receptor, não promova a alteração da sua classificação de qualidade.

Ressalta-se que o esgoto sanitário doméstico possui, em geral, elevada variabilidade de vazão e qualidade ao longo tempo, sendo frequente a ocorrência de picos de vazão e de concentração de poluentes, tornando complexa a verificação da efetividade do tratamento a todo momento (JORDÃO & PESSÔA, 2014; VON SPEARLING *et al.*, 2020). Apesar dessa variabilidade intrínseca ao esgoto, o cumprimento das outorgas costuma ser verificado por meio da frequência de ocorrência de dados dentro do limite de concentração ou eficiência estabelecido, ou ainda, da frequência de ocorrência de médias mensais dentro dos limites

estabelecidos. No Brasil não há nenhuma diretriz que regulamente a aplicação de métodos probabilísticos para avaliação da conformidade do lançamento de efluentes, apesar de sua importância para a análise de desempenho e confiabilidade. Na ausência de uma metodologia probabilística, as incertezas e variabilidades da qualidade do esgoto podem levar a uma interpretação equivocada da qualidade dos efluentes lançados nos corpos hídricos e, conseqüentemente, do cumprimento ou não das outorgas de lançamento.

Nesse sentido, se destaca a importância da adequada realização de análises de desempenho de estações de tratamento de esgoto (ETE) no intuito de verificar a efetividade do tratamento de esgoto, podendo ser realizada em diversas escalas (unidades de tratamento específicas, ETE e até conjunto de ETES) e tanto no aspecto operacional, quanto no regulatório.

No que se refere às companhias de saneamento, a realização de análises de desempenho é fundamental para avaliar e otimizar os processos de tratamento, permitindo identificar problemas nas unidades e realizar ajustes na operação. No Distrito Federal, esse tipo de análise também tem sido utilizado para estabelecer cronogramas de reforma das ETES, metas de prestação de serviço e Planos Diretores do Serviço, elaborados pela CAESB (CAESB, 2014 e 2019).

Para os agentes reguladores do serviço de esgotamento sanitário as análises de desempenho são realizadas tanto indiretamente, através do fornecimento de dados das companhias de saneamento para o agente regulador; quanto diretamente, por meio da análise de amostras do efluente e do corpo hídrico receptor. Em geral a ação das Agências Reguladoras é pautada pelas condições estipuladas na outorga de lançamento das ETES. Destaca-se nesse caso a atividade da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (Adasa) por meio dos relatórios de vistoria e fiscalização (ADASA, 2021 e 2022).

Diferentemente da análise de desempenho, a análise de confiabilidade de uma estação de tratamento de esgotos (ETE) pressupõe considerações probabilísticas, podendo ser entendida como a determinação da porcentagem de tempo em que as concentrações no efluente cumprem os padrões de lançamento ou metas de tratamento especificadas. Assim, no âmbito da avaliação de confiabilidade de uma ETE, a falha do processo de tratamento ocorrerá sempre que o padrão de lançamento for excedido (Niku *et al.*, 1979).

Em virtude da importância do entendimento da variabilidade da vazão e qualidade do esgoto, assim como das análises de desempenho e confiabilidade, o presente trabalho consistiu na avaliação do desempenho, sazonalidade e confiabilidade da ETE Sobradinho,

uma estação operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), a qual trata os efluentes domésticos das zonas urbanas de Sobradinho e Sobradinho II. Essa ETE passou por modificações consideráveis ao longo dos anos, devido ao crescimento populacional na sua região de atendimento e às necessidades operacionais emergenciais. A avaliação perpassou aspectos como a interferência das águas pluviais, as mudanças tecnológicas do tratamento ao longo do tempo, a avaliação estatística quanto ao desempenho e à confiabilidade do tratamento da ETE ao longo do tempo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar estatisticamente o desempenho, confiabilidade e sazonalidade da ETE sobradinho ao longo do tempo.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar o pré-processamento dos dados;
- Efetuar a estatística descritiva dos dados referentes a vazão e concentrações do afluente, comparando os resultados por ano, e em relação às faixas de valores de outros estudos;
- Efetuar a estatística descritiva dos dados referentes as concentrações do efluente, comparando os resultados por período/sistema operacional da ETE e em relação às faixas de valores de outros estudos;
- Calcular e efetuar a estatística descritiva das eficiências de remoção da ETE, comparando os resultados por período/sistema operacional da ETE e em relação às faixas de valores de outros estudos;
- Avaliar a interferência da sazonalidade sobre a vazão, concentrações dos parâmetros no esgoto afluente e no efluente, e eficiências de remoção da ETE;
- Avaliar a conformidade do efluente, de acordo com diferentes padrões normativos de lançamento de efluentes;
- Analisar a confiabilidade da ETE em relação à diferentes padrões normativos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse item são discutidos os elementos teóricos, e suas respectivas utilizações no meio técnico e acadêmico, que balizaram e motivaram a realização desse trabalho.

#### 3.1 MUDANÇA DA VAZÃO E QUALIDADE DO ESGOTO AFLUENTE A ETES

O aumento da vazão e a mudança das características de qualidade do esgoto afluente trazem grandes desafios às ETES, necessitando da reavaliação regular dos sistemas de tratamento. Para tal é fundamental a realização de um bom monitoramento na ETE visando compreender a dinâmica da vazão e qualidade de esgoto afluente ao longo do tempo, assim como seus impactos sobre as operações unitárias e a eficiência do tratamento.

A vazão e qualidade do esgoto afluente a uma ETE pode variar consideravelmente ao longo dos anos, dos meses e até das horas, seja pelo crescimento demográfico, pela mudança do comportamento de consumo de água da população (através de um uso mais consciente da água, da adoção de equipamentos mais econômicos e da implementação de sistemas descentralizados de reuso de águas cinzas ou aproveitamento de águas pluviais), ou ainda pela não separação absoluta da rede de esgotamento sanitário em relação as águas pluviais (von Sperling, 2014; Jordão; Pessoa, 2014; Metcalf; Eddy, 2016).

Jordão e Pessoa (2014) trazem uma relação de  $DBO_{máx}/méd=1,45$  e  $SS_{máx}/méd=1,5$  indicando os níveis típicos de variação que o esgoto doméstico pode alcançar ao longo do ano. Ainda segundo os autores, vem sendo detectado nos grandes centros urbanos o aumento das cargas unitárias de DBO e SS, passando de valores na faixa das 54g/hab.dia para 80 a 90 g/hab.dia. Acredita-se que um dos fatores motivadores seja a prática recorrente dos países ricos em triturar restos de alimentos, lançando-os no esgoto (Jordão; Pessoa, 2014).

Uma alternativa que minimiza os impactos da variação horária da vazão e qualidade do esgoto afluente são os tanques de equalização, os quais amortecem a vazão dos momentos de pico e a liberam de forma controlada nos períodos de menor vazão, tornando mais uniforme a vazão e qualidade do esgoto afluente as unidades quanto maior for seu volume. Sistemas de tratamento por processos biológicos operam melhor com vazões constantes, fator que pode ser justificado pela estabilidade da concentração de matéria orgânica afluente, possibilitando o desenvolvimento e manutenção da biota em concentração adequada ao seu tratamento (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

### 3.1.1 Variação do consumo de água

O consumo de água da população pode variar com o passar dos anos, em virtude do avanço da tecnologia e da mudança do padrão de consumo da população. Segundo a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (Adasa, 2021a), o consumo *per capita* de água no DF vem numa tendência de redução de 2013 a 2020, levando a uma tendência de redução do volume anual de água consumida no DF, apesar do crescimento populacional. Contudo, não é possível generalizar as tendências para todas as Regiões Administrativas (RA) do DF, uma vez que cada uma delas tem um crescimento populacional e mudança do comportamento de consumo de água próprio. De acordo com Metcalf e Eddy (2016), a concentração de poluentes no esgoto de sistemas separadores absolutos está inversamente relacionada com o consumo *per capita*, sendo que as vazões *per capita* mundialmente vêm decrescendo como resultado do uso crescente de aparelhos e equipamentos de conservação de água.

Ainda segundo a Adasa (2021a), o consumo de água no DF varia ao longo do ano em função das estações climáticas, tendo seu pico no fim do período da seca, entre setembro e outubro.

Além das variações ao longo do ano, o consumo de água também sofre variações ao longo do dia, tendo em geral um pico no início da manhã e outro menos acentuado no fim da tarde. Contudo, esses picos são amortecidos na rede de coleta de esgotos de forma que a chance dos picos de consumo de água nas sub-regiões de atendimento da ETE se sobrepõem é inversamente proporcional a extensão da rede coletora (von Sperling, 2014).

Visando considerar a variação anual e diária da vazão de consumo de água e geração de esgoto, é comum que os projetos de redes coletoras de esgoto e ETEs sejam elaborados considerando coeficientes de consumo, sendo tipicamente adotados os valores de 1,2 para o dia de maior consumo ( $K_1$  - Vazão máxima diária registrada num período de um ano dividida pela vazão média diária anual), 1,5 para a hora de maior consumo ( $K_2$  - divisão da vazão máxima horária pela vazão média horária registrada no mesmo dia) e 0,5 para a hora de menor consumo ( $K_3$  - divisão da vazão mínima horária pela vazão média horária registrada no mesmo dia (Sobrinho; Tsutiya, 2000; Jordão; Pessôa, 2014; CAESB, 2019; NBR 9689/1986).

Contudo, esses coeficientes de consumo são generalizados, podendo não representar adequadamente a dinâmica de consumo de água e geração de esgoto em regiões específicas (von Sperling, 2014). Dessa forma, é recomendado se determinar os coeficientes de consumo específicos da região analisada, em virtude do impacto da consideração de valores de vazão

super ou subdimensionados para o desempenho técnico e econômico da rede, das estações elevatórias de esgoto e das ETEs.

### **3.1.2 Influência das águas pluviais nas concentrações e na tratabilidade de esgotos domésticos**

Mesmo em SES separadores absolutos é frequente a ocorrência de conexões clandestinas de águas pluviais (von Sperling, 2014). A ocorrência de lançamentos de água pluvial nesse tipo de sistema impacta de forma expressiva a dinâmica do tratamento do esgoto, levando as estações elevatórias de esgoto e as ETEs a operarem de forma similar a sistemas de saneamento misto, apesar de não considerarem em seus projetos a contribuição das águas pluviais (Sobrinho; Tsutiya, 2000; Jordão; Pessôa, 2014).

O lançamento de águas pluviais junto ao esgoto doméstico implica em uma variabilidade muito maior das vazões e concentrações dos poluentes na ETE, se comparado ao esgoto bruto (Sobrinho; Tsutiya, 2000; Jordão; Pessôa, 2014).

A mistura do esgoto doméstico com as águas pluviais em geral reduz as concentrações de DBO e SS, embora em casos específicos possa elevar as concentrações de alguns outros constituintes. Não é incomum que as concentrações de SS na época chuvosa se mantenham similares às da época de seca, em função do carreamento de sólidos através do escoamento superficial das águas pluviais, tornando-as similares ao esgoto em relação à concentração de sólidos, apesar das diferenças em relação a DBO e Coliformes (Metcalf; Eddy, 2016)

Ainda segundo Metcalf e Eddy (2016), a influência de águas pluviais nos sistemas de esgotamento sanitário pode ser dividida em diversas parcelas, destacando-se a infiltração e os influentes diretos. A infiltração é definida como a água que adentra o sistema de coleta em diversos pontos. Na NBR 9649/1986 é normatizada a consideração de uma vazão de infiltração de águas pluviais na rede de esgoto, sendo estipulado um intervalo entre 0,05 e 1L/s.km. Essa pequena contribuição pluvial se deve à passagem de água do solo para o interior da rede, se dando através de defeitos nos tubos, conexões de tubulação, juntas ou paredes de poços de visita. Assim, é uma vazão dependente da extensão de tubulação, do diâmetro das tubulações, do número de conexões por unidade de área, da área atendida pela rede, do tipo de solo e da profundidade do lençol freático (von Sperling, 2014; Sobrinho; Tsutiya, 2000).

Metcalf e Eddy (2016) propõem duas formas de cálculo para a vazão de infiltração, uma baseada no comprimento e diâmetro da rede, sendo a infiltração de 0,01 a 1 m<sup>3</sup>/dia.mm.km (valores acima de 0,75 são considerados como infiltração excessiva na rede

pela agência regulatória dos Estados Unidos da América); e outra baseada na área atendida pelo sistema de coleta, em que a contribuição varia em média de 0,2 a 28 m<sup>3</sup>/ha.dia, podendo chegar a 500 m<sup>3</sup>/ha.dia durante chuvas pesadas.

Apesar dos pequenos valores numéricos do intervalo sugerido pela NBR 9649, as contribuições por infiltração podem ser expressivas em sistemas antigos ou de baixa qualidade construtiva, em que as juntas de tubulações eram feitas de argamassa e os poços de visita eram de tijolos, promovendo um potencial de infiltração elevado (Metcalf e Eddy, 2016). Vale citar o caso avaliado por Ribeiro e Peixoto (2018) em que se teve diferenças de até 31% na vazão máxima horária da ETE comparando dias de chuva com dias de seca. Apesar da clara influência das chuvas sobre a vazão, os autores não obtiveram correlação forte entre precipitação e vazão afluyente à ETE, justificando o resultado pela possibilidade de encharcamento do solo e favorecimento da vazão de infiltração na tubulação.

Já os influentes diretos são definidos como as conexões cruzadas do sistema de drenagem urbana (coletores de águas pluviais, drenagem de pátios e outros, tampas de poços de visita, intrusão de rios e etc.) com a rede coletora de esgoto implicando na atuação dessa como a de um sistema unitário e em um aumento imediato das vazões da rede coletora de esgoto na ocorrência de chuvas. Na NBR 12207/1992 se estabelece a necessidade de consideração de uma contribuição pluvial parasitária apenas para o dimensionamento dos extravasores dos interceptores de esgoto, devendo a determinação dessa contribuição ser feita com base em medições locais e, na inexistência das medições, adotar valor não superior a 6 L/s.km. Contudo, o estudo de Tsutiya e Bueno (2004), em que se compilou os resultados de 10 análises da contribuição de águas pluviais em distintos SES do Brasil, se observou uma contribuição pluvial extremamente variável a depender do sistema de esgotamento em análise, variando de 0,15 a 12 L/s.km ou um incremento da vazão de esgoto entre 26 e 283% em relação a vazão máxima do período de seca das ETEs analisadas.

Segundo Metcalf e Eddy (2016), dentre os benefícios de um sistema separador absoluto, isso é, de redes coletoras com reduzidas taxas de infiltração e influentes indevidos, estão os seguintes pontos: Redução do risco de refluxo de esgoto, redução da necessidade e gasto energético de estações elevatórias de esgoto, aumento da eficiência operacional da ETE, melhoria da capacidade hidráulica dos sistemas coletores e da ETE.

Estudos apontam para uma sensibilidade dos sistemas de tratamento biológicos em tratar esgotos com oscilação sazonal de vazão e qualidade. Sendo frequente a ocorrência de problemas operacionais, como a lavagem de reatores ou a necessidade de realização de by-pass do esgoto afluyente, ou ainda a redução da eficiência de remoção de parte dos parâmetros

de qualidade durante o período de chuvas, decorrente da diluição do esgoto, em ETEs de sistemas de esgoto separadores absolutos que sofrem com influências indevidas de águas pluviais (Branco, 2015; Makuwa *et al.*, 2022). Contudo, alguns estudos envolvendo sistemas de lodos ativados conseguiram manter suas eficiências operacionais e a qualidade do seu efluente a despeito do expressivo aumento de vazão e redução da concentração de matéria orgânica, provocados pela contribuição de águas pluviais (Sabila; von Sperling, 2017; Oliveira; Soares; Holanda, 2020).

Segundo Metcalf e Eddy (2016), quando a vazão indevida de águas pluviais representa mais de 50% da vazão de pico, requerendo um superdimensionamento da rede coletora de esgoto e da ETE, devem ser investigados métodos para redução da carga hidráulica. Além disso, sistemas com elevada taxa de infiltração podem também possuir taxa de vazamento no período de seca, em que o lençol está baixo, podendo contaminar as águas subterrâneas e superficiais próximas.

Em agosto de 2023 a Adasa publicou sua resolução nº25 a qual estabelece procedimentos gerais para execução integrada, pela CAESB e pela Companhia Urbanizadora da Nova Capital (NOVACAP), das atividades de inspeção, identificação e correção dos lançamentos irregulares de esgotos sanitários ou outros efluentes no sistema de drenagem e manejo de águas pluviais no sistema de esgotamento sanitário, sendo suas ocorrências expressamente vedadas em seu artigo 3º. Contudo, a legislação não firma prazos máximos para a realização das medidas de inspeção, identificação e correção dos lançamentos, seja pelo órgão constador da irregularidade ou pelo responsável pelo sistema em desacordo. Além disso a regulamentação não traz medidas de participação ativa da sociedade no processo, sendo o termo gestão integrada referido apenas a CAESB e NOVACAP e não propriamente aos usuários do sistema. Cabe enfatizar ainda que, pelo artigo nº12 a resolução só é válida para regiões em que se tenham sistemas públicos tanto de esgotamento sanitário quanto de manejo de águas pluviais.

### **3.2 LEGISLAÇÕES E REGULAMENTAÇÕES ASSOCIADAS AO TRATAMENTO DE ESGOTO**

O esgoto sanitário é um efluente rico em sólidos, matéria orgânica, nutrientes e patógenos, que pode conter fármacos, pesticidas e outros poluentes, portanto, um efluente de elevado potencial nocivo ao meio ambiente e à saúde humana (von Sperling, 2014). O lançamento de esgoto sanitário, sem o tratamento adequado, em corpos hídricos promove o aumento da concentração de matéria orgânica e de nutrientes na água, deixando de ser um

fator limitante ao crescimento da biota, levando à depleção da concentração de oxigênio dissolvido e à intensificação do processo de eutrofização (Kato; Pivele, 2005).

Assim, visando resguardar a qualidade dos corpos hídricos e os usos atuais e pretendidos para o futuro pela população para esses mananciais, a resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece classes de enquadramento de corpos hídricos, delimitando valores limites de qualidade da água que devem ser atendidos em cada classe.

Contudo, em função dos múltiplos fatores interferentes na qualidade da água dos corpos hídricos, é difícil controlar efetivamente as fontes poluidoras apenas por meio da definição de limites de qualidade para as águas dos corpos receptores. Nesse sentido, a delimitação de padrões de qualidade para o lançamento de efluente surge como uma solução prática para a situação, facilitando a fiscalização e a atribuição de responsabilidade aos poluidores pela degradação do corpo hídrico receptor (von Sperling, 1998).

A Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece a nível nacional os critérios mínimos de qualidade para o lançamento de efluentes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários, sendo os 6 principais critérios: pH entre 5 e 9; temperatura inferior a 40°C; concentração máxima de materiais sedimentáveis de 1 mL/L; DBO máxima de 120 mg/L, podendo ser ultrapassado no caso de eficiência de remoção mínima de 60% de DBO; concentração máxima de óleos e graxas de 100 mg/L; e ausência de materiais flutuantes. Apesar da importância dos critérios normatizados a resolução não estipula limites para vários parâmetros importantes de qualidade do efluente de sistemas de tratamento de esgoto doméstico, como DQO, SS, NH<sub>3</sub>, PT, e *E.Coli*.

A resolução CONAMA nº 430/2011 confere ainda autonomia aos órgãos ambientais de cada localidade para, conforme as especificidades de cada local, incluir mais critérios, assim como a determinar valores mais restritivos para os padrões de lançamento e o estabelecimento da frequência de monitoramento a ser praticada para garantia do cumprimento das diretrizes.

Morais e Santos (2019) desenvolveram um inventário dos padrões de lançamento estabelecidos pelos órgãos ambientais em 21 unidades federativas do Brasil para os parâmetros DBO, DQO, SS, NT, NH<sub>3</sub>, PT e Coliformes Termotolerantes. Destaca-se nas legislações estaduais a adoção de estratégias para estipulação de critérios mais razoáveis em relação à viabilidade técnica e econômica: como no caso das normativas de Pernambuco, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul que estabelecem limites flexíveis em função da carga poluente, aumentando o rigor de eficiência de tratamento exigido conforme o aumento da vazão de lançamento; ou como no caso de Manaus que estabelece concentração limite de

lançamento diário mais permissiva e mensal mais restritiva de SS. Os autores concluíram que não há uma padronização nacional quanto à forma de adoção e rigor dos padrões de lançamento estabelecido, variando conforme a unidade federativa.

Constata-se ainda que alguns Estados mantêm uma postura muito restritiva, dificultando o cumprimento da legislação devido ao alto nível de tratamento requerido para alcançar determinados padrões, exigindo tecnologias complexas e caras do ponto de vista de implantação e operação, implicando em custos econômicos excessivos e padrões de lançamento insustentáveis na maior parte de seus municípios, ou seja, são padrões de lançamento existentes apenas na teoria, portanto, não cumprindo efetivamente seu papel de ferramenta para proteção ambiental (von Sperling, 1998; von Sperling; Chernicharo, 2000; Morais; Santos, 2019).

Assim, apesar de passados 25 anos do estudo de von Sperling (1998), sua motivação continua atual. Ainda existe uma grande dicotomia entre o padrão de lançamento desejado e o praticável no Brasil, o que faz com que os órgãos ambientais brasileiros tenham que ponderar entre: relaxar os padrões, ou ao menos sua cobrança, como forma de adequar-se à realidade brasileira; ou restringir os padrões ainda mais, de maneira a acompanhar as tendências mundiais.

No cenário internacional destacam-se as diretrizes da União Europeia, que tem como principal normativa de lançamento de efluentes a Diretiva do Conselho 91/271/EEC de 21/05/1991, atualizada em 01/01/2014 (Council of the European Communities, 2014). Esta diretiva estabelece desde critérios para que uma área seja considerada mais sensível ou menos sensível; prazos para a implementação da coleta e tratamento de esgoto em seu território, variando de 8 a 15 anos a depender do contingente populacional e sensibilidade da área; concentrações máximas e eficiências mínimas de remoção de DBO, DQO, SS a depender da sensibilidade da área e do contingente populacional equivalente (p.e); a obrigatoriedade de amostras compostas, com frequência mínima variável entre amostras trimestrais e quinzenais, conforme o porte da estação (p.e); além estipular nº máximo de descumprimentos do padrão em função do número de amostras, devendo ainda os descumprimentos corresponderem à concentração abaixo do dobro do valor do padrão, ou 2,5 vezes especialmente para o caso de SS.

A diretiva da comunidade Europeia é um dos exemplos da tendência mundial de se definir critérios diferenciados a depender da sensibilidade ambiental dos corpos hídricos receptores de efluentes. Esta abordagem tem a vantagem de exigir um tratamento diferenciado e mais restritivo conforme a fragilidade ambiental, evitando generalizações que

muitas vezes forçam a adoção de padrões excessivamente severos em locais de menor sensibilidade (von Sperling, 1998).

Destaca-se que em 1991 a diretiva da União Europeia já solucionava vários dos problemas e indefinições apontadas pelos trabalhos de von Sperling (1998) e von Sperling e Chernicharo (2000) na Resolução CONAMA nº 20/1986, que permanecem nas resoluções CONAMA nº 357 e 430. Dentre as indefinições se destacam: a não estipulação de uma frequência mínima de amostragem ou ainda do tipo de amostragem a ser realizada (pontual ou composta), o que leva a um questionamento de qual o período de referência para julgamento do cumprimento dos padrões de lançamento estipulados; e a não estipulação quanto a forma de avaliação do atendimento à diretiva estipulada, se por meio de valores absolutos ou por uma avaliação estatística, definindo probabilidades de conformidade.

É evidente que na área ambiental análises exclusivas por valores médios não são suficientes para se falar em regularidade e segurança, haja visto que danos ambientais de grandes dimensões podem ocorrer em um único e breve momento, não sendo adequadamente representados e interpretados quanto a sua gravidade por uma análise média. Contudo, as diretrizes de padrão de lançamento de efluentes dos órgãos ambientais brasileiros, em geral, não preveem a exigência de avaliação estatística do efluente lançado, ou da eficiência de tratamento, e naturalmente, por melhor que seja um sistema de tratamento, sempre há uma probabilidade de o efluente lançado ter concentração superior ao normatizado ou a ETE performar com eficiência abaixo do esperado, mesmo que seja uma probabilidade muito pequena (OLIVEIRA E VON SPERLING, 2007; von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

Niku *et al.* (1981) aborda a necessidade de mudanças na forma de estabelecimento de padrões de lançamento de efluentes, devendo-se substituir o uso de médias aritméticas por médias geométricas a fim de que se pudesse ao menos representar adequadamente a tendência central dos dados de DBO e SS. Além disso, os autores discutem a importância de se ter padrões de lançamento estabelecidos com base em análises probabilísticas, estabelecendo uma frequência de falha aceitável para o processo, como 1 vez a cada 3 anos ou 10 anos. A partir da adoção desse nível de falha seria possível determinar através do uso de modelos de confiabilidade o valor da concentração de projeto a ser adotada. Ressalta-se que esta alteração das exigências ambientais, saindo de uma lógica determinística para uma lógica probabilística, não as tornaria as mais brandas, apenas ajustaria a representação do padrão de lançamento para a realidade intrinsecamente variável do tratamento de esgoto, permitindo um dimensionamento mais adequado das ETEs.

### 3.3 MONITORAMENTO, ANÁLISES ESTATÍSTICAS E PROBABILISTICAS

De acordo com Oliveira e von Sperling (2005), cada ETE deve ser avaliada individualmente para que se possa compreender os bons ou maus desempenhos apresentados, já que estes são decorrentes de diversos fatores. É necessário, por parte dos projetistas e operadores, um conhecimento aprofundado e integrado de cada sistema, envolvendo não apenas as cargas hidráulica e orgânica aplicadas, mas também fatores nem sempre diretamente mensuráveis, como os aspectos microbiológicos nos reatores, comportamento hidrodinâmico das unidades, condições de funcionamento dos equipamentos eletromecânicos, além de detalhes de projeto, construção e manutenção para se tentar estabelecer e entender as várias inter-relações existentes em uma ETE (Jordão; Pessoa, 2014; von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

A vazão de esgoto afluente à ETE é um dos principais parâmetros a ser monitorado, possibilitando a verificação da capacidade hidráulica das unidades de tratamento frente a vazão real afluente. Sua análise ganha ainda mais importância quando a tecnologia utilizada necessita da dosagem de produtos químicos ou de vazões de recirculação de outras unidades (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

As concentrações dos parâmetros de qualidade do esgoto devem ser avaliadas de forma conjunta com as vazões a fim de que se possa ter um entendimento da carga poluente do efluente. Uma pequena vazão de esgoto com elevada concentração de uma substância pode produzir impactos semelhantes a uma grande vazão com baixa concentração da substância, apesar das diferenças no quesito de comportamento hidráulico das unidades da ETE (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

Um dos principais parâmetros do dimensionamento de unidades de tratamento de esgoto é o tempo de detenção hidráulico (TDH), ou seja, o tempo de residência dos elementos fluidos dentro da unidade (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020). Esse tempo é normatizado para diversas tecnologias de tratamento de esgoto sanitário, por meio da NBR 12.209 (ABNT, 2011). Embora seja intuitivo que quanto maior o tempo de detenção hidráulico maior será a remoção biológica, em virtude do maior tempo disponível para a degradação, não há uma relação direta entre essas informações. A remoção biológica depende também de outras propriedades do esgoto como pH, temperatura, concentração de matéria orgânica e oxigênio dissolvido, entre outras (von Sperling, 2014).

O principal propósito de uma ETE é a remoção de poluentes. Assim, é comum que as concentrações desses no efluente de determinadas unidades possam ser muito baixas para determinados métodos analíticos, não podendo ser medidos por estarem abaixo dos Limites

de Detecção do Método (LDM) empregado, portanto, é fundamental se ter conhecimento acerca dos limites de detecção inerentes aos métodos utilizados, a fim de adotar métodos compatíveis com os objetivos do monitoramento realizado (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

Não é raro que em bases de dados de monitoramento de ETE existam ocasionalmente lacunas de dados, dentre os diversos motivos para isso estão as falhas dos equipamentos de análises, condições climáticas inadequadas e falhas nas coletas de amostras (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

A eficiência de remoção é calculada por meio do percentual de um determinado constituinte que é removido entre uma análise do esgoto afluente e efluente de uma unidade ou sistema. Dessa forma, depende intimamente das concentrações do parâmetro no esgoto, sendo possível a obtenção de elevadas eficiências mesmo nos casos em que o efluente possui concentrações elevadas. A análise de dados de eficiência de remoção deve ser feita em conjunto com as de concentrações efluentes, possibilitando o entendimento da qualidade do tratamento em relação ao efluente e auxiliando na tomada de decisão quanto à realização de mudanças na operação, processos e tecnologias utilizadas na ETE (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

### **3.3.1 Dados com valores discrepantes ao esperado (*Outliers*)**

Os *Outliers* são as medições as quais apresentam valores muito menores ou maiores que o resto do conjunto de dados ou o esperado teoricamente. Suas origens mais comuns são: Problemas com a coleta, armazenamento e conservação de amostras; problemas nas análises laboratoriais; e falhas na transcrição de dados para a base de dados. Por vezes é possível identificá-los por meio dos significados físicos das medições, por exemplo, a DBO de uma amostra nunca pode ser maior do que a DQO dela, sendo sua ocorrência um sinal claro de erro (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

Apesar de ser uma informação passível de ser percebida visualmente, por meio da plotagem de gráficos juntamente a comparação com valores tipicamente encontrados. Os *outliers* podem também ser determinados, em carácter preliminar, por meio de diferentes métodos, os quais podem ser divididos conforme suas tipologias e pressupostos.

O método da amplitude interquartis, proposto por Tukey (1977), é citado extensamente como uma alternativa para a avaliação de *outliers*, estando em diversos livros técnicos como von Sperling, Verbyla e Oliveira (2020), Naghettini e Pinto (2007), e Metcalf e Eddy (2016). Além disso é frequentemente utilizado em análises de desempenho de ETEs como em Oliveira (2006), Silveira (2011) e Dantas (2020).

O método da amplitude interquartis se estrutura em função do primeiro e terceiro quartil do conjunto de dados e seu intervalo ( $Q3-Q1$ ), também chamado de amplitude interquartis (AIQ), para a determinação dos valores limites superiores e inferiores para que um dado seja considerado *outlier*, conforme apresentadas nas equações 1 e 2

$$LIO = Q1 - k * (Q3 - Q1) \quad 1$$

$$LSO = Q3 + k * (Q3 - Q1) \quad 2$$

Onde,

- $LIO$  = Limite Inferior para *Outlier*;
- $LSO$  = Limite Superior para *Outlier*;
- $Q1$  = Primeiro quartil, valor ao qual 25% dos dados são menores ou iguais;
- $Q3$  = Terceiro quartil, valor ao qual 75% dos dados são menores ou iguais
- $k$  = Número de AIQs adotado para a consideração de *outlier*.

Segundo Tukey (1977), um dado é considerado discrepante em relação ao conjunto amostral quando estiver fora dos limites estipulado pela adoção de  $k=1,5$  e muito discrepante se estiver fora dos limites adotando  $k=3$ .

Por ser baseado exclusivamente nos quartis, o método de Tukey (1977) é resistente a presença de valores extremos e não faz pressupostos de adequação a distribuições probabilísticas, contudo, pode não ser apropriado para avaliação de conjuntos amostrais de poucos dados, em função da imprecisão na determinação dos quartis.

Apesar do método da amplitude interquartis ser útil do ponto de vista exploratório, da perspectiva estatística ele não constitui um teste de hipótese, não possuindo um nível de significância e confiabilidade estabelecidos (Naghettini; Pinto, 2007).

Cabe ressaltar que devido à alta variabilidade nas características do esgoto, é comum que as ETEs possuam um comportamento dinâmico e seja relativamente frequente a ocorrência de medições com valores atípicos em relação aos conjuntos de dados pré-existentes, podendo esses dados aparentemente discrepantes serem de fato reflexos de um comportamento real existente na ETE ao invés de um erro, assim, havendo dúvida quanto a veracidade do dado a melhor decisão é a de manter os aparentes outliers. Por conta disso, uma vez identificados os pontos atípicos de uma amostra, a decisão de mantê-los ou deletá-los deve ser matéria de uma investigação cuidadosa, sendo recomendável a avaliação do diário de operação da ETE com a finalidade de verificar se não ocorreu nenhum evento especial antes ou no momento de coleta das amostras (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020; Naghettini; Pinto, 2007).

Apesar da relevância e impacto da análise de *outliers* para a realização adequada das análises estatísticas de avaliação de desempenho de ETE, esse tópico raramente é abordado nos trabalhos publicados, sendo uma análise dotada de subjetividade por parte dos autores e pouco justificada. Quando abordada, a análise de *outliers* é retratada de forma generalizada, não avaliando em profundidade a veracidade dos dados identificados como discrepantes, sendo principalmente aplicado o método do intervalo interquartis para detecção de valores discrepantes, em geral eliminando os dados detectados como discrepantes visando apenas a representação das características médias de tratamento. Essa abordagem foi empregada nos trabalhos de Silveira (2011); Dantas *et al.* (2017); Fernandes; Dias (2021); Alves *et al.* (2021). E por vezes até não as realizando, como Kumar, Kumar e Babu (2010).

### **3.3.2 Distribuições de Probabilidade**

Em SES, onde se está continuamente recebendo, tratando e lançando esgoto, é impossível saber os valores exatos da concentração dos poluentes presentes. Por mais frequentes que sejam as análises, no intervalo entre elas não se tem informação e não há garantia da não variação das concentrações. Dessa forma, ao se analisar uma amostra, o objetivo é obter uma informação que permita fazer uma inferência num nível de confiança adequado acerca do valor da população como um todo (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

Os modelos de distribuição de probabilidades podem ser utilizados como representação do comportamento de uma variável aleatória e serem utilizados para interpolar, ou extrapolar, probabilidades não contidas no conjunto amostral, sendo uma avaliação importante para descrição adequada dos dados de qualidade no tratamento de esgoto, permitindo o desenvolvimento de análises probabilísticas e a tomada de decisões com base na variabilidade da população através do conjunto amostral disponível. Portanto, ao trabalhar com dados em engenharia, um dos principais processos estatísticos é o de análise e escolha da função de distribuição de probabilidade mais adequada para descrever o comportamento de certa variável aleatória (Naghettini; Pinto, 2007; Assis, 2018).

Em avaliações de desempenho de ETEs, são tipicamente empregadas análises considerando a aderência dos dados a uma distribuição de probabilidade normal, em virtude de sua simplicidade analítica (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020). Uma distribuição normal possui valores de média e mediana iguais e uma distribuição simétrica dos dados em torno desse valor central, sem a definição de limites mínimos ou máximos (Montgomery; Runger, 2018).

Contudo, ao avaliar os dados de vazão e concentração dos parâmetros de qualidade do esgoto se obtém, na maioria dos casos, valores de média superiores aos de mediana e distribuições assimétricas, possuindo maior dispersão para os valores superiores à mediana, a direita do gráfico (Niku; Schroeder; Samaniego, 1979; Oliveira, 2006; von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

De acordo com Niku, Schroeder e Samaniego (1979) os dados de concentração de DBO e SS se ajustam melhor à função de distribuição de probabilidades lognormal do que às demais funções de distribuição. Metcalf e Eddy (2016) afirmam que, em geral, todos os constituintes do esgoto, que podem ser alterados biologicamente, são bem descritos por distribuições do tipo lognormal. Por fim, Oliveira, Souki e von Sperling (2012) expandem ainda mais esse conceito, obtendo melhor ajuste à distribuição lognormal para todos os parâmetros mais comuns de monitoramento de qualidade de efluentes, de 35 ETEs do sudeste brasileiro.

Diversos artigos chegaram à mesma constatação, de melhor aderência à distribuição lognormal, como Messaoud, Bachir e Maurice (2013) e Silva e Rosa (2022) para concentração efluente de DBO, DQO e SS e Ishak *et al.* (2022) para DBO, DQO, SS e NH<sub>3</sub>. Em virtude da ampla divulgação da aderência à distribuição lognormal, alguns estudos partem diretamente desse pressuposto, como Owusu-Ansah *et al.* (2015). Contudo, há que se destacar que outros estudos obtiveram resultados diferentes, como Młynski *et al.* (2020) e Młynski, Bugajski e Młynska (2019) em que foram verificadas melhores aderências à distribuição do modelo de mistura gaussiana para os parâmetros DBO, DQO, SS, NT e PT do esgoto afluente e efluente de ETEs de lodos ativados convencional de grande porte. Ressaltando, portanto, a importância de uma avaliação individual do melhor modelo de distribuição de probabilidade para descrição dos dados.

Uma distribuição lognormal ideal permite apenas valores positivos, possuindo média geométrica e mediana próximas e sendo dotada de uma assimetria positiva. Além de ser comumente utilizada na engenharia, pela capacidade de promover um melhor ajuste de dados positivamente assimétricos à uma distribuição normal utilizando-se da transformação logarítmica destes (Montgomery; Runger, 2018; Niku; Schroeder; Samaniego, 1979).

Para seleção da distribuição de probabilidade mais adequada, diversos testes e métodos gráficos verificadores de aderência são comumente aplicados. Destacando-se os testes *Qui-quadrado*, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, Anderson-Darling e Shapiro-Wilk (Naghetini; Pinto, 2007; Montgomery; Runger, 2018)

Contudo, há que se destacar que o teste de Kolmogorov-Smirnov foi elaborado considerando o conhecimento dos valores populacionais de média e desvio padrão da distribuição, nos casos em que esta não é uma premissa verdadeira devem ser aplicadas correções numéricas. Dentre as correções se destaca a de Lilliefors, a qual foi obtida através da aplicação do método de Montecarlo (Lilliefors, 1967).

Oliveira (2006) avaliou a aderência dos dados dos parâmetros de qualidade de 208 ETes do sudeste brasileiro, de diferentes portes e tecnologias de tratamento, às distribuições de probabilidade por meio dos testes de qui-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Lilliefords, dividindo as ETes conforme melhor aderência à distribuição Normal, Lognormal ou outra distribuição, obtendo através dos testes qui-quadrado as melhores verificações de aderência, seguido pelo teste Lilliefords e conseguindo resultados pouco precisos para os testes de Kolmogorov-Smirnov, os quais aceitaram diversas distribuições como passíveis de descrever o comportamento dos dados.

### **3.3.3 Testes de Hipóteses**

Os Testes de hipóteses são processos de inferência estatística os quais objetivam determinar com um certo nível de confiabilidade se uma característica de uma ou mais populações de dados é, ou não, apoiada pela evidência dos dados amostrais avaliados (von Sperling, 2014). Em outras palavras, é um processo no qual se emprega uma ou mais amostras de dados para determinar a aceitação ou rejeição de uma hipótese.

Assim, a escolha da hipótese a ser verificada (hipótese nula) é um dos pontos mais importantes desse teste estatístico, tendo em vista que tradicionalmente são aplicados com metodologia análoga a de uma prova por exclusão, ou seja, se define a hipótese nula de forma que por meio da sua rejeição seja validada a hipótese alternativa (von Sperling, 2014).

Por meio dos testes de hipóteses é possível tomar decisões em presença da variabilidade dos dados, ou seja, verificar se um comportamento específico é apoiado pela evidência obtida através dos dados amostrais, ocorrendo de forma estatisticamente significativa, ou se sua ocorrência é apenas devida à flutuação inerente aos dados da amostragem realizada (Assis *et al.*, 2018). Inclusive, é possível escolher o critério de nível de significância ( $\alpha$ ) desejado, usualmente 5% ou 1%, sendo essa a probabilidade de se estar rejeitando a hipótese nula quando está é verdadeira (von Sperling, 2014).

Dentre os testes de hipóteses paramétricos se destaca no meio científico a aplicação do teste padrão e o “t de Student” especialmente quando testar a média sem o conhecimento do desvio padrão populacional, ambos possuem os pressupostos de uma análise paramétrica, isto é: a normalidade dos dados, a homogeneidade das variâncias, a independência das

amostras (depende muito da pergunta experimental), ausência de *outliers*. Já dentre os não-paramétricos se destacam os testes de Mann-Whitney (possui como único pressuposto a independência entre as amostras) e de Kolmogorov-Smirnov (Assis *et al.*, 2018; von Sperling, 2014).

Para a realização de testes de hipóteses com mais de duas amostras pode ser realizada ou a repetição sistemática dos testes de hipóteses já citados (o que pode ser facilmente executado para poucas amostras, mas aumenta os erros intrínsecos aos métodos e a confiabilidade das conclusões tomadas, aumentando a probabilidade de equívocos na tomada de decisão), ou utilização da análise de variância (ANOVA) atendendo aos pressupostos de uma análise paramétrica (Naghetini; Pinto, 2007; Assis *et al.*, 2018). Pode-se ainda utilizar o teste de Kruskal-Wallis, equivalente não paramétrico da ANOVA, o qual possui como único pré-requisito a independência das amostras, sendo a hipótese nula a igualdade entre as medianas, ou mais precisamente, a igualdade das distribuições dos conjuntos de dados. No caso desses testes a rejeição da hipótese nula não aponta diretamente a amostra a qual possui diferença significativa em relação à média ou mediana, apenas se sabe que uma ou mais amostras possui média/distribuição diferente das demais, sendo necessária a realização de uma comparação entre pares (post-hoc) para descobrir em qual amostra essa diferença está.

Os testes de hipóteses são frequentemente utilizados para se comparar a qualidade do esgoto afluente e efluente à ETEs em momentos distintos, ou ainda para comparar as eficiências de remoção de diferentes ETEs, alguns exemplos da aplicação desses testes são os trabalhos de: Dantas *et al.*(2022) em que se comparou através do teste de Kruskal-Wallis e post-hoc de Dunn as concentrações efluentes de 48 ETEs agrupadas conforme a tecnologia de tratamento; Saliba e von Sperling (2017) que utilizaram o teste de Mann-Whitney para comparar as concentrações afluente e efluentes conforme os períodos de seca e de chuvas em uma ETE de grande porte; Oliveira (2006) que utilizou o teste de Mann-Whitney tanto para comparar a concentração afluente nos períodos de seca e de chuvas quanto para comparar as eficiências de remoção obtidas por ETEs conforme seus índices de monitoramento, assim como utilizou o teste de Kruskal-Wallis e post-hoc de Dunn para comparar as concentrações efluentes e eficiências de remoção de ETEs com diferentes parâmetros operacionais e para comparar os percentuais de conformidade a padrões de lançamento obtidos por diferentes tecnologias de tratamento.

### 3.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Segundo von Sperling, Verbyla e Oliveira (2020), embora exista grande quantidade de trabalhos com dados de monitoramento de alta qualidade de ETEs, a maioria não analisa esses dados por modelos estatísticos adequados a seus processos estudados, não trazem transparência e clareza de seus dados e significados associados, comprometendo sua utilidade para a tomada de decisão quanto a manutenção ou intervenção nos sistemas de tratamento ou sua operação. Dessa forma, a adequada avaliação estatística do desempenho de uma ETE se configura como um elemento fundamental, atuando como uma relevante verificação quanto à qualidade, segurança e regularidade do serviço oferecido em qualquer escala (unidades de tratamento específicas, ETE e até conjunto de ETEs), tanto no aspecto operacional, quanto regulatório.

No que se refere às companhias de saneamento, a realização dessas análises é fundamental para avaliar e otimizar os processos de tratamento, permitindo identificar problemas nas unidades e realizar ajustes na operação. No Distrito Federal, esse tipo de análise também tem sido utilizado para estabelecer cronogramas de reforma das ETEs, metas de prestação de serviço e Planos Diretores do Serviço, elaborados pela CAESB (CAESB, 2014 e 2019).

Para os agentes reguladores do serviço de esgotamento sanitário ela é feita tanto indiretamente, através do fornecimento de dados das companhias de saneamento para o agente regulador; quanto diretamente, por meio da análise de amostras do efluente e do corpo hídrico receptor. Em geral a ação da Agência Reguladora é pautada pelas condições estipuladas na outorga de lançamento das ETEs. Destaca-se nesse caso a atividade da Adasa por meio dos relatórios de vistoria e fiscalização, verificando o desempenho e a conformidade das ETEs pela frequência de ocorrência de valores em conformidade, ou seja, o quociente entre o número de dados que atenderam as diretrizes e o número de dados, utilizando todos os dados do conjunto amostral e utilizando apenas as médias mensais, na avaliação da qualidade do serviço prestado pela CAESB (ADASA, 2020, 2021b e 2022b);

No meio científico, a importância de análises de desempenho reside no estudo das características do esgoto e processos de tratamento (Oliveira; von Sperling, 2005; Dantas *et al.*, 2017); das especificidades do tratamento de ETEs (Saliba; von Sperling, 2017; Bugajski; Pawelek; Kurek, 2017); ou ainda, na avaliação preliminar para a realização de análises estatísticas mais elaboradas (Oliveira; von Sperling, 2008; Fernandes; Dias, 2021; Młynski *et al.*, 2020; Alves *et al.*, 2021).

Dentre os principais motivadores para a realização de análises de desempenho estão a alteração do sistema de tratamento de ETEs e/ou de seus parâmetros operacionais. No caso de sistemas de lodos ativados, destaca-se a importância da carga de sólidos suspensos (SS) nos reatores biológicos aerados, permitindo regular o tempo de detenção celular e a relação alimento/microrganismo; e da concentração de oxigênio dissolvido (OD), uma vez que este não pode ser fator limitante para que o processo aeróbio ocorra de forma efetiva (von Sperling, 2016; Jordão; Pessôa, 2014).

### **3.5 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE**

Niku, Schroeder e Samaniego (1979), Niku et al. (1981) e Metcalf e Eddy (2016) definem a confiabilidade como a “Probabilidade de desempenho adequado, durante um período de tempo em condições específicas”, ou a “porcentagem de tempo no qual as concentrações do efluente atendem aos requisitos legais estabelecidos sem falhas”. Em outras palavras, uma ETE seria completamente confiável se seu tratamento promovesse um efluente sempre dentro dos padrões de lançamento, sendo a falha entendida como um lançamento com carga poluente superior à estabelecida pelas diretrizes ambientais (Niku; Schroeder; Samaniego, 1979; Niku *et al.*, 1981).

Devido às diversas incertezas inerentes ao projeto e operação de ETEs, é inevitável que haja um risco de falha, por menor que ele possa ser. Devendo as ETEs serem projetadas e operadas com base em um risco de falha calculado e avaliado como aceitável para o não cumprimento das diretrizes ambientais, tendo em mente que os custos de implantação e operação de ETEs tende a aumentar consideravelmente com requisitos mais elevados de desempenho e confiabilidade (Niku; Schroeder; Samaniego, 1979; Niku *et al.*, 1981; Metcalf e Eddy, 2016).

A probabilidade de falha é extremamente sensível à função de distribuição de probabilidade dos dados de concentração efluente. Assim, para se obter um modelo de confiabilidade antes é preciso determinar a função de distribuição de probabilidades que descreve bem os dados. Conhecida esta distribuição, uma expressão pode ser utilizada para definir a fração do tempo em que uma dada concentração foi excedida no passado e, desta forma, prever o comportamento futuro de uma ETE, desde que as variáveis do processo continuem as mesmas (Niku; Schroeder; Samaniego, 1979; Niku *et al.*, 1981; Oliveira e von Sperling, 2008).

Empregando essa definição e partindo do conhecimento dos dados e verificação da aderência desses a distribuição log-normal, Niku, Schroeder e Samaniego (1979)

desenvolveram um modelo de confiabilidade, onde a concentração média do constituinte (valor de projeto) se relaciona aos valores limites do padrão de lançamento desejado em uma análise probabilística.

Cabe destacar que o modelo de confiabilidade é válido apenas para análises de longo prazo, uma vez que não leva em conta efeitos de sazonalidade ou tendências. Assim, para a utilização deste em análises de confiabilidade de curto prazo deve-se remover eventuais tendências de longo prazo e sazonalidades (Niku; Schroeder; Samaniego, 1979).

Este modelo de confiabilidade ganhou bastante notoriedade, sendo citado em livros teóricos, como Metcalf & Eddy, 2016 e von Sperling, Verbyla e Oliveira (2020). Dessa forma, passou a ser utilizado no meio acadêmico, sendo a análise de confiabilidade realizada em diversos trabalhos acadêmicos internacionais (Messaoud; Bachir; Maurice, 2013); Silva; Rosa, 2022; Ishak, 2022), principalmente avaliando sistemas de lodos ativados; e nacionais, avaliando diversas tipologias de sistemas de tratamento (Oliveira e von Sperling (2008), Silveira (2011), Alves *et al.*, (2021), Fernandes e Dias, 2021; Dantas *et al.*, 2022).

### 3.5.1 Concentração de projeto

Niku, Schroeder e Samaniego (1979) desenvolveu um método capaz de obter a concentração média de projeto, com sua variabilidade intrínseca, de maneira relacionada ao cumprimento de uma determinada concentração estipulada como padrão de lançamento com um nível de confiabilidade pré-determinado ( $1-\alpha$ ).

Niku, Schroeder e Samaniego (1979) propuseram o coeficiente de confiabilidade (CDC) pautado na aderência dos dados a uma distribuição do tipo lognormal, contudo, sem a necessidade de obtenção das propriedades dos logaritmos dos dados, permitindo o uso das propriedades de média e desvio padrão dos dados originais. O CDC é calculado por meio da seguinte equação:

$$CDC = \sqrt{Cv^2 + 1} \cdot e^{(-z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{\ln(Cv^2 + 1)})} \quad 3$$

$$m_x = (CDC) X_s \quad 4$$

Em que

CV = Coeficiente de Variação (desvio padrão dividido pela média aritmética da concentração efluente)

$Z_{1-\alpha}$  = probabilidade cumulativa da distribuição normal padronizada correspondente à não excedência ( $1-\alpha$ )

$m_x$  = concentração média do constituinte (valor de projeto);

$X_s$  = meta de qualidade ou padrão fixado por alguma legislação ou norma.

Os valores de CDC podem ser interpretados como uma mensuração da estabilidade do tratamento, quanto maior o seu valor maior a estabilidade do processo, portanto, não se trata de um indicativo da qualidade do efluente ou do desempenho da ETE avaliada.

O CDC é inversamente relacionado com o CV. Assim, sistemas com baixos valores de CDC, isto é, de elevada variabilidade da qualidade do efluente, necessitam ter concentrações efluentes de projeto menores para garantirem o cumprimento de padrões de lançamento num determinado nível de confiabilidade, comparativamente com sistemas com altos valores de CDC (Niku; Schroeder; Samaniego, 1979; Oliveira, 2006).

Ressalta-se, portanto, a importância de uma operação que viabilize uma qualidade do efluente mais estável, assim, obtendo menores valores de CV e, conseqüentemente, maiores valores de CDC, não exigindo valores tão baixos para o cumprimento das outorgas num determinado nível de confiabilidade (Oliveira; von Sperling, 2008)

No estudo de Niku, Schroeder e Samaniego (1979) foram avaliadas 37 ETEs de lodos ativados bem monitoradas e tiveram CV de DBO variando de 0,34 a 1,11 e CV de SS variando de 0,32 a 1,7.

Oliveira (2006) calculou o CDC para cada um dos parâmetros típicos de qualidade de 18 ETEs de lodos ativados. Para DBO o CV variou de 0,68 a 1,26, enquanto o CDC variou de 0,32 a 0,44.

No estudo de Messoud *et al.* (2013) foi avaliada uma única ETE com sua confiabilidade comparada anualmente. O CV de DBO variou de 0,29 a 0,65, de DQO variou de 0,32 a 0,6 e de SS variando de 0,55 a 0,93. Enquanto o CDC de DBO variou de 0,45 a 0,65, de DQO variou de 0,45 a 0,63 e de SS variando de 0,37 a 0,49.

### 3.5.2 Percentual de atendimento

De acordo Niku, Schroeder e Samaniego (1979) e Niku et al. (1981) o modelo de confiabilidade pode ser rearranjado, através da integração da função densidade de probabilidade da distribuição lognormal, para se determinar a confiabilidade futura de uma ETE em operação. Ou seja, o percentual de atendimento futuro a um padrão de lançamento de interesse (equação 5).

$$Z_{1-\alpha} = \frac{\ln X_s - \left( \ln \mu_x - \frac{1}{2} \ln(1 + CV_x^2) \right)}{\sqrt{\ln(1 + CV_x^2)}} \quad 5$$

Em que,

$Z_{1-\alpha}$  = probabilidade cumulativa da distribuição normal padronizada correspondente à não excedência  $(1-\alpha)$ ;

$X_s$  = meta de qualidade ou padrão fixado por alguma legislação ou norma;

$\mu_x$  = concentração média do constituinte;

CV = Coeficiente de Variação (desvio padrão dividido pela média aritmética da concentração efluente).

Oliveira (2006) utilizou o modelo de confiabilidade desenvolvido Niku, Schroeder e Samaniego (1979) para prever o comportamento da ETE em relação a conformidade com o padrão de lançamento, obtendo como resultado valores muito próximos do comportamento efetivamente observado, mesmo considerando dados que não atendem aos pressupostos de análises paramétricas, contanto que os dados sigam o modelo lognormal.

#### 4 DESCRIÇÃO DA ETE DE ESTUDO

A ETE Sobradinho se localiza na rua F da quadra 6 do Setor de Indústrias de Sobradinho (RA-V). Ao leste da estação, a uma distância de menos de 50 metros, há empreendimentos comerciais e industriais; e ao Norte, a uma distância de menos de 100 metros, se encontra um setor residencial, conforme apresentado na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Localização da ETE Sobradinho e limite aproximado da sua área (CAESB, 2017)

#### 4.1 ÁREA DE ATENDIMENTO

A ETE Sobradinho é responsável por tratar o esgoto sanitário do SES de Sobradinho, o qual atende as zonas urbanas das regiões administrativas de Sobradinho (RA-V) e Sobradinho II (RA-XXVI).

Sobradinho foi fundada em 1960 com propósito de abrigar a população que participava da implantação da capital e de ampliar a produção agrícola do DF. Já Sobradinho II, surgiu na década de 1990, com o intuito de receber famílias que residiam em condições irregulares e precárias no DF. Essa expansão acabou por definir um novo eixo de crescimento ao longo das rodovias DF-150 e DF-420 (CODEPLAN, 2018).

Na Figura 4.2 é apresentada a localização da ETE Sobradinho e das RAs com zonas urbanas atendidas por essa estação em relação ao Distrito Federal.

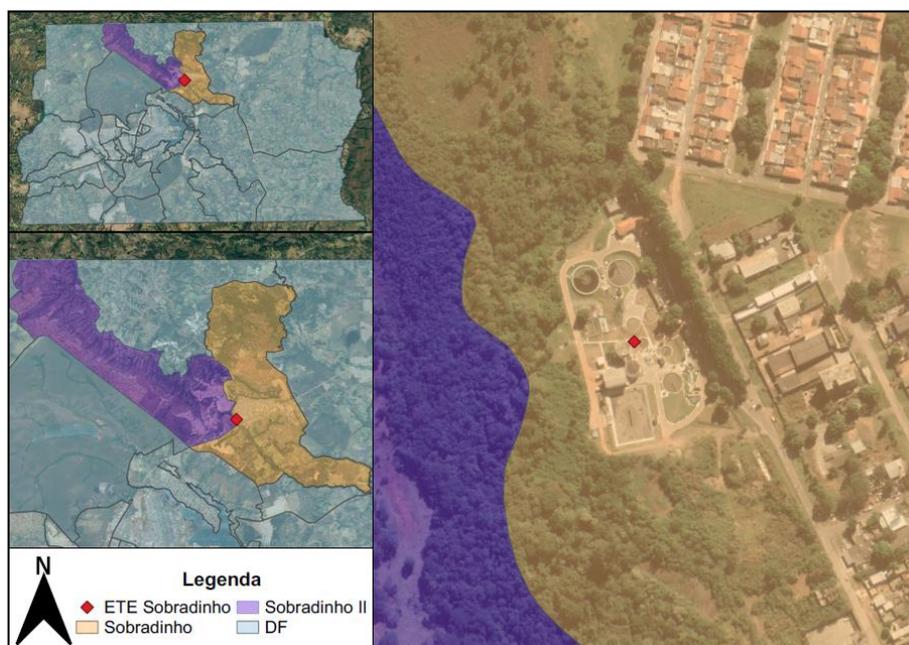


Figura 4.2 – Localização da ETE e das RAs atendidas em relação ao DF

Os números de habitantes das RAs em questão, assim como suas informações sobre a regularidade das habitações e a infraestrutura de esgotamento sanitário são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – N° de habitantes, percentual de habitações irregulares e disposição do esgoto doméstico das RAs Sobradinho e Sobradinho II. (CODEPLAN, 2013, 2018, 2022a)

<b>Região Administrativa</b>	<b>Ano</b>	<b>N° de habitantes</b>	<b>Habitações irregulares<sup>1</sup> (%)</b>	<b>Atendimento pela CAESB (%)</b>	<b>Fossa séptica (%)</b>	<b>Buraco ou Fossa Negra (%)</b>
Sobradinho	2013	63.715	14,3	83,2	9,0	7,8
	2018	62.763	15,5	79,4	9,2	11,3
	2021	73438	25,8	87,8	11,1	1,1
Sobradinho II	2013	97.466	59,4	38,9	46,3	14,8
	2018	85.574	57,3	44,8	50,0	5,1
	2021	78837	59,8	87,7	5,1	7,2
<b>Total/Média</b>	<b>2013</b>	<b>161.704</b>	<b>41,6</b>	<b>56,4</b>	<b>31,6</b>	<b>12,0</b>
	<b>2018</b>	<b>145.651</b>	<b>40,1</b>	<b>59,1</b>	<b>33,2</b>	<b>7,7</b>
	<b>2021</b>	<b>152.275</b>	<b>43,4</b>	<b>87,7</b>	<b>8,0</b>	<b>4,3</b>

**Legenda:** <sup>(1)</sup> como os dados foram obtidos a partir de pesquisas domiciliar, não há grande confiança quanto ao valor numérico dessa informação, podendo o valor real ser consideravelmente diferente.

Por meio da contextualização da evolução urbana das RAs e das informações acerca da regularidade das habitações, pode-se observar que as RAs Sobradinho e Sobradinho II não tiveram uma urbanização integralmente planejada. Embora haja registros de tentativas de regularização do projeto urbanístico da região, o crescimento demográfico foi mais intenso do que a capacidade do governo em regularizar a região e fornecer os serviços de saneamento básico.

## 4.2 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DA REGIÃO

O clima no Distrito Federal é tropical, com regiões em 3 diferentes tipologias climáticas da classificação de Köppen divididas conforme as altitudes de cada região do DF. Assim como a tipologia climática, a pluviosidade também é variável de acordo com a região, tendo total anual entre 1100mm e 1600mm com período de chuvas e de seca bem definido. Cerca de 90% da precipitação total anual costuma ocorrer nos meses mais quentes, de outubro a abril, apresentando chuvas de elevada intensidade e volume, enquanto no resto do ano as chuvas são pouco frequentes e de pequeno volume. (GDF, 2017; CODEPLAN, 2017).

Barros (2004) avaliou em profundidade o regime pluviométrico no Distrito Federal o definindo em carácter geral como dotado um período de estiagem, que ocorre nos meses de abril a setembro (outono-inverno), um período no qual são esperadas chuvas mais constantes, que vai de outubro a março (primavera-verão), sendo que abril e outubro representam os períodos de transição do chuvoso para o seco e do seco para o chuvoso,

respectivamente. Contudo, cabe destacar que a precipitação acumulada anual média do DF vem em tendência de queda nas últimas 3 décadas, promovendo mudanças no regime pluvial (CODEPLAN, 2017; CAESB, 2019).

### 4.3 SISTEMA DE TRATAMENTO

Desde 2013, após a conclusão da 1ª Etapa da reforma de expansão da ETE em 2013, o sistema de tratamento não passou por grandes alterações. A Figura 4.3 apresenta a imagem de satélite com a identificação das unidades e a Figura 4.4 apresenta o fluxo simplificado do tratamento realizado na estação.



**Legenda:** 1- By pass e Gradeamento grosso; 2- Gradeamento fino; 3- Calha Parshall; 4- Desarenadores tipo Ciclone; 5- Caixa divisora de vazão; 6.1- Decantador primário maior; 6.2- Decantadores primários menores; 7.1- Tanque Pulmão; 7.2- Reatores Aerados; 8- Decantadores Secundários; 9- Lançamento Final da ETE; 10- Digestores anaeróbios de lodo.

Figura 4.3 – Imagem de satélite da ETE Sobradinho, com identificação das unidades

A ETE Sobradinho foi dimensionada para tratar uma vazão média de 196 L/s por meio de sistema composto por: uma grade grosseira de limpeza manual; duas grades finas de limpeza mecanizada; dois desarenadores do tipo ciclone; quatro decantadores primários; e o sistema de lodos ativados convencional constituído por três reatores aerados de nível fixo, um reator aerado de nível variável e dois decantadores secundários (Figura 4.4). Cabe destacar que o decantador primário maior e o reator aerado de nível variável desempenham o papel de equalizadores da vazão afluente aos decantadores primários menores e aos reatores aerados de nível fixo, respectivamente, essas duas unidades recebem e tratam apenas

a vazão excedente à estabelecida para o funcionamento adequado das demais unidades do sistema, sendo o fluxo controlado por vertedores e comportas (CAESB, 2014, 2019).

A ETE realiza medição apenas da vazão e do volume acumulado diário do esgoto afluente, contudo, é esperado que os valores de vazão média diária afluente e efluente a ETE sejam aproximadamente iguais, tendo em vista o TDH na faixa de horas das unidades de tratamento (CAESB, 2017).

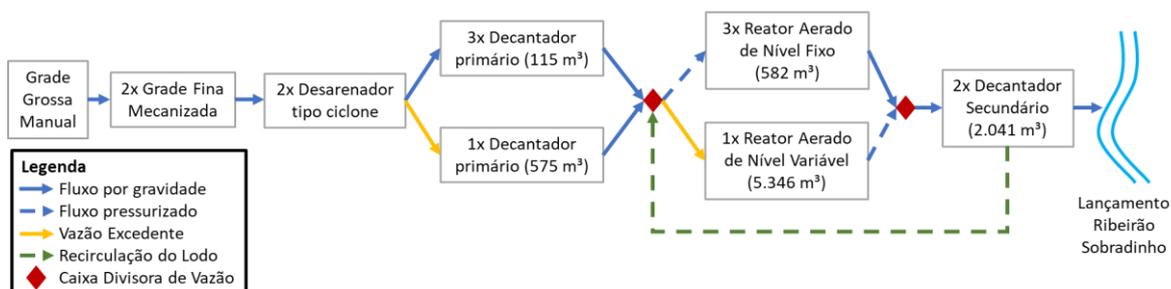


Figura 4.4 – Fluxograma ETE Sobradinho

#### 4.3.1 Tratamento Preliminar

Desde 2013 o tratamento preliminar é realizado por uma unidade de gradeamento grosso de limpeza manual seguido por duas unidades de gradeamento fino de limpeza mecanizada (operando em regime 1+1R), e dois desarenadores do tipo ciclone (CAESB, 2017).

#### 4.3.2 Tratamento Primário

O tratamento primário é realizado por meio de 4 decantadores primários, sendo: 3 menores, mais antigos e com alimentação constante; e 1 maior, construído na 1ª Etapa da reforma de ampliação da ETE, que recebe a vazão excedente à alimentação dos outros 3 decantadores primários. Essas unidades são responsáveis por remover os sólidos sedimentáveis presentes no efluente do tratamento preliminar. Os decantadores geram 2 tipos de efluentes: o líquido, que é encaminhado ao tratamento secundário; e o sólido que vai para o tratamento de lodos (CAESB, 2014, 2017).

É comum que decantadores primários possuam dispositivos para a remoção da gordura e espuma que não foram removidas no tratamento preliminar, dessa forma os decantadores primários atuam também como uma unidade de remoção de sólidos flutuantes (Jordão; Pessôa, 2014).

Segundo Jordão e Pessôa (2014), um decantador primário apresenta, tipicamente, remoção de sólidos na faixa de 40% a 60% e de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) na faixa de 25% a 35%, sendo valores inferiores a esses um indicativo de operação inadequada, sobrecarga da estação ou septicidade do esgoto afluente. Metcalf e Eddy (2016)

trazem valores mais altos tendo como referência as ETEs dos EUA, apresentando remoção de sólidos suspensos na faixa de 50 a 70% e de DBO na faixa de 25-40%

Ainda segundo Jordão e Pessôa (2014), a remoção de sólidos suspensos é função apenas da taxa de escoamento superficial aplicada, enquanto a remoção de DBO depende também do percentual solúvel da DBO no esgoto. A determinação da DBO solúvel é fundamental para a determinação da concentração de DBO teoricamente esperada no efluente do decantador primário, a qual baliza o dimensionamento do tratamento secundário.

Os principais parâmetros de dimensionamento para garantir a boa eficiência do decantador são o TDH e a taxa de escoamento superficial aplicada. O TDH tem que ser compatível com o tempo de sedimentação dos sólidos a serem removidos, ou seja, deve ser grande o suficiente para possibilitar a sedimentação dos sólidos, mesmo quando operando com a vazão máxima de projeto. Mas não pode ser elevado a ponto de proporcionar a degradação da matéria orgânica sedimentada no decantador, uma vez que essa reação ocorreria por via anaeróbia e, portanto, liberaria gases que poderiam promover a resuspensão de sólidos e a geração de odor (Jordão; Pessôa, 2014). Dessa forma, é fundamental que se tenha um controle da vazão afluyente aos decantadores a fim de que a vazão se mantenha dentro da faixa de projeto e a taxa de vazão superficial aplicada e o TDH sejam adequados para a obtenção das eficiências de remoção de sólidos e DBO desejadas.

O dimensionamento de decantadores primários é normatizado pela NBR 12209 de 2011 e possui como principais parâmetros a serem seguidos os itens apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros de dimensionamento de decantadores primários (ABNT, 2011)

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor normatizado</b>
Taxa máxima de escoamento superficial <sup>1</sup>	90m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>
TDH máximo para vazão média de projeto	3 horas
TDH mínimo para vazão máxima de projeto	1 hora
Taxa de escoamento máxima no vertedor de saída	500m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> de vertedor

**Legenda:** <sup>1</sup> quando precede sistema de lodos ativados.

Os decantadores da ETE Sobradinho são de forma circular possuem paredes de concreto impermeabilizado, remoção do lodo pelo fundo e raspadores superficiais para remoção de gorduras e óleos (CAESB, 2017). As dimensões dos 3 decantadores menores e do decantador maior são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Dimensões dos Decantadores Primários da ETE Sobradinho (CAESB, 2017)

Parâmetro	Decantador Primário Maior	Decantadores Primários Menores
Diâmetro da unidade (m)	17,00	9,00
Altura da unidade (m)	3,25	2,20
Altura da lâmina (m)	2,55 a 3,16	1,80 a 2,20

Os 3 decantadores primários menores operam com TDH constante, já o decantador primário maior recebe uma vazão variável operando com diferentes TDH a depender da vazão de esgoto afluente a ETE. O controle da divisão de vazão entre os decantadores antigos e o novo é feito unicamente por diferença do nível dos vertedores na caixa divisora de vazão (CAESB, 2017).

#### 4.3.3 Tratamento Primário Quimicamente Assistido (TPQA)

Entre junho de 2018 e dezembro de 2019 foi realizado na ETE Sobradinho o tratamento primário quimicamente assistido do esgoto, visando atenuar as reduções das eficiências do tratamento na remoção de DBO e fósforo (ADASA, 2019a). O processo consistia na adição de sulfato de alumínio na entrada do decantador primário maior, para auxiliar na floculação dos sólidos suspensos, (CAESB, 2011).

A Figura 4.5 apresenta o fluxograma simplificado do tratamento da ETE com o TPQA, enquanto a Tabela 4.4 sintetiza as principais vantagens e desvantagens do tratamento primário quimicamente assistido em relação ao convencional.

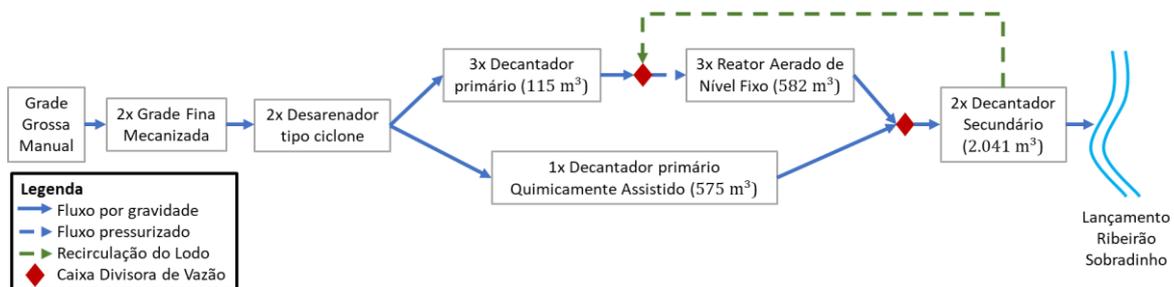


Figura 4.5 - Fluxograma da ETE Sobradinho com operação emergencial através empregando Tratamento Primário Quimicamente Assistido

Tabela 4.4 – Vantagens e desvantagens do tratamento primário quimicamente assistido em relação ao convencional. (Jordão; Pessoa, 2014).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior eficiência de remoção de sólidos (70 a 85%);</li> <li>- Maior eficiência de remoção de DBO (45% a 55%);</li> <li>- Possibilidade de operação com taxa de vazão superficial mais elevada;</li> <li>- Passível de realizar remoção de fósforo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custos de aquisição e operação dos químicos;</li> <li>- Maior complexidade operacional;</li> <li>- Potencial tóxico aos microorganismos do tratamento secundário, em virtude do residual de químicos no efluente líquido</li> <li>- Maior geração de lodo primário (entre 15 e 30% a depender das características operacionais);</li> <li>- Maior custo de operação associado ao tratamento de lodo.</li> </ul>

#### 4.3.4 Tratamento Secundário

O tratamento secundário da ETE é realizado por um sistema de lodos ativados convencional, ou seja, um conjunto de: reator biológico aerado, no qual a matéria orgânica será degradada por microrganismos, e decantadores secundários, os quais objetivam a remoção dos sólidos sedimentáveis do efluente do reator biológico. O efluente líquido dos decantadores secundários é lançado no ribeirão Sobradinho, enquanto a fração sólida tem parte de seu volume recirculado para o reator biológico, a fim de manter a relação ótima de alimento por microrganismo, e parte encaminhada ao tratamento de lodos (CAESB, 2011, 2014). A Tabela 4.5 sintetiza as principais vantagens e desvantagens do processo de lodos ativados no tratamento secundário.

Tabela 4.5 – Vantagens e Desvantagens do processo de lodos ativados (Jordão e Pessôa, 2014)

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
- Maior eficiência de remoção de sólidos (85 a 95%);	- Maior complexidade e cuidados operacionais, devido a maior sensibilidade as mudanças de carga orgânica;
- Maior eficiência de remoção de DBO (85% a 95%);	- Necessidade de completo controle de laboratório;
- Maior flexibilidade de operação;	- Maior custo de operação devido ao processo de aeração.
- Menor área ocupada em relação a sistemas de lagoas e filtração biológica.	

Por meio da Figura 4.3 pode-se observar os quatro reatores providos de aeração superficial, um maior com formato retangular (Tanque Pulmão) e três menores com formato circular, além dos dois decantadores secundários de formato circular.

Os três reatores aerados circulares operam com capacidade plena, enquanto o tanque pulmão possui vazão e TDH variável conforme a vazão afluente a ETE. As dimensões e volume do tanque pulmão são apresentados na Tabela 4.6 e as dimensões dos decantadores secundário na Tabela 4.7. Não foram encontradas informações sobre as dimensões dos reatores aerados de formato circular.

Tabela 4.6 – Dimensões e volume do tanque pulmão (CAESB, 2017)

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores</b>
Largura da base (m)	20,30
Comprimento da base (m)	35,30
Área de base (m <sup>2</sup> )	716,59
Largura do topo (m)	34,10
Comprimento do topo (m)	49,10
Área de topo (m <sup>2</sup> )	1674,31
Altura útil do tanque (m)	4,60
Volume do Tanque (m <sup>3</sup> )	5.345,58

Tabela 4.7 - Dimensões dos decantadores secundários (CAESB, 2017)

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro (m)	25,00
Altura da unidade (estrutura) (m)	4,00 a 4,96
Altura da lâmina (m)	4,00

Sendo o dimensionamento de sistemas de lodos ativados normatizado no Brasil pela NBR 12209 de 2011. A Tabela 4.8 apresenta os principais parâmetros de dimensionamento de sistemas de lodos ativados estipulados pela NBR.

Tabela 4.8 – Parâmetros de dimensionamento de sistemas de lodos ativados (ABNT, 2011)

<b>Parâmetros Reator Aeróbio</b>	<b>Valor normalizado</b>
Idade do Lodo (dias)	4 a 15 <sup>(1)</sup>
Relação alimento/microorganismos (kg de DBO <sub>5</sub> aplicada/kg SSV/dia)	0,2 a 0,7 <sup>(1)</sup>
Concentração de sólidos no reator (mg/L)	Entre 1500 e 4500
Massa de oxigênio a ser disponibilizada	≥1,5*DBO <sub>5</sub>
<b>Parâmetros decantador secundário</b>	<b>Valor normalizado</b>
Taxa de escoamento superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /dia)	28 <sup>(2)</sup> ; 16 <sup>(3)</sup>
Taxa de aplicação de sólidos (kg de SS/m <sup>2</sup> /dia)	≤144 <sup>(2)</sup> ; ≤120 <sup>(3)</sup>
TDH mínimo para vazão média (horas)	1,5
Taxa de escoamento máxima no vertedor de saída (m <sup>3</sup> /dia/m de vertedor)	290

**Legenda:** <sup>(1)</sup> Sistema de taxa convencional; <sup>(2)</sup> idade do lodo inferior a 18 dias ou relação A/M superior a 0,15 kg de DBO<sub>5</sub> aplicada/kg SSV/dia; <sup>(3)</sup> idade do lodo superior a 18 dias ou relação A/M inferior a 0,15 kg de DBO<sub>5</sub> aplicada/kg SSV/dia.

#### 4.3.5 Tratamento de Lodos

Desde 2013 o tratamento de lodos da ETE é realizado por digestores anaeróbios seguidos de adensamento por uma única centrífuga decanter (CAESB, 2017). O efluente líquido da centrífuga retorna ao início do processo de tratamento da ETE, enquanto o lodo excedente é encaminhado à Unidade de Gerenciamento de Lodo, instalada na ETE Melchior (Adasa, 2019a).

O digestor anaeróbio visa à estabilização parcial ou total do lodo por processos biológicos em condições anaeróbias. Além disso, a digestão anaeróbia do lodo objetiva a redução do seu volume sólido, a modificação de suas características de forma a favorecer a redução de umidade e a redução da concentração de patógenos (Jordão; Pessôa, 2014). A eficiência do digestor costuma ser avaliada com base na redução da concentração de sólidos voláteis, sendo a redução da ordem de 30 a 60% a depender das condições de projeto e operacionais da unidade (NBR 12209/2011).

Quando corretamente executado o processo de digestão anaeróbia produz biogás, composto por uma fração de 65 a 70% de metano, um gás combustível passível de ser

aproveitado como fonte de energia (Jordão; Pessôa, 2014). Na ETE Sobradinho não é realizado o aproveitamento do gás (Adasa, 2019a) sendo, portanto, essencial a realização da sua queima para evitar riscos de explosões na estação e reduzir o impacto ambiental da sua liberação na atmosfera (Jordão; Pessôa, 2014).

Por meio da Figura 4.3 pode-se observar que os dois digestores possuem formato circular e cobertura. Os digestores não possuem sistema de aquecimento ou homogeneização do lodo (CAESB, 2017) e não é realizada a queima do biogás produzido (Adasa, 2019b).

Tabela 4.9 – Dimensões dos Digestores Anaeróbios (CAESB, 2017)

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores</b>
Altura útil dos tanques (m)	7,46 <sup>(1)</sup>
Diâmetro de cada tanque (m)	15,10
Área em planta por tanque (m <sup>2</sup> )	179,08
Volume útil por tanque (m <sup>3</sup> )	1030 <sup>(2)</sup>

**Legenda:** <sup>(1)</sup> A altura informada considera apenas o valor relativo à coluna líquida. Não está inclusa altura relativa ao cone de fundo; <sup>(2)</sup> Valor menor que a capacidade teórica dos biodigestores em função do acúmulo de sólidos em seu interior.

O dimensionamento de digestores anaeróbios é normatizado pela NBR 12209 (ABNT, 2011), sendo os principais parâmetros a serem seguidos nessas condições apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Principais parâmetros de dimensionamento de digestores anaeróbios (ABNT, 2011)

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor normatizado</b>
Tempo de digestão (dias)	$\geq 45^{(1)}$
Densidade de potência do dispositivo de homogeneização de lodo s/ recirculação (W/m <sup>3</sup> )	$\geq 1^{(1)}$
Concentração de sólidos no reator (mg/L)	Entre 1500 e 4500
Inclinação de fundo (y:x)	1:6

**Legenda:** <sup>(1)</sup> Digestor convencional não homogeneizado.

O lodo digerido ainda possui um elevado teor de umidade, da ordem de 96%, sendo necessária sua adequada desidratação a fim de viabilizar economicamente o seu transporte (Jordão; Pessôa, 2014).

As centrífugas promovem o adensamento mecânico forçado do lodo, sendo uma tendência no adensamento de lodo no Brasil devido a sua simplicidade operacional e qualidade de adensamento do lodo, com umidade final entre 65 e 75%. Ressalta-se que a desidratação por meio de centrífugas requer o condicionamento químico do lodo para

melhorar a sua desidratabilidade e a qualidade do clarificado, usualmente são utilizados para isso polieletrólitos catiônicos.

#### **4.4 HISTÓRICO DE ADEQUAÇÕES E REFORMAS DA ETE SOBRADINHO**

A ETE Sobradinho foi inaugurada em 1967, visando atender uma população de 40.000 habitantes e uma vazão de projeto média de 56 L/s. Devido ao aumento da demanda pelo serviço na região, em 1993 a ETE modificou seu processo de tratamento, passando a utilizar também o tratamento primário quimicamente assistido (TPQA) dos esgotos sanitários (CAESB, 2011).

Em 2010 a ETE recebia esgotos de uma população superior a qual havia sido projetada, de forma que em 2011 se iniciou a 1ª Etapa da reforma de expansão da estação, passando a atender em agosto de 2013 uma população de 146.900 habitantes e possuir uma capacidade de tratamento média de projeto de 196 L/s. Com a ampliação o processo de tratamento químico se tornou desnecessário e deixou de ser realizado (CAESB, 2014).

Em junho de 2018 o reator biológico aerado de nível variável, responsável por mais de 60% da capacidade hidráulica de tratamento biológico da ETE, foi desativado para reparos e se adotou no decantador primário de maior volume, em carácter emergencial, o tratamento primário quimicamente assistido (TPQA), utilizando sulfato de alumínio como auxiliar de floculação seguido diretamente da decantação secundária, enquanto os demais decantadores primários mantiveram o tratamento convencional seguido pelo tratamento biológico nos reatores de aeração de nível fixo e decantação secundária. Com a conclusão da reforma do reator aerado de nível variável, em janeiro de 2020, retomou-se a operação deste e se interrompeu o TPQA, implementando ainda, melhorias no sistema de monitoramento da ETE, passando a monitorar a concentração de OD e SS nos reatores aerados através de sondas contínuas. Além disso, foi feita a redistribuição dos aeradores no reator reformado. A Tabela 4.11 sintetiza as informações sobre as condições de operação e as mudanças realizadas na ETE Sobradinho no período de 2010 a 2020:

Tabela 4.11 - Histórico de condições de operação e mudanças do tratamento da ETE Sobradinho no período de 2010 a 2020

Ano	Condições de operação e Mudança do tratamento
2010 <sup>(1)</sup>	Operação em sobrecarga ultrapassando em 42% a capacidade de projeto da ETE, levando a menores eficiências de remoção de DBO e SS e ao consequente impacto ambiental no Ribeirão Sobradinho. Realização de modificações operacionais e implementação do tratamento primário quimicamente assistido, aumentando a remoção de DBO e SS a custo da maior geração de lodo e maiores gastos com produtos químicos.
2013 <sup>(2)</sup>	Operação em sobrecarga ultrapassando, em média, 200% da capacidade de projeto nos meses de janeiro a julho. Em agosto foi concluída a 1ª etapa de expansão da ETE, passando a operar utilizando, em média, menos de 50% da sua capacidade hidráulica.
2015 <sup>(3)</sup>	Um decantador primário e um decantador secundário estavam fora de operação; não era realizado o aproveitamento nem a queima do biogás gerado nos reatores anaeróbios.
2018 <sup>(4)</sup>	Em junho o principal reator biológico aerado (Tanque pulmão) tem sua operação paralisada devido a danos na geomembrana de impermeabilização. Foi realizada adaptação emergencial da ETE passando a utilizar TPQA para aumentar a remoção de matéria orgânica e fósforo, por meio da precipitação química, com consequente maior geração de lodo e custo operacional.
2019 <sup>(5)</sup>	Operação com aproximadamente 40% da vazão de projeto. Ainda não é realizado o aproveitamento nem a queima do biogás gerado. Previsão do tanque pulmão voltar a operar, e o TPQA ser desativado a partir do dia 4 de dezembro.
2020 <sup>(6)</sup>	Inauguração de novas estações elevatórias de esgoto bruto na região de atendimento da ETE Sobradinho, aumentando sua vazão de esgoto bruto afluente; retorno da operação do tanque pulmão com modificação do sistema de aeração, implantando novos aeradores e melhorando a distribuição desses ao longo da área superficial do reator; implementação de sensores de OD e SS nos reatores aerados, com coleta de informações em tempo real; correção da posição de leitura da vazão na calha Parshall.

**Legenda:** <sup>(1)</sup> (CAESB, 2011); <sup>(2)</sup> (CAESB, 2014); <sup>(3)</sup> (Adasa, 2015); <sup>(4)</sup> (Adasa, 2019a); <sup>(5)</sup> (Adasa, 2019b);

<sup>(6)</sup> Conversas com o responsável pela operação da ETE em visita técnica.

Além disso cabe destacar que a ETE Sobradinho possui projeto básico aprovado para realização da sua 2ª Etapa de Expansão, prevendo uma vazão média de projeto de 410 L/s (CAESB, 2017). Além disso a 1ª fase dessa 2ª Etapa de expansão já teve seu projeto executivo aprovado, prevendo uma vazão média de 325 L/s, com início das obras da 1ª fase previsto para 2018 (CAESB, 2017). Contudo, o Plano de expansão entrou em processo de reanálise em outubro de 2019, devido a folga hídrica da ETE, pois esta operou em 2019 com aproximadamente 40% da sua vazão de projeto de 196 L/s (Adasa, 2019b).

#### 4.5 CORPO HÍDRICO RECEPTOR: RIBEIRÃO SOBRADINHO

O Ribeirão Sobradinho tem sua nascente no Morro do Canastra, próximo da região urbana de Sobradinho. Ao longo do seu curso, recebe a contribuição pela margem esquerda do córrego Capão Comprido e pela margem direita dos córregos Brejo do Lobo, Paranoazinho, Capão Grande, Indaiá e Capão da Erva (Figura 4.6). O Ribeirão Sobradinho é afluente do rio São Bartolomeu, que pertence à bacia hidrográfica do Rio Paranaíba (Adasa; Engeplus, 2020).

Parte significativa da bacia do Ribeirão Sobradinho é ocupada por parcelamentos urbanos, especialmente na região da sua cabeceira e às margens dos córregos Paranoazinho e Capão Comprido, onde está a RA de Sobradinho. Na sua porção intermediária predominam as ocupações agrícolas, e no seu trecho final vem ocorrendo a intensificação de parcelamentos urbanos, como o Itapoã e os condomínios circunvizinhos (CAESB, 2013).

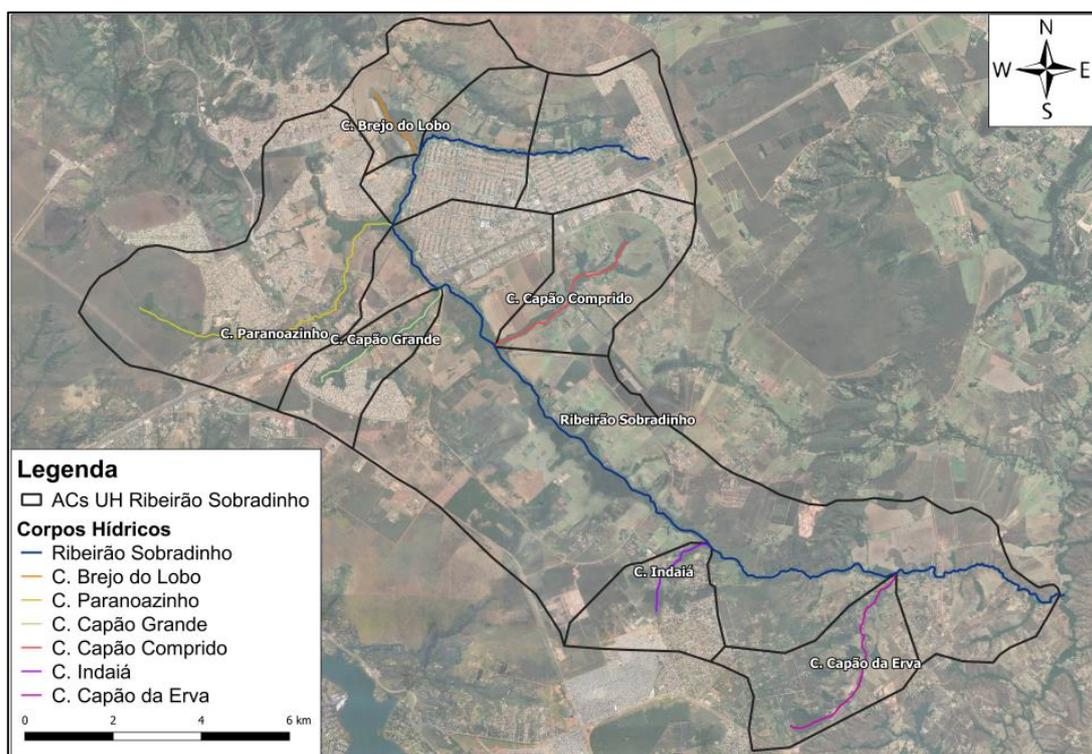


Figura 4.6 – Bacia Hidrográfica do Ribeirão Sobradinho com indicação e delimitação das áreas de contribuição dos seus principais afluentes

A ETE Sobradinho lança seu efluente tratado na margem esquerda do ribeirão Sobradinho desde o início de sua operação em 1967, embora o ponto de lançamento tenha sofrido pequenas alterações ao longo dos anos, o lançamento se manteve a cerca de 1 km após a confluência do córrego Paranoazinho (CAESB, 2013).

O Ribeirão Sobradinho é um corpo d'água de classe 3, dotado de usos múltiplos (CRHDF, 2014). As águas dessa classe podem ser utilizadas para os seguintes fins: abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; pesca amadora; recreação de contato secundário e dessedentação de animais (Resolução CONAMA nº 357 de 2005).

Na Tabela 4.12 são apresentados alguns dos principais parâmetros a serem atendidos em corpos hídricos de classe 3 que costumam ser impactados pelo lançamento de esgotos domésticos (Resolução CONAMA nº 357 de 2005).

Tabela 4.12 – Principais parâmetros de enquadramento de águas doces de classe 3 (Fonte: Resolução CONAMA nº 357 de 2005).

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor Normalizado</b>
Materiais flutuantes, óleos, graxas, substâncias que comuniquem gosto ou odor, resíduos sólidos objetáveis	Virtualmente Ausentes
Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)	2.500 <sup>(1)</sup> ; 1.000 <sup>(2)</sup> ; 4.000 <sup>(3)</sup>
DBO <sub>5</sub> a 20°C (mg de O <sub>2</sub> /L)	≤10
OD (mg/L)	≥4
Turbidez (UNT)	≤100
Cor Verdadeira (mg Pt/L)	≤75
pH	6 a 9
Fósforo total (mg/L)	0,15 mg/L
Nitrato (mg/L)	10,0 mg/L
Nitrito (mg/L)	1,0 mg/L
Nitrogênio amoniacal total	13,3 mg/L, para pH ≤7,5
	5,6 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0
	2,2 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5

**Legenda:** <sup>(1)</sup> Recreação de contato secundário; <sup>(2)</sup> Dessedentação de animais; <sup>(3)</sup> Demais usos.

O ribeirão Sobradinho, possui vazão média de longo prazo, variando de 1,21 m<sup>3</sup>/s em setembro à 3,54 m<sup>3</sup>/s em março (Adasa; Engeplus, 2020). Assim, a baixa capacidade de diluição do ribeirão nos meses de seca, exige que sua outorga de lançamento tenha uma concentração máxima de DBO mais restritiva, buscando não comprometer sua qualidade além dos limites de seu enquadramento.

O estudo de autodepuração do Ribeirão Sobradinho, realizado pela CAESB (2013), fundamentou a emissão da outorga de lançamento de efluente da ETE Sobradinho, a qual prevê apenas as diretrizes de vazão máxima de 196 L/s e DBO máxima de 63 mg/L até 2017 e de até 42mg/L para o período de 2018 a 2019 (Adasa, 2014). Havendo a outorga sido prorrogada até dezembro de 2024 pela resolução nº7 da Adasa (Adasa, 2019c).

A despeito da outorga de lançamento, o Ribeirão Sobradinho é conhecido por seu histórico de danos ambientais, tendo sido realizado ao longo de 2012 e 2013 um grupo de trabalho envolvendo CAESB, Adasa, SLU, IBRAM, TERRACAP, Administração de Sobradinho e a sociedade organizada em prol da sua recuperação ambiental. Segundo o relatório de diagnóstico desse grupo de trabalho, o Ribeirão Sobradinho apresenta problemas que vão desde o lançamento clandestino de esgoto doméstico e resíduos de caminhão limpa fossa, até problemas com despejos de resíduos sólidos urbanos, captações de água irregulares e lançamento de efluente com qualidade indevida pela ETE Sobradinho, nos momentos em que essa se encontrou em sobrecarga ou com problemas operacionais entre 2010 e 2012. Dessa forma, para a recuperação ambiental do corpo hídrico é fundamental a realização de uma gestão integrada composta por diversas ações, dentre elas o planejamento e viabilização de uma solução definitiva para o esgotamento sanitário da região (GDF, 2013).

#### **4.6 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO DE CASO DA ETE SOBRADINHO**

O estudo proposto, objetivando avaliar estatisticamente o desempenho, confiabilidade e sazonalidade da ETE sobradinho ao longo do tempo se mostra pertinente em vista da inexistência de outros trabalhos avaliando o desempenho da ETE Sobradinho no nível de profundidade proposto, assim como sua confiabilidade e a interferência da sazonalidade. Além disso, tanto a ETE como sua região de atendimento passaram por mudanças ao longo do tempo e é esperado que se modifiquem de forma expressiva ao longo dos próximos anos com a implementação dos novos empreendimentos urbanísticos previstos para a região (Adasa, 2019b).

Ressalta-se ainda a aplicabilidade prática do estudo como fonte de informação que poderá auxiliar a CAESB na interpretação dos impactos das alterações e otimizações realizadas no seu sistema de tratamento por meio do melhor entendimento do desempenho, sazonalidade e confiabilidade do tratamento da ETE Sobradinho ao longo do tempo. Além de auxiliar a sociedade civil organizada, os órgãos ambientais e o comitê de bacias hidrográficas do DF no entendimento da ETE Sobradinho e de seus impactos sobre o Ribeirão Sobradinho.

## 5 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida para este trabalho foi constituída pelas seguintes atividades:

- Avaliação e pré-processamento dos dados fornecidos pela CAESB;
- Estatística Descritiva e análise de desempenho;
- Avaliação da interferência da sazonalidade e afluência de águas pluviais à ETE;
- Avaliação da conformidade da ETE em relação a sua outorga e outros padrões de lançamento de efluentes;
- Análise de confiabilidade da ETE em relação a sua outorga e outros padrões de lançamento de efluentes.

As atividades são apresentadas detalhadamente nos itens 5.1 à 5.5.

### 5.1 AVALIAÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS FORNECIDOS PELA CAESB

A primeira etapa de avaliação e pré-processamento dos dados fornecidos consistiu na contabilização do número de dados disponíveis de cada parâmetro e ponto de amostragem (afluente e efluente) em relação ao esperado, calculando ainda o percentual de dados fornecidos em relação ao esperado com base no cronograma de monitoramento definido para a ETE.

A CAESB forneceu dados de volume acumulado diário de esgoto afluente à ETE Sobradinho no período de janeiro de 2017 a outubro de 2023, obtidos a partir de sondas de nível na calha parshall, possibilitando o cálculo da vazão média diária nesse período.

Já os dados de concentração dos parâmetros de qualidade do esgoto foram fornecidos para os pontos de entrada e saída da ETE Sobradinho, pontos dotados de amostradores automáticos configurados para a coleta de amostras compostas com alíquotas proporcionais a vazão típica de cada hora do dia. O monitoramento avaliou os principais parâmetros de qualidade de ETEs, isto é: pH, SS, DBO, DQO, NT, PT, *E. Coli*, além de formas específicas de nitrogênio ( $\text{NH}_3$ ) e fósforo ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Os dados contemplam toda a frequência de monitoramento do período de janeiro de 2017 a outubro de 2023, sendo informados os dias de cada análise.

#### 5.1.1 Limites de Detecção Instrumentais e Analíticos

O segundo processo do tratamento de dados foi a análise dos limites de detecção dos métodos empregados (LDM). Os limites foram estipulados pelo laboratório da CAESB para

alguns dos parâmetros, estando os valores apresentados na Tabela 5.1 juntamente com a referência do método analítico adotado.

Tabela 5.1 – Limite de detecção dos métodos de análise de esgoto conforme o parâmetro e método analítico empregado (Fonte: CAESB, 2021)

<b>Parâmetro</b>	<b>Referência do método</b>	<b>Faixa de trabalho</b>
DBO	SMWW - 23 <sup>a</sup> ed. - 5210 D	> 2mg/L
DQO	Merck 114560/ Merck 114541	> 10mg/L
Fósforo Total	SMWW - 23 <sup>a</sup> ed. - 4500-P.B 5; 4500-P.D	0,05-2,00mg/L
Nitrogênio Total	Merck 114537	0,5-150mg/L

Em posse dos valores de referência do laboratório da CAESB foi analisada a ocorrência de dados fora das faixas de trabalho para esses parâmetros. Não foram informados os LDM dos demais parâmetros, sendo no caso desses avaliado apenas a recorrência de valores como máximos ou mínimos, quando recorrentes os valores foram considerados como os LDM.

As ocorrências de valores iguais aos mínimos dos LDM foram substituídas pela metade do seu valor. Já os valores iguais aos máximos dos LDM foram apenas mantidos, em decorrência da impossibilidade de se estimar o quão maiores que o LDM eles foram. Esses procedimentos são alternativas simples para, quando na ocorrência de valores fora dos LDM, aproximar os resultados das medidas de tendência central e dispersão em relação a realidade (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

### **5.1.2 Avaliação de dados inconsistentes ou atípicos (*Outliers*)**

Como dito anteriormente, no item 3.3.1, os efluentes domésticos possuem naturalmente elevada variabilidade de qualidade, sendo recorrente valores inconsistentes ou atípicos em relação ao conjunto de dados disponível, dificultando a identificação e eliminação dos dados que sejam decorrentes de falhas amostrais ou analíticas.

No presente estudo foi realizada a representação de todo o intervalo de dados, sendo considerados como impropriedades os dados apenas quando encontradas evidências de que se tratou de erros na coleta ou análise de amostras. Assim, na indisponibilidade do diário de operação, buscou-se estruturar uma metodologia para eliminar apenas os dados com forte discrepância ao esperado, se pautando em 3 análises para sua identificação:

- Discrepância em relação ao significado físico dos parâmetros (DBO>DQO, SS>ST; NH<sub>3</sub>>NT; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>>PT);

- Ocorrência de concentrações efluentes superiores às concentrações afluentes;
- Cálculo de limites extremos “*far out*” pelo método de Tukey *et al.* (1977), também conhecido como método da amplitude interquartis;

Os dados identificados pelos 2 últimos processos acima passaram ainda por uma avaliação quanto a ocorrência de vazões atípicas e a ocorrência simultânea de mais de um parâmetro com essa característica (concentração acima ou abaixo do esperado), em caso positivo os dados foram conservados, caso contrário foram excluídos das demais análises. A Figura 5.1 traz o fluxograma da metodologia adotada:

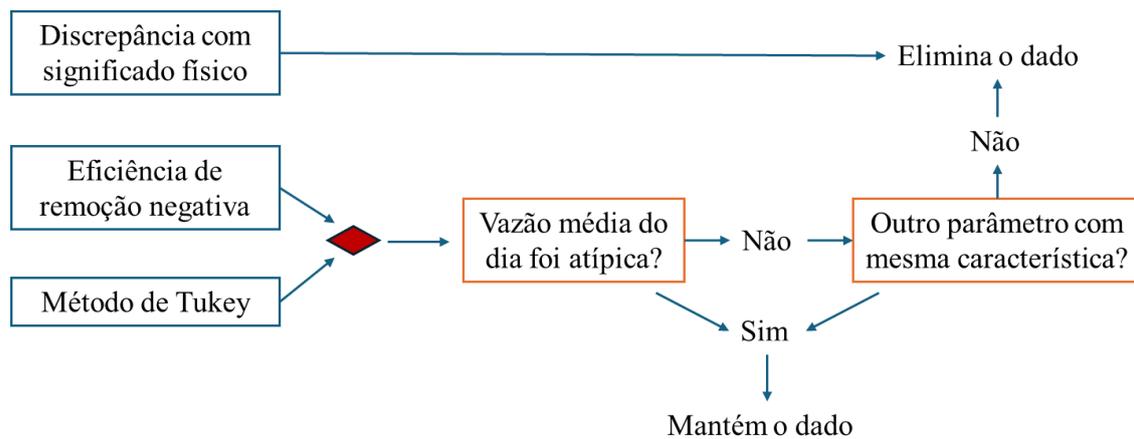


Figura 5.1 – Fluxograma da metodologia de análise de consistência, detecção e exclusão de outliers

## 5.2 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E ANÁLISE DE DESEMPENHO

A avaliação da tendência central dos dados foi feita por meio de média aritmética, mediana e média geométrica, com exceção dos dados de *E. Coli* que foram avaliados exclusivamente por mediana e média geométrica, em virtude das distorções da média promovidas por seus elevados valores e variações. Já as medidas de dispersão foram descritas por meio da amplitude, amplitude interquartis, desvio padrão, coeficiente de variação e erro padrão. Foram ainda calculados os coeficientes de assimetria. As estatísticas descritivas foram apresentadas em forma de tabelas para cada um dos parâmetros e conforme: os anos, no caso da vazão e das concentrações afluentes; os períodos operacionais da ETE, no caso das concentrações efluentes e as eficiências de remoção.

Os dados de concentração afluentes tiveram as estatísticas descritivas apresentadas em forma de tabelas para cada um dos parâmetros e em cada ano, sendo ainda apresentados gráficos de série temporal de todo o período dos dados fornecidos, e os diagramas de caixas, conforme os anos. As distribuições de frequência das concentrações dos anos foram comparadas entre si por meio da aplicação do teste de Kruskal-Wallis e, quando obtidas

diferenças significativas, através do teste post-hoc de Dunn, ambos considerando níveis de significância ( $\alpha$ ) de 5%. Além disso, as concentrações afluentes observadas, levando em conta a totalidade dos dados do período, foram comparadas com os valores de esgotos domésticos afluentes a outras ETEs: com tratamento por sistema de lodos ativados no Brasil, através do trabalho de Oliveira e von Sperling (2005) em que se avaliou 11 ETEs de lodos ativados do Sudeste Brasileiro; com esgotos domésticos no Brasil, de acordo com von Sperling (2014), Jordão e Pessôa (2014) e Oliveira (2006); e no mundo, através de Metcalf e Eddy (2016).

Conforme descrito no item 4.3, no intervalo temporal dos dados fornecidos ocorreu a paralisação da operação do Tanque Pulmão para reforma, que durou de junho de 2018 até dezembro de 2019 (Adasa, 2019a). Segundo os operadores da estação, no fim de maio de 2018 o tratamento primário quimicamente assistido (TPQA) passou a ser realizado na ETE, de forma que há indícios de que o tanque pulmão começou a apresentar problemas no início de maio ou pouco antes disso. Não foi encontrado em nenhum documento a data exata da identificação dos problemas e da paralisação da operação do tanque pulmão. Por se tratar de uma das principais unidades da ETE, representando mais de 60% da capacidade hidráulica de tratamento biológico de projeto da ETE, os dados do efluente e suas respectivas estatísticas descritivas foram divididos em 3 intervalos temporais:

- Antes da Reforma (AR): Período entre janeiro de 2017 e abril de 2018, em que se operava com sistema de lodos ativados de taxa convencional;
- Em Reforma (R): Período entre maio de 2018 e dezembro de 2019, em que o tanque pulmão foi retirado de operação e foi adotada uma operação mista de sistemas de lodos ativados de taxa convencional e TPQA seguida de decantação secundária;
- Depois da Reforma (DR): Referente ao período após dezembro de 2019, em que se teve retomada da operação do tanque pulmão com melhorias na distribuição dos seus aeradores, além da implementação de sondas de monitoramento da concentração de SS em todos os reatores aerados, sendo interrompido o processo de TPQA.

Assim, em virtude das diferenças dos sistemas de tratamento e seus impactos sobre a qualidade do efluente, ao invés da divisão dos dados de concentrações efluentes conforme os anos, se adotou a divisão conforme os períodos de operação da ETE (AR, R e DR). As estatísticas descritivas de cada parâmetro foram apresentadas em tabelas, sendo apresentados também os diagramas de caixa. As distribuições de frequência das concentrações efluentes de cada período da ETE foram comparadas entre si por meio da aplicação do teste de

Kruskal-Wallis e, quando obtidas diferenças significativas, através do teste post-hoc de Dunn, ambos considerando níveis de significância ( $\alpha$ ) de 5%. Além disso, as concentrações efluentes observadas no período AR e DR foram comparadas com os valores de esgotos domésticos efluentes à outras ETEs de lodos ativados no Brasil, através dos trabalhos de Oliveira e von Sperling (2005), von Sperling (2014), Jordão e Pessôa (2014) e Oliveira (2006); enquanto as concentrações efluentes observadas no período R foram comparadas às de ETEs brasileiras com TPQA, através de von Sperling (2014).

A avaliação do desempenho da ETE foi feita por meio do cálculo de eficiência de remoção para cada par de dados (afluente e efluente) de concentração dos parâmetros, visando obter a distribuição das eficiências da ETE nos momentos avaliados. Assim como as concentrações efluentes, as estatísticas descritivas das eficiências de remoção foram apresentadas em tabelas, sendo apresentados também os gráficos de diagramas de caixas de cada um dos parâmetros, em todos os casos as informações foram divididas conforme os períodos de operação da ETE. As eficiências de remoção obtidas nos períodos AR e DR foram comparadas com os valores de esgotos domésticos efluentes à outras ETEs de lodos ativados no Brasil, através dos trabalhos de Oliveira e von Sperling (2005), von Sperling (2014), Jordão e Pessôa (2014) e Oliveira (2006); enquanto as concentrações efluentes observadas no período R foram comparadas às de ETEs brasileiras com TPQA, através de von Sperling (2014).

### **5.3 AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DA SAZONALIDADE E AFLUÊNCIA DE ÁGUAS PLUVIAIS**

Essa etapa metodológica se divide em duas: a avaliação do comportamento pluvial na região de atendimento da ETE Sobradinho, determinando o período de chuvas e de seca; e a realização de análises estatísticas visando verificar a interferência da sazonalidade sobre a vazão, qualidade do esgoto afluente, efluente e eficiências de remoção. Os processos metodológicos realizados são detalhados nos subtópicos a seguir.

#### **5.3.1 Determinação do período de chuvas**

Visando verificar a interferência da sazonalidade por meio da afluência indevida de águas pluviais na rede coletora de esgoto sanitário, primeiramente se avaliou o regime de chuvas na área de atendimento da ETE.

Foram utilizados apenas os dados da estação pluviométrica localizada na própria ETE Sobradinho (código ANA: 01547015), em virtude desta estação estar próxima ao centro da área de atendimento da ETE, estando as demais estações pluviométricas da região fora ou

no limite da região de atendimento. Além disso, essa foi a única estação com baixa frequência de falhas no monitoramento nos anos de 2017 a 2023, período dos dados fornecidos pela CAESB. Assim, a medição da chuva na estação pluviométrica da ETE Sobradinho foi considerada como representativa para a região de atendimento da ETE.

As distribuições de frequência das precipitações acumuladas mensais foram analisadas visualmente por meio de diagramas de caixas e comparadas através do teste de Kruskal-Wallis e do teste post-hoc de Dunn, ambos considerando níveis de significância ( $\alpha$ ) de 5%. A partir dos resultados foram definidos os meses do período de chuvas e do período de seca da região.

### **5.3.2 Análise estatística da interferência da sazonalidade no desempenho da ETE Sobradinho**

Após a definição do período de chuvas e de seca, os dados de vazão e os de concentração afluente, concentração efluente e eficiência de remoção de cada um dos parâmetros foram divididos conforme os períodos operacionais da ETE (AR, R e DR) e a sazonalidade (período de seca e de chuvas), sendo apresentados seus respectivos diagramas de caixa.

A existência de diferenças entre a vazão afluente à ETE conforme a sazonalidade foi avaliada inicialmente por meio da plotagem conjunta das séries temporais de precipitação acumulada e vazão média afluente a ETE. Buscando verificar a existência de correlação entre a precipitação acumulada e a vazão afluente à ETE foram elaborados diagramas de dispersão e realizados testes de correlação de Spearman, com nível de significância de 5%. Destaca-se que o coeficiente de Spearman não tem pressupostos lineares, sendo possível utilizar ele para verificações de relações não lineares entre os parâmetros (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020).

Além disso, calculou-se o incremento máximo de vazão promovido pela afluência indevida de águas pluviais no SES através da metodologia adotada por Tsutiya e Bueno (2004), isto é, o cálculo do aumento percentual da vazão máxima obtida no período de chuvas ( $Q_{m\acute{a}x. chuvas}$ ) em relação à vazão máxima de período seco (QMPS), dado pela equação 6.

$$\text{Percentual de incremento máximo} = \frac{Q_{m\acute{a}x. chuvas} - QMPS}{QMPS} * 100 \quad 6$$

No intuito de avaliar se ocorreu uma mudança significativa da quantidade ou qualidade do esgoto afluente a ETE conforme a sazonalidade, foram realizados testes de Mann-Whitney com nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%, comparando os dados de vazão e

concentração de cada parâmetro do esgoto afluente no período de seca com os do período de chuvas em cada um dos períodos operacionais da ETE.

Analogamente, visando determinar se a afluência de águas pluviais impactou na qualidade do efluente da ETE e/ou nas eficiências de tratamento, foi avaliada a existência de diferenças sazonais significativas entre as concentrações no efluente e as eficiências de remoção da ETE para cada um dos parâmetros de qualidade, conforme o período operacional da ETE, também por meio de testes de Mann-Whitney com nível de significância de 5%.

#### **5.4 AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE DA ETE EM RELAÇÃO A SUA OUTORGA E OUTROS PADRÕES DE LANÇAMENTO**

A conformidade foi avaliada por meio do cálculo do percentual de atendimento pela frequência de ocorrência detectada, ou seja, o quociente entre o número de dados que atenderam as diretrizes e o número total de dados, utilizando todos os dados do conjunto amostral e utilizando apenas as médias mensais, abordagens essas que foram empregadas por Adasa (2020) e Adasa (2022a), respectivamente, na avaliação da qualidade do serviço prestado pela CAESB.

As avaliações de conformidade foram realizadas unicamente para os parâmetros aos quais o sistema de tratamento da ETE Sobradinho foi projetado para remover, ou seja, DBO, DQO e SS. Foram avaliadas as conformidades em relação às seguintes diretrizes de padrão de lançamento:

- Outorga da ETE que, conforme apresentado no item 4.5, é de um lançamento com vazão máxima de 196 L/s, concentração máxima de DBO de 63 mg/L até 2017 e 42 mg/L nos anos subsequentes, independentemente da época do ano;
- Resolução CONAMA nº 430 de 2011, que estabelece o lançamento do efluente com concentração máxima de 120 mg/L;
- Padrão de lançamento dos Estados do Rio Grande do Sul (Resolução CONSEMA nº 355/2017) e do Rio de Janeiro (Resolução CONEMA nº 90/2021), duas das mais rigorosas no cenário nacional, em que se têm os valores máximos de: 40mg DBO/L, 150mg DQO/L, 50 e 40mg SS/L, respectivamente.
- Padrão de lançamento da união Europeia (91/271/EEC - Council of the European Communities, 2014), em que se estabelece concentrações de lançamento máximas de 125mg DBO/L, 125mg DQO/L e 35mg SS/L.

## 5.5 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DA ETE

Assim como o tópico anterior, a análise de confiabilidade foi realizada apenas para os parâmetros alvos de remoção da ETE Sobradinho, ou seja, DBO, DQO e SS, tendo como base as mesmas diretrizes de padrão de lançamento, isto é: a outorga da ETE, a Resolução CONAMA nº 430 de 2011, Resolução CONSEMA nº 355/2017, Resolução CONEMA nº 90/2021 e a diretriz da União Europeia 91/271/EEC (Council of the European Communities, 2014).

A análise de confiabilidade foi realizada por meio da metodologia proposta por Niku, Schroeder e Samaniego (1979), obtendo a porcentagem de atendimento esperada da ETE no futuro, em relação aos valores de cada uma das diretrizes apresentadas anteriormente, considerando que ela continue operando nas mesmas condições observadas de média e CV.

Como apresentado no item 3.5, o método de Niku, Schroeder e Samaniego (1979) parte do pressuposto que os dados podem ser descritos por uma distribuição Lognormal, assim, antes da aplicação do método de confiabilidade foi verificada a aderência dos dados de concentração de DBO, DQO e SS do efluente por meio dos testes de Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, Anderson-Darling e Shapiro-Wilk às distribuições de probabilidade normal, lognormal, gama e beta (ajustadas pelo método dos momentos), com nível de significância de 5%. Cabe destacar que o teste de Anderson-Darling não foi utilizado para verificação da aderência à distribuição beta e o teste de Shapiro-Wilk por se tratar de um teste para verificação da normalidade, foi utilizado apenas para as distribuições normal e lognormal (avaliando os dados após transformação logarítmica).

Além disso, conforme a proposta de Niku, Schroeder e Samaniego (1979) foram calculadas as concentrações operacionais recomendadas de DBO, DQO e SS para que, dada a variabilidade da qualidade do tratamento observada, a ETE Sobradinho consiga atender sua outorga de lançamento em relação à concentração em 95% do tempo.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 AVALIAÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS FORNECIDOS PELA CAESB

#### 6.1.1 Dados Fornecidos

O primeiro passo da avaliação dos dados foi organizar e quantificar os dados de cada parâmetro conforme o ponto de amostragem (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 – Número de dados de cada parâmetro conforme o ponto de amostragem fornecidos individualmente (janeiro de 2017 a outubro de 2023)

PARÂMETROS	Afluente	Efluente	Total
pH	492	521	1013
ST (mg/L)	145	-	145
SS (mg/L)	646	658	1304
DBO (mg/L)	307	302	609
DQO (mg/L)	644	659	1303
NT (mg/L)	358	356	714
NH <sub>3</sub> (mg/L)	-	607	607
PT (mg/L)	637	648	1285
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	-	550	550
<i>E. Coli</i> (NMP/100mL)	82	82	164
<b>Total</b>	<b>3311</b>	<b>4383</b>	<b>7694</b>

O número de dados fornecido difere bastante a depender do parâmetro. Avaliando os dados percebe-se que a ETE Sobradinho tem por padrão o monitoramento do esgoto afluente e efluente da ETE a partir de amostras compostas analisadas duas vezes por semana para todos os parâmetros, a exceção de: DBO, que é analisada 1 vez por semana; ST que é analisada 2 vezes por mês e *E. Coli* que é analisada 1 vez por mês.

Apesar do excelente padrão teórico, o monitoramento da ETE apresenta falhas recorrentes (Tabela 6.2), tendo em vista que pela extensão temporal os parâmetros com monitoramento de duas vezes por semana deveriam ter 712 dados, enquanto os de 1 vez por semana teriam 356 dados e os mensais teriam 83 dados. Enfatiza-se que os dados de Nitrogênio Total (NT), por terem começado a ser monitorados apenas em agosto de 2018, teriam apenas 548 dados na realização do monitoramento proposto sem a ocorrência de falhas.

Tabela 6.2 – Número de dados fornecidos e esperados de cada parâmetro, conforme o ponto de amostragem, e percentual fornecido em relação ao número de dados esperado

Parâmetros	Afluente			Efluente		
	Nº fornecido	Nº esperado	% fornecido	Nº fornecido	Nº esperado	% fornecido
pH	492	712	69,1%	521	712	73,2%
ST (mg/L)	145	178	81,5%	-	-	-
SS (mg/L)	646	712	90,7%	658	712	92,4%
DBO (mg/L)	307	356	86,2%	302	356	84,8%
DQO (mg/L)	644	712	90,4%	659	712	92,6%
NT (mg/L)	358	548	65,3%	356	548	65,0%
N-NH3 (mg/L)	-	-	-	607	712	85,3%
PT (mg/L)	637	712	89,5%	648	712	91,0%
P-PO4 (mg/L)	-	-	-	550	712	77,2%
<i>E. Coli</i> (NMP/100mL)	82	82	100,0%	82	82	100,0%
<b>Total</b>	<b>3311</b>	<b>4012</b>	<b>82,5%</b>	<b>4383</b>	<b>5258</b>	<b>83,4%</b>

Como observado, há uma qualidade de monitoramento variável em relação aos parâmetros, sendo ST, NT e pH os parâmetros de monitoramento mais comprometidos por falhas.

Apesar das falhas no monitoramento comprometerem as análises estatísticas que venham a ser realizadas com seus dados, reduzindo a capacidade de se auxiliar a tomada de decisão em prol das possíveis ações direcionadas à melhoria do desempenho, destaca-se que a ETE possui um bom monitoramento. Comparando a frequência de amostragem da ETE para DBO com as frequências reportadas por Oliveira (2006), em que se avaliou 208 ETEs do sudeste brasileiro de diferentes portes e tecnologias de tratamento, o monitoramento da ETE Sobradinho é superior ao empregado por 95% das 208 ETEs avaliadas, sendo superior a 7 das 11 ETEs de Lodos ativados analisadas no referido estudo.

Além disso, surpreende a ausência de monitoramento da temperatura do esgoto afluente e efluente à ETE, tendo em vista sua simplicidade de monitoramento e importância no que se refere à identificação da afluência de águas pluviais e esgotos industriais, além de ser um parâmetro regulamentado para o lançamento de efluentes em corpos hídricos.

### 6.1.2 Limites de Detecção Instrumentais e Analíticos

O passo seguinte da avaliação dos dados foi a verificação quanto aos limites de detecção dos métodos (LDM), apresentados na Tabela 5.1. Todos os dados, à exceção dos de PT e do dado de NT do dia 16/07/2020 se encontram dentro do LDM fornecidos. No caso dos dados de NT, esse resultado foi mantido em função da concordância com os dados de

SS e PT afluentes do dia, indicando um comportamento atípico do dia; já no caso dos dados de PT, segundo os operadores da ETE, é feita a diluição das amostras para a realização do ensaio dentro dos limites do método, sendo os resultados fornecidos conforme a concentração obtida no ensaio multiplicada pelo fator de diluição adotado.

Além disso, cabe destacar o caso do  $\text{PO}_4^{3-}$ , em que se teve uma recorrência do valor mínimo de 0,05 em 35 dos 550 dados desse parâmetro. Em função dessa recorrência, apesar de não ter sido informado pela CAESB, é provável que este valor seja o LDM, sendo o valor substituído pela sua metade (0,025) visando a redução de superestimação dos valores desse parâmetro, em conformidade com o recomendado por von Sperling, Verbyla e Oliveira (2020).

### 6.1.3 Avaliação de dados inconsistentes ou atípicos (*Outliers*)

As análises de consistência e de dados atípicos permitiram a exclusão de apenas 81 dados do conjunto amostral do monitoramento de qualidade do esgoto, composto por 7694 dados. A Tabela 6.3 sintetiza o número de dados excluídos de cada parâmetro avaliado em cada momento da ETE após essa avaliação.

Tabela 6.3 – Número de dados de cada parâmetro conforme o ponto de amostragem após remoção de dados inconsistentes e *outliers* (janeiro de 2017 a outubro de 2023)

PARÂMETROS	Afluente	Efluente	Total
pH	1	1	2
ST (mg/L)	-	-	-
SS (mg/L)	5	3	8
DBO (mg/L)	2	4	6
DQO (mg/L)	1	1	2
NT (mg/L)	6	2	8
N-NH <sub>3</sub> (mg/L)	-	2	2
PT (mg/L)	11	20	31
P-PO <sub>4</sub> (mg/L)	-	14	14
<i>E. Coli</i> (NMP/100mL)	4	4	8
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>51</b>	<b>81</b>

Apenas 10 dos 81 dados foram excluídos por possuírem discrepância com os significados físicos dos parâmetros. A ocorrência de eficiências de remoção negativas foi responsável por detectar inicialmente 58 dados que após todas as análises foram considerados *outliers* e excluídos. Os demais 13 dados excluídos foram identificados inicialmente por meio do método de Tukey (1977).

## 6.2 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E ANÁLISE DE DESEMPENHO

Este tópico apresenta a análise das estatísticas descritivas gerais, a partir das quais se observou a necessidade de outras análises estatísticas mais aprofundadas, que serão apresentadas em seus tópicos específicos, buscando facilitar o entendimento.

### 6.2.1 Vazão

A ETE teve um aumento expressivo de vazão afluyente em 2020, como pode ser verificado na sua série temporal (Figura 6.1). Apesar de não ter sido encontrado nenhum documento sobre o fato, em comunicação pessoal os operadores da estação informaram que no início de 2020 foram inauguradas novas elevatórias de esgoto na região de atendimento da ETE, ampliando a sua área de atendimento. Assim, a mudança abrupta do comportamento dos dados de vazão era esperada e justificável.

O aumento das vazões mínimas anuais na Figura 6.1 é um indicativo de uma provável tendência de aumento da vazão ao longo do tempo, podendo essa ser motivada pelo crescimento populacional, pela mudança do padrão de consumo de água ou até pelo aumento lento da região de atendimento da ETE com a urbanização da região, conforme descrito como processos típicos em sistemas de esgotamento sanitário por Sobrinho e Tsutiya (2000) e von Sperling (2014).

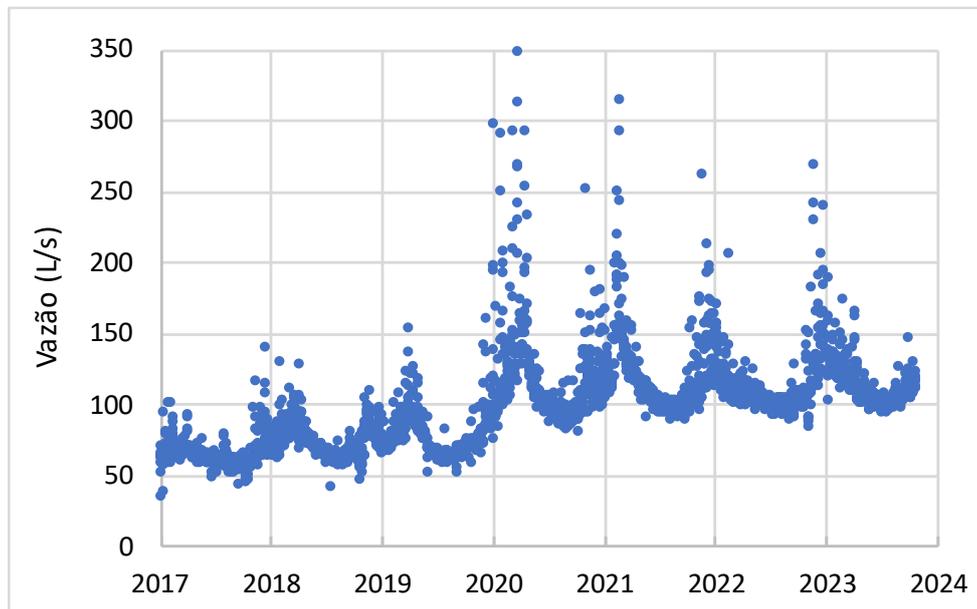


Figura 6.1 - Série temporal de vazões médias diárias do período de janeiro de 2017 a outubro de 2023.

Além disso, a Figura 6.1 traz indícios da influência do período de chuvas sobre a vazão da ETE, sendo recorrente a ocorrência de picos de vazão no início e fim dos anos, enquanto o meio do ano (período de seca) apresenta os menores valores de vazão anuais.

Destaca-se ainda que o aumento da vazão após 2020 veio acompanhado de um aumento do desvio padrão e do coeficiente de variação, o que em virtude da premissa de aumento da área de atendimento da ETE pode indicar a interferência de outros fatores, como por exemplo uma maior ocorrência de lançamentos de águas pluviais na rede de esgoto nessa nova área atendida (SOBRINHO & TSUTIYA, 2000). A avaliação da afluência de águas pluviais na rede de esgoto será discutida em profundidade no item 6.3.

Na Tabela 6.4 são apresentadas as estatísticas descritivas das vazões de cada ano, enquanto a

apresenta os diagramas de caixa, enfatizando a mudança do comportamento de vazão após 2020, podendo-se dividir os dados de vazão em 2 períodos: de 2017 a 2019 e de 2020 a 2023, uma vez que o teste de Mann-Whitney indicou diferenças significativas nas vazões dos 2 períodos ( $U=40294$ ;  $p<0,001$ ). Em geral o período de 2020 a 2023 apresentou vazões superiores ao período de 2017 a 2019.

Tabela 6.4 – Estatística Descritiva anuais dos dados de vazão

<b>Parâmetros</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Número de Dados	365	365	365	366	365	365	304
Média	65,26	73,72	76,75	121,32	121,16	113,21	114,07
Média Geométrica	64,48	72,84	75,40	116,64	118,29	111,49	113,22
Mediana	63,21	70,41	72,21	107,83	111,62	106,16	110,10
Máximo	139,62	128,46	158,90	347,33	313,39	267,52	188,33
Mínimo	33,65	41,00	50,57	75,35	89,10	83,53	92,68
Amplitude	105,97	87,47	108,33	271,98	224,29	183,99	95,65
Amplitude Interquartis	8,29	14,71	18,30	31,60	27,04	13,46	18,61
Desvio Padrão	10,88	11,84	15,64	40,12	30,22	22,89	14,72
Coeficiente de Variação	17%	16%	20%	33%	25%	20%	13%
Erro Padrão	0,57	0,62	0,82	2,10	1,58	1,20	0,84
Assimetria	2,17	1,12	1,82	2,60	2,57	3,21	1,53

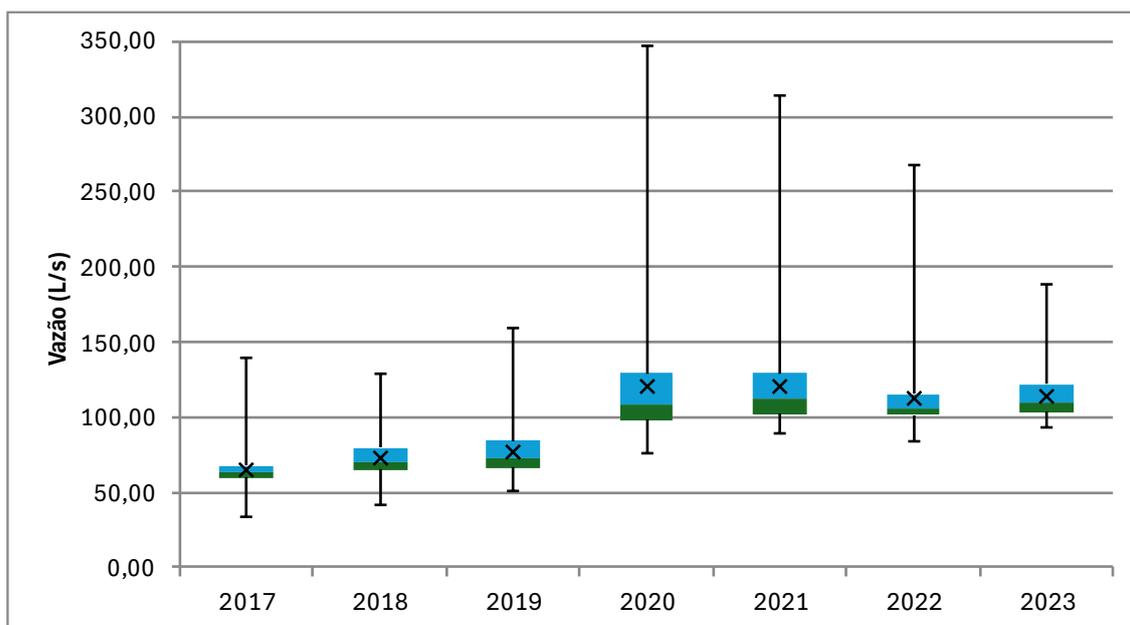


Figura 6.2 – Diagramas de caixa anuais das vazões afluentes à ETE, de janeiro de 2017 a outubro de 2023

Comparando os dados dentro de cada período, tem-se um aumento da vazão e uma redução do desvio padrão ao longo do tempo no período de 2017-19; e uma manutenção da vazão e redução acentuada do desvio padrão no período de 2020-23, advinda da redução da frequência dos picos de vazão, dentre as justificativas para isso está a realização de ações de redução das interferências de águas pluviais na rede de esgotamento sanitário.

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças entre as vazões dos anos ( $p < 0,001$ ). O teste post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas do ano de 2017 com todos os outros ( $p < 0,001$ ) e dos de 2018 e 2019 com relação aos demais ( $p < 0,001$ ), a exceção deles mesmos ( $p = 0,41$ ). Já no período de 2020 a 2023 todos os anos tiveram diferenças entre si ( $p < 0,03$ ) a exceção dos anos de 2021 e 2022 ( $p = 0,96$ ).

## 6.2.2 Concentrações de Poluentes no Esgoto Afluente

### 6.2.2.1 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A série temporal de concentrações de DBO no esgoto afluente é apresentada na Figura 6.3.

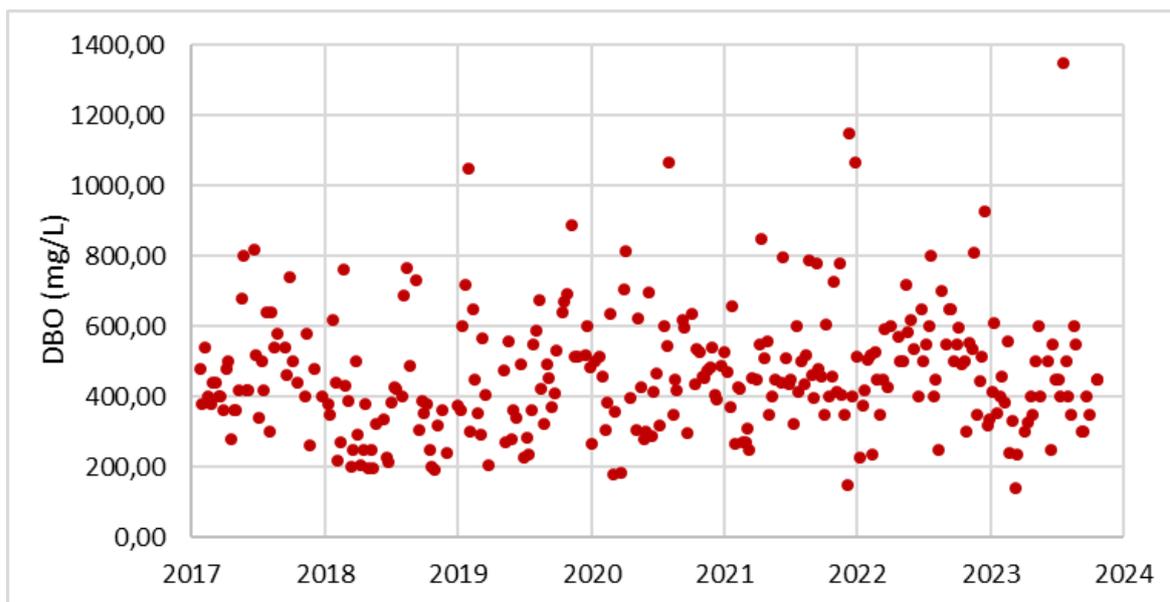


Figura 6.3 – Série Temporal de DBO no esgoto afluente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020

A Tabela 6.5 apresenta as estatísticas descritivas anuais dos dados de DBO, enquanto a Figura 6.4 mostra os diagramas de caixa anuais das concentrações.

Tabela 6.5 – Estatísticas Descritivas anuais dos dados de DBO afluente

<b>Parâmetros</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Número de Dados	43	41	42	45	50	48	36
Média	470	365	478	468	497	516	430
Média Geométrica	454	337	447	441	464	495	400
Mediana	440	350	464	456	450	513	400
Máximo	820	767	1050	1065	1150	926	1350
Mínimo	260	190	205	177	150	227	139
Amplitude	560	577	845	888	1000	699	1211
Amplitude Interquartis	150	176	226	180	144	154	164
Desvio Padrão	132	158	179	166	197	144	193
Coefficiente de Variação	28%	43%	38%	35%	40%	28%	45%
Erro Padrão	20,1	24,7	27,7	24,7	27,9	20,8	32,2
Coefficiente Assimetria	0,9	1,2	0,9	1,1	1,4	0,3	3,1

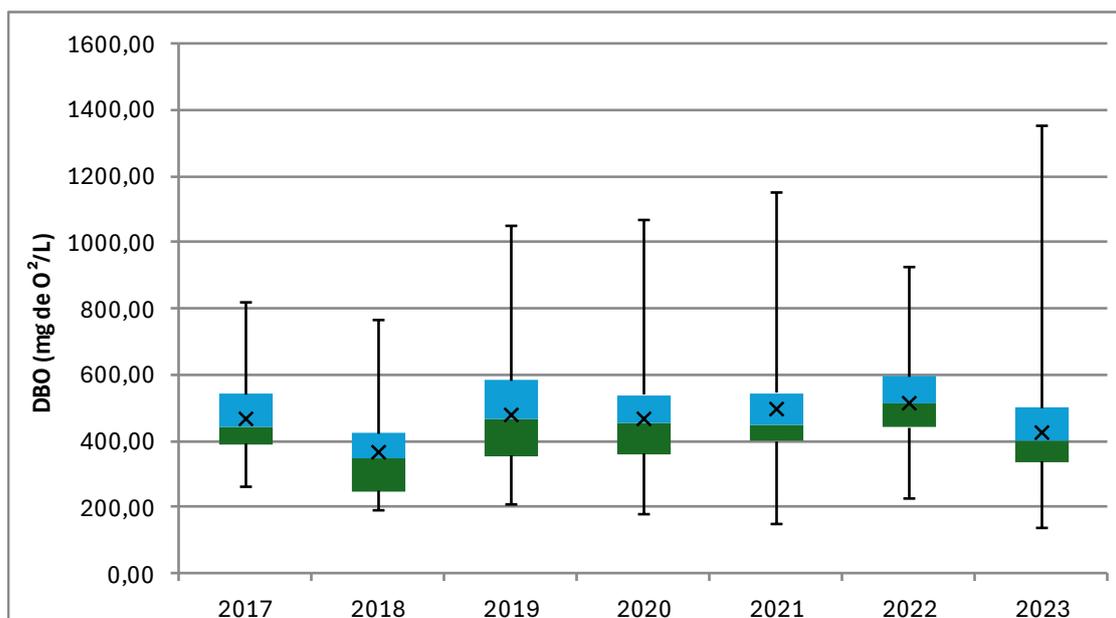


Figura 6.4 - Diagramas de caixa anuais de DBO, de janeiro de 2017 a outubro de 2023

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças entre as concentrações de DBO dos anos ( $p < 0,001$ ). O post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas: o ano de 2018 se diferenciou dos demais ( $p < 0,02$ ), a exceção dos anos de 2019 ( $p = 0,054$ ) e 2023 ( $p = 0,06$ ); assim como o ano de 2022 que se diferenciou de todos ( $p < 0,04$ ), a exceção de 2017 ( $p = 0,37$ ) e 2021 ( $p = 0,09$ ).

#### 6.2.2.2 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A série temporal de concentrações de DQO no esgoto afluyente (Figura 6.5) indica que as concentrações de DQO se mantiveram relativamente homogêneas, sendo perceptível apenas o aumento da dispersão e de ocorrências de picos de concentração ao longo do tempo.

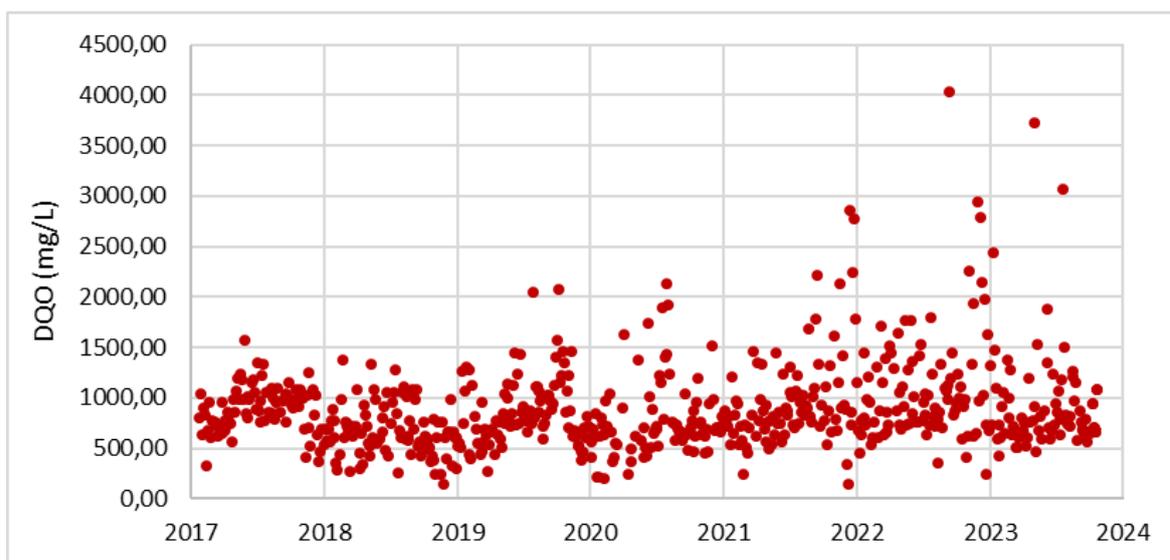


Figura 6.5 – Série Temporal DQO esgoto afluyente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020

A Tabela 6.6 apresenta as estatísticas descritivas anuais dos dados de DQO, enquanto a Figura 6.6 mostra os diagramas de caixa anuais das concentrações.

Tabela 6.6 - Estatísticas Descritivas anuais dos dados de DQO afluente

Parâmetros	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Número de Dados	92	96	98	88	94	96	79
Média	891	669	862	777	954	1094	943
Média Geométrica	860	617	804	701	865	986	856
Mediana	894	637	802	689	842	959	765
Máximo	1564	1377	2080	2126	2858	4035	3720
Mínimo	332	145	265	199	142	244	426
Amplitude	1232	1232	1815	1927	2716	3792	3294
Amplitude Interquartis	294	263	427	296	329	558	406
Desvio Padrão	223	256	333	376	465	566	529
Coefficiente de Variação	25%	38%	39%	48%	49%	52%	56%
Erro Padrão	23,3	26,1	33,7	40,1	48,0	57,8	59,5
Assimetria	0,0	0,5	1,2	1,6	2,0	2,3	3,1

Além disso, percebe-se uma tendência de aumento da amplitude e do desvio padrão de DQO ao longo do tempo.

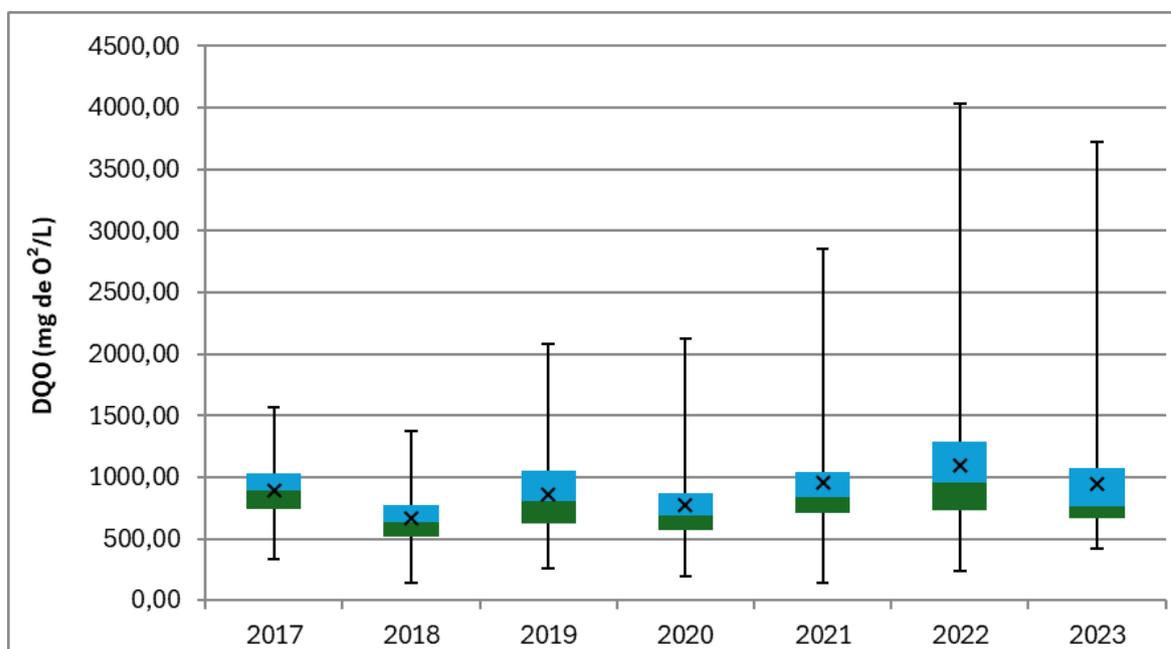


Figura 6.6 - Diagramas de caixa anuais de DQO, de janeiro de 2017 a outubro de 2023

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças entre as concentrações de DQO dos anos ( $p < 0,001$ ). O post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas entre os anos de 2018 e 2020 em relação aos demais anos ( $p < 0,01$ ), a exceção da comparação entre 2020 e 2023 ( $p = 0,33$ ), não tendo diferença entre 2018 e 2020 ( $p = 0,1$ ). Destaca-se também a diferença do ano de 2017 com 2021 e 2023 ( $p < 0,04$ ) e de 2022 com 2023 ( $p = 0,02$ ).

### 6.2.2.3 Sólidos em Suspensão (SS)

Assim como no caso de DQO, a série temporal de concentrações de SS no esgoto afluente (Figura 6.7) indica que as concentrações se mantiveram relativamente homogêneas, sendo perceptível apenas o aumento da dispersão e de ocorrências de picos de concentração ao longo do tempo.

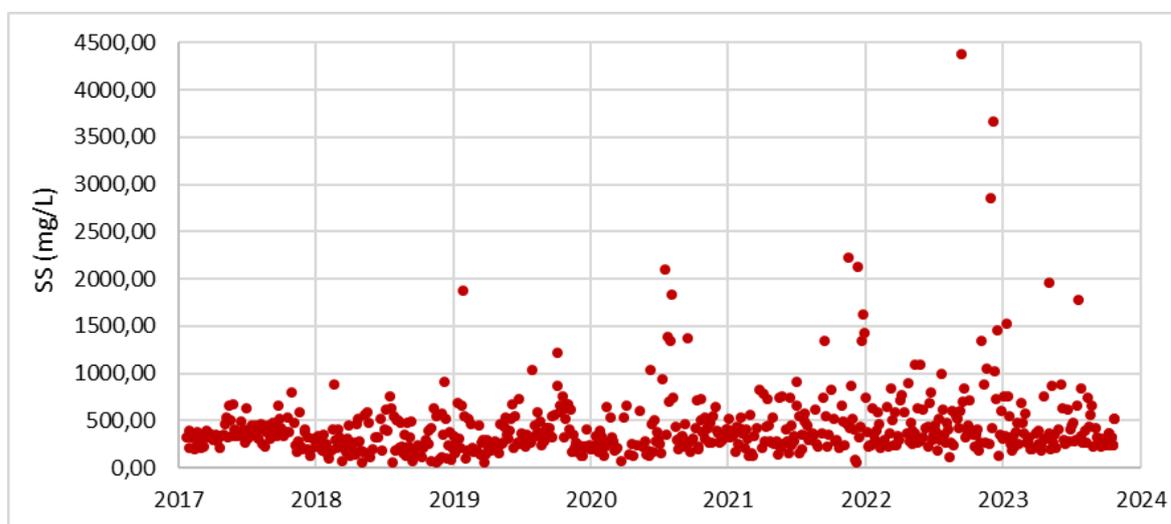


Figura 6.7 – Série Temporal dados de sólidos suspensos totais esgoto afluente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020

A Tabela 6.7 apresenta as estatísticas descritivas anuais dos dados de SS, enquanto a Figura 5.8 mostra os diagramas de caixa anuais das concentrações.

Tabela 6.7 - Estatísticas Descritivas anuais das concentrações de SS afluente

<b>Parâmetros</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Número de Dados	93	94	99	89	91	96	79
Média	361,7	304,4	383,9	479,4	469,8	589,9	439,6
Média Geométrica	342,5	251,8	326,3	347,1	381,1	454,8	375,2
Mediana	340,0	254,0	320,0	300,0	364,0	402,5	320,0
Máximo	800,0	908,0	1880,0	5780,0	2220,0	4385,7	1960,0
Mínimo	120,0	50,0	62,0	66,0	58,0	116,0	184,0
Amplitude	680,0	858,0	1818,0	5714,0	2162,0	4269,7	1776,0
Amplitude Interquartis	111,0	225,0	254,0	252,0	262,5	352,8	240,5
Desvio Padrão	121,9	183,0	253,5	667,4	369,8	627,3	319,7
Coefficiente de Variação	34%	60%	66%	139%	79%	106%	73%
Erro Padrão	12,6	18,9	25,5	70,8	38,8	64,0	36,0
Coefficiente Assimetria	1,0	1,0	2,8	6,2	2,8	4,2	2,9

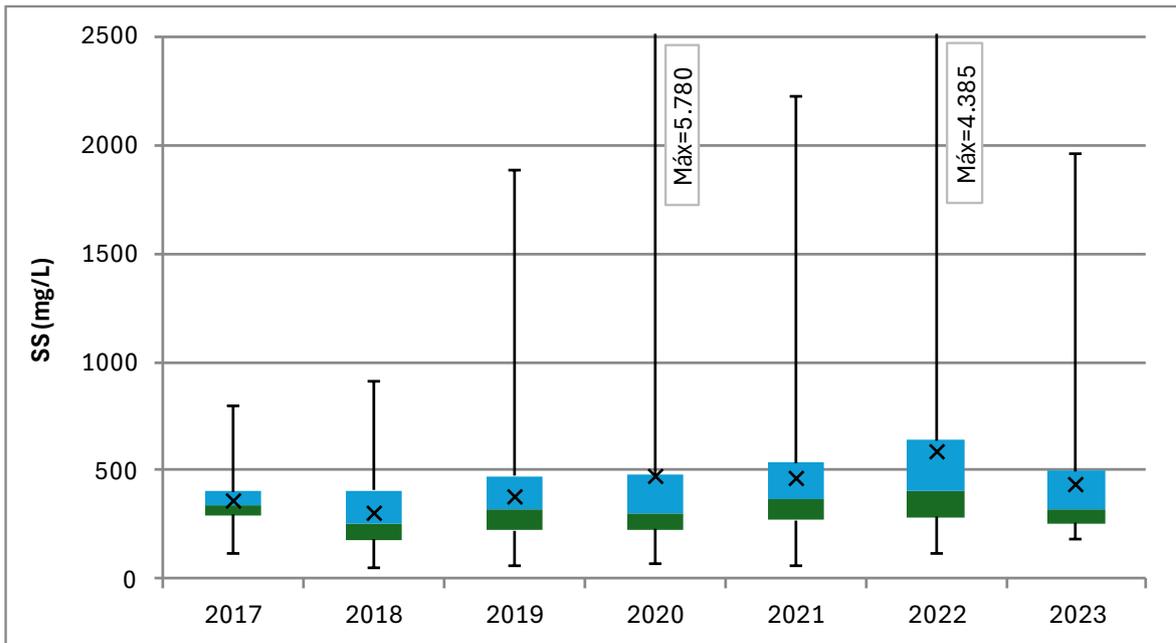


Figura 6.8 - Diagramas de caixa anuais de SS, de janeiro de 2017 a outubro de 2023

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças entre as concentrações de SS dos anos ( $p < 0,002$ ). O post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas apenas do ano de 2018 em relação aos demais ( $p \leq 0,02$ ).

#### 6.2.2.4 Nitrogênio Total (NT)

O monitoramento de NT começou a ser realizado na ETE apenas em agosto de 2018, contudo, ainda de forma esporádica. Apenas em maio de 2020 se tornou uma análise padrão a ser realizada duas vezes por semana, momento a partir do qual pode-se ver com clareza as variações de concentração ao longo do tempo. A Figura 6.9 apresenta a série temporal dos dados de concentração de NT, havendo indícios da interferência da sazonalidade sobre esse parâmetro, uma vez que os picos de concentração se encontram no meio do ano no período típico de seca.

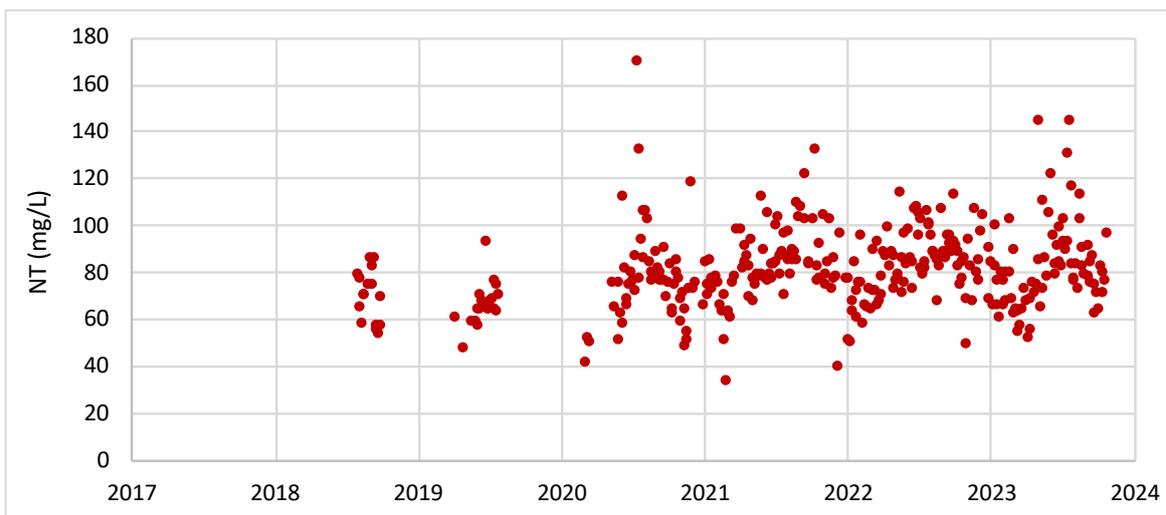


Figura 6.9 – Série Temporal de nitrogênio total do esgoto afluente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020

A Tabela 6.8 apresenta as estatísticas descritivas anuais dos dados de NT, enquanto a Figura 5.10 mostra os diagramas de caixa anuais das concentrações.

Tabela 6.8 - Estatísticas Descritivas anuais das concentrações de NT afluente

<b>Parâmetros</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Número de Dados	0	16	20	59	86	92	79
Média	-	69,5	65,8	77,6	82,8	83,2	82,2
Média Geométrica	-	68,7	65,3	75,2	81,2	82,0	80,4
Mediana	-	70,0	64,0	76,0	81,5	84,0	80,0
Máximo	-	86,0	93,0	170,0	132,0	114,0	144,0
Mínimo	-	53,0	47,0	41,0	33,0	49,0	52,0
Amplitude	-	33,0	46,0	129,0	99,0	65,0	92,0
Amplitude Interquartis	-	19,8	6,3	15,0	13,0	19,3	20,5
Desvio Padrão	-	11,1	9,0	20,9	15,6	14,0	18,5
Coefficiente de Variação	-	16%	14%	27%	19%	17%	23%
Erro Padrão	-	2,8	2,0	2,7	1,7	1,5	2,1
Assimetria	-	0,0	1,1	1,8	0,1	-0,1	1,3

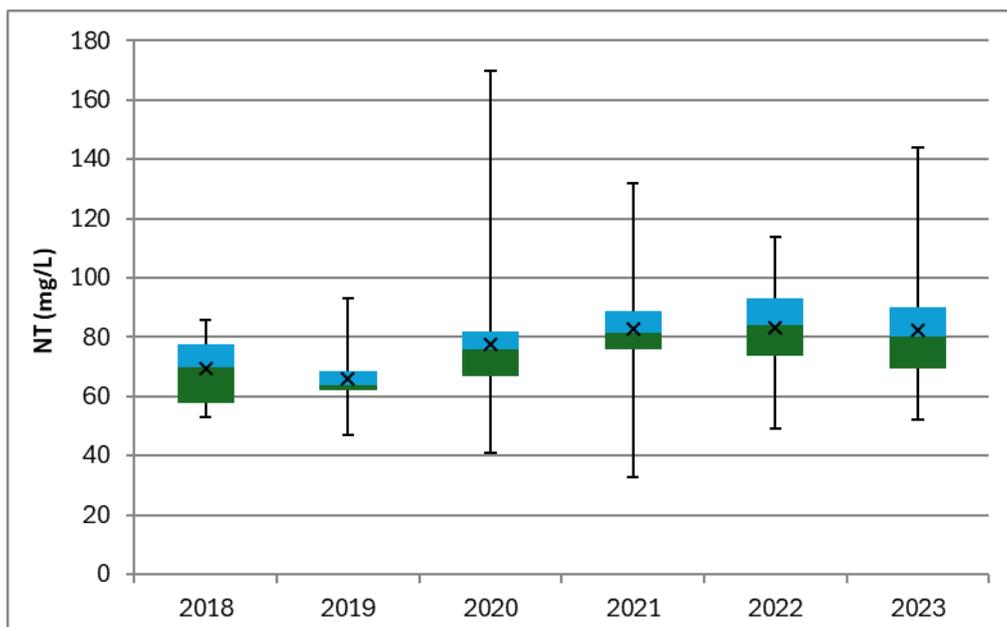


Figura 6.10 - Diagramas de caixa anuais das concentrações afluentes de NT, de janeiro de 2017 a outubro de 2023

Pela análise da Figura 5.10 é perceptível a mudança das distribuições das concentrações de NT no esgoto afluente a ETE. Havendo indícios de uma tendência de crescimento da concentração de NT acompanhada por uma mudança de comportamento de 2020 para frente no que se refere à variabilidade de NT.

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças entre as concentrações de NT dos anos ( $p < 0,001$ ). O post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas dos anos de 2018 e 2019 em relação aos demais anos ( $p \leq 0,02$ ), sendo eles semelhantes entre si ( $p = 0,42$ ). O ano de 2020 também apresentou diferenças em relação aos anos seguintes ( $p < 0,02$ ).

#### 6.2.2.5 Fósforo Total (PT)

A Figura 6.11 apresenta a série temporal dos dados de concentração de PT, possuindo um comportamento similar ao dos dados de DBO, DQO e SS.

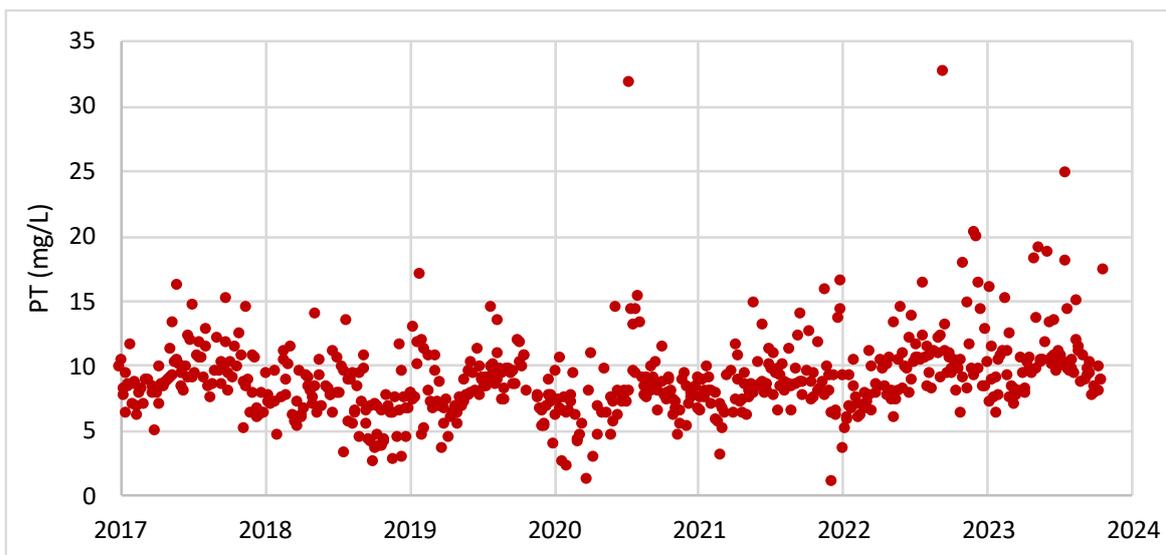


Figura 6.11 – Série Temporal de nitrogênio total do esgoto afluente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020

Visualmente os dados de PT apresentam uma mudança gradativa, com indícios de uma tendência de redução de 2017 a 2020 seguida por uma tendência de aumento de 2020 a 2023.

A Tabela 6.9 apresenta as estatísticas descritivas anuais dos dados de PT, enquanto a Figura 5.12 mostra os diagramas de caixa anuais das concentrações.

Tabela 6.9 - Estatísticas Descritivas anuais das concentrações de PT afluente

<b>Parâmetros</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Número de Dados	89	91	92	89	94	92	79
Média	9,5	7,4	8,6	8,1	8,8	10,3	10,9
Média Geométrica	9,2	7,0	8,3	7,5	8,4	9,7	10,5
Mediana	9,1	7,2	8,4	7,7	8,6	9,8	10,4
Máximo	16,3	14,1	17,2	32,0	16,7	32,8	25,0
Mínimo	5,0	2,7	3,7	1,4	1,2	3,7	6,5
Amplitude	11,3	11,4	13,5	30,6	15,4	29,1	18,5
Amplitude Interquartis	2,2	2,9	2,6	2,4	2,0	3,0	2,2
Desvio Padrão	2,1	2,3	2,2	3,6	2,4	3,8	3,2
Coefficiente de Variação	22%	32%	26%	45%	27%	37%	30%
Erro Padrão	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4
Assimetria	0,8	0,3	0,8	3,5	0,7	2,8	2,0

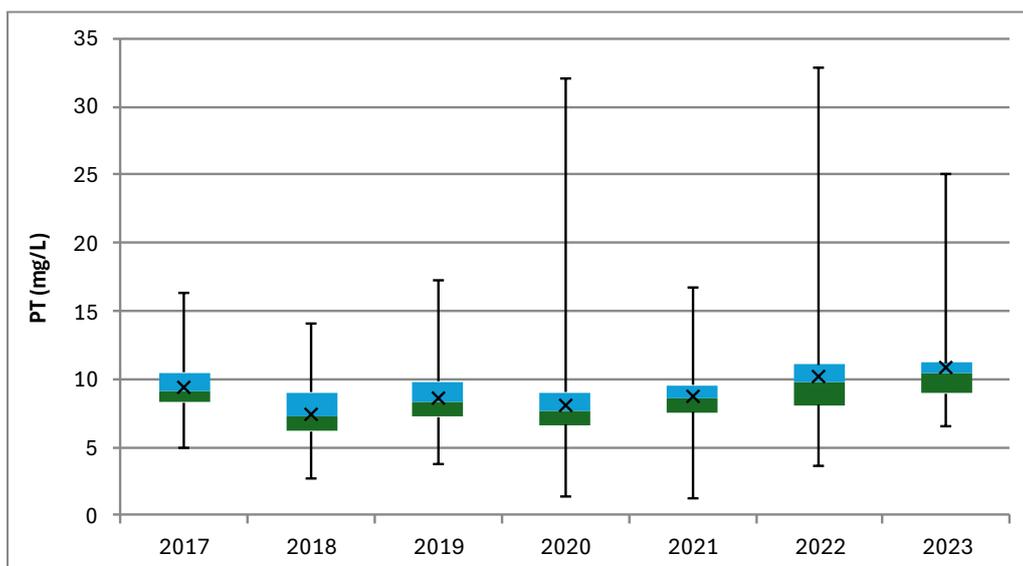


Figura 6.12 - Diagramas de caixa anuais das concentrações afluentes de NT, de janeiro de 2017 a outubro de 2023

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças entre as concentrações de PT dos anos ( $p < 0,001$ ). O post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas do ano de 2018 em relação aos demais ( $p \leq 0,002$ ), o ano de 2017 foi semelhante aos anos de 2022 e 2023 ( $p > 0,37$ ) e diferente aos demais ( $p < 0,001$ ); por fim os anos de 2019, 2020 e 2021 se mostraram semelhantes ( $p > 0,27$ ), apresentando diferenças em relação aos anos seguintes ( $p < 0,003$ ).

#### 6.2.2.6 *E. Coli*

A série temporal de concentrações de *E. Coli* no esgoto afluente (Figura 6.13) indica que as concentrações se mantiveram relativamente homogêneas, apresentando apenas uma redução da dispersão após 2020.

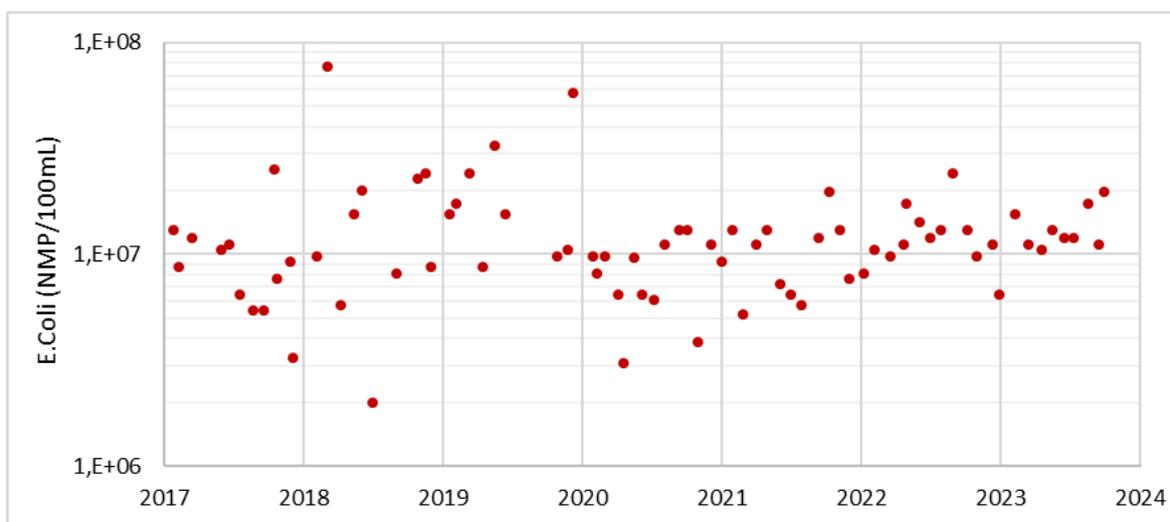


Figura 6.13 – Série Temporal de *E. Coli* do esgoto afluente a ETE Sobradinho, período de janeiro de 2017 a outubro de 2020

A Tabela 6.10 apresenta as estatísticas descritivas anuais dos dados de *E. Coli*, enquanto a Figura 6.14 mostra os diagramas de caixa anuais das concentrações.

Tabela 6.10 - Estatísticas Descritivas anuais dos dados de *E. Coli*

Parâmetros	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Nº de Dados	12	10	9	13	12	12	10
Média	9,83E+06	1,94E+07	2,13E+07	8,60E+06	1,03E+07	1,29E+07	1,29E+07
Média Geométrica	8,66E+06	1,26E+07	1,77E+07	7,93E+06	9,57E+06	1,23E+07	1,24E+07
Mediana	8,94E+06	1,27E+07	1,55E+07	9,59E+06	1,02E+07	1,16E+07	1,20E+07
Máximo	2,50E+07	7,70E+07	5,79E+07	1,30E+07	1,99E+07	2,42E+07	1,99E+07
Mínimo	3,26E+06	1,99E+06	8,66E+06	3,08E+06	5,17E+06	8,16E+06	6,49E+06
Amplitude	2,17E+07	7,50E+07	4,93E+07	9,92E+06	1,47E+07	1,60E+07	1,34E+07
Amplitude Interquartis	5,17E+06	1,38E+07	1,37E+07	4,71E+06	5,92E+06	2,98E+06	3,70E+06
Desvio Padrão	5,61E+06	2,16E+07	1,57E+07	3,22E+06	4,21E+06	4,29E+06	3,79E+06
Coefficiente de Variação	57,05%	111,31%	73,54%	37,39%	40,87%	33,39%	29,36%
Erro Padrão	1,62E+06	6,82E+06	5,23E+06	8,92E+05	1,22E+06	1,24E+06	1,20E+06
Assimetria	1,88	2,49	1,88	-0,29	0,88	1,88	0,38

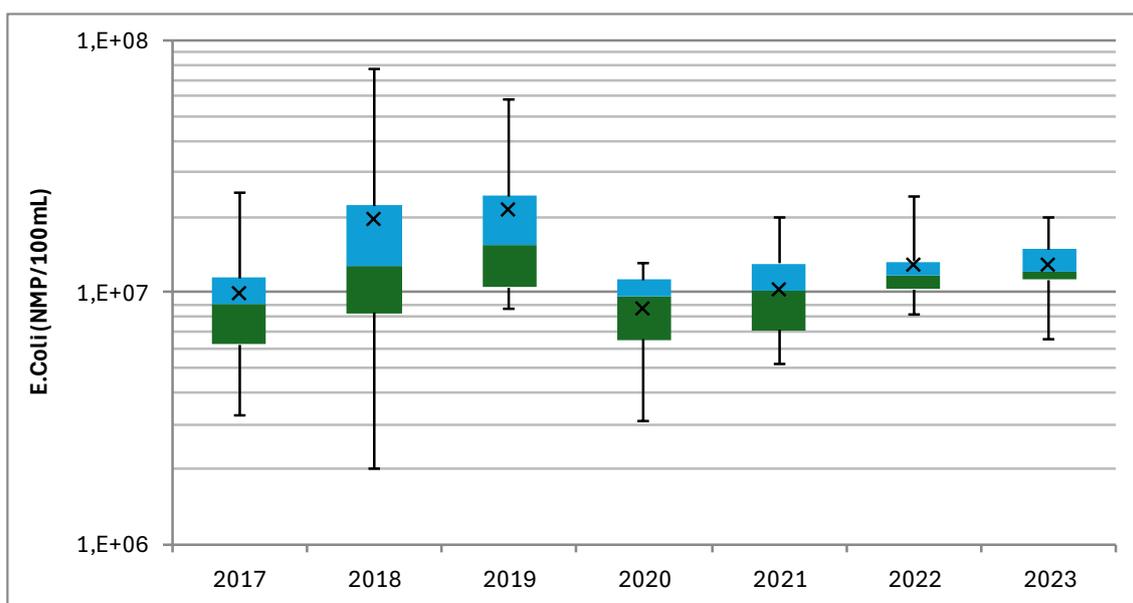


Figura 6.14 - Diagramas de caixa anuais das concentrações afluentes de *E. Coli*, de janeiro de 2017 a outubro de 2023

Pela análise dos diagramas de caixa se tem a impressão de uma tendência de crescimento em ciclos, havendo um crescimento de 2017 a 2019 seguido de uma queda brusca em 2020 e um novo ciclo de crescimento de 2020 a 2023, contudo, tendo o segundo ciclo uma menor amplitude de valores.

O teste de Kruskal-Wallis não indicou diferenças entre as concentrações de *E. Coli* dos anos ( $p=0,15$ ). O post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas apenas entre os anos de 2017 e 2022 ( $p=0,02$ ). Contudo, várias comparações pareadas

tiveram valores  $p$  baixos (2017x2019, 2019x2023 e 2020x2022 tiveram  $p < 0,1$ ), principalmente se comparando os anos de inícios e fins dos ciclos, indicando que as diferenças entre as distribuições de cada ano podem não ter sido detectáveis em decorrência do baixo número de dados de cada amostra, ou seja, do poder de detecção do método com essa quantidade de valores.

#### 6.2.2.7 Comparação com outros estudos

As faixas de valores (utilizando os percentis de 10% como mínimos e os percentis de 90% como máximos) das concentrações de todos os parâmetros obtidas na ETE foram comparadas com as preconizadas na literatura especializada, sendo os valores obtidos e levantados apresentados na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Faixas típicas e observadas de DBO, DQO e SS em esgotos domésticos brutos

Fonte	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SS (mg/L)	NT (mg/L)	PT (mg/L)	E. Coli <sup>(1)</sup> (mg/L)
von Sperling (2014) para esgotos domésticos	250-400	450-800	200-450	35-60	4-15	$10^6$ - $10^9$
Oliveira e von Sperling (2005) para esgotos domésticos	284-804	505-1616	202-527	39-84	2-14	$1,3 \cdot 10^7$ - $1,8 \cdot 10^8$
Oliveira (2006) para ETEs de Lodos Ativados	107-430	303-827	134-335	32-61	1-4	$5,6 \cdot 10^6$ - $8,8 \cdot 10^7$
Jordão e Pessôa (2016) para esgotos domésticos <sup>(3)</sup>	100-400	200-800	120-360	20-85	5-20	$10^5$ - $10^8$
Metcalf e Eddy (2016) para esgotos domésticos <sup>(2)</sup>	400	1016	389	69	11	$10^5$ - $10^8$
Observada	268-675	508-1331	184-710	62-102	6,2-12,1	$5,8 \cdot 10^6$ - $2,1 \cdot 10^7$

**Legenda:**

- (1) Adotados os dados de CF de trabalhos literários que não avaliaram *E. Coli*;
- (2) Esgoto típico para uma vazão de esgoto *per capita* de 190L/hab.dia;
- (3) Faixas compostas pelo valor do esgoto típico fraco e forte

As faixas de valores (Q10-Q90) das concentrações de todos os parâmetros no esgoto afluente são mais amplas e com limites superiores maiores do que as apresentadas por von Sperling (2014) e Oliveira (2006) para ETEs de Lodos Ativados (LA). Contudo, são coerentes com as apresentadas por Oliveira e von Sperling (2005) e Metcalf e Eddy (2016) para esgotos domésticos, a exceção dos limites superiores das concentrações de SS e NT, em que foram observadas na ETE Sobradinho valores 35% e 21% maiores, respectivamente.

Ressalta-se que apesar de o estudo de Oliveira (2006) ter encontrado faixas de concentrações afluentes acima das tipicamente abordadas pela literatura, foi constatado que as concentrações tiveram comportamento heterogêneo a depender da tecnologia de tratamento, sendo os sistemas de LA os com menores faixas de valores de concentração para

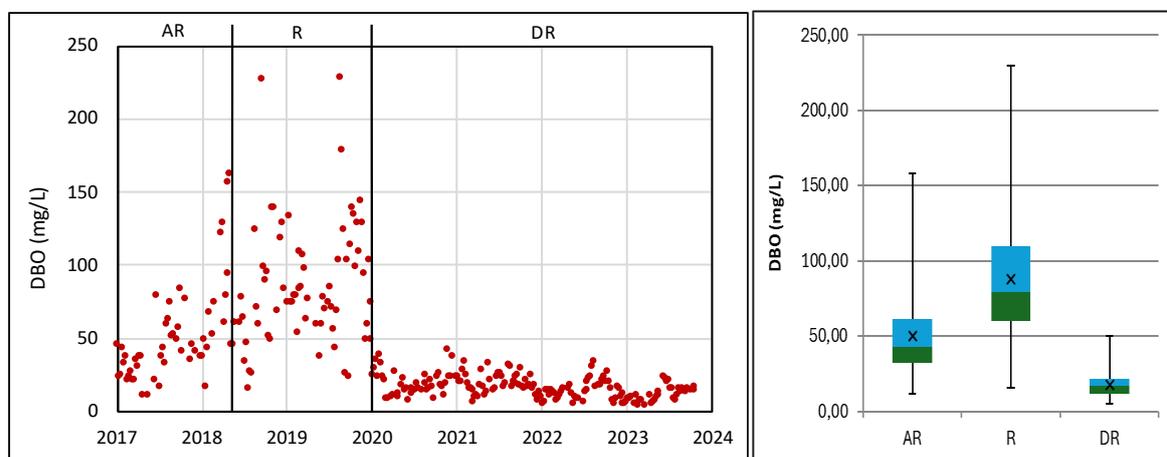
todos os parâmetros, a exceção de NT e CF. Apesar de não terem sido avaliadas numericamente ou reportadas, a autora levantou possibilidades para justificativa dos dados, como o fato de tipicamente as tecnologias mais simples atenderem comunidades menores, que usualmente, apresentam menores consumos *per capita* de água e menores coeficientes de retorno e, além disso, para tais tecnologias de tratamento é comum a adoção de amostragens simples, podendo levar em conta discrepâncias em função do comportamento da ETE no momento da coleta de amostras. É possível que várias destas causas estejam agindo simultaneamente.

O esgoto afluyente da ETE Sobradinho possui concentrações superiores as obtidas por Oliveira (2006) em relação a todos os parâmetros, sendo esse comportamento provavelmente motivado pelo baixo coeficiente de consumo de água *per capita* da área de atendimento da ETE Sobradinho, o qual teve média de 133,3 L/hab.dia entre 2017 e 2023.

### 6.2.3 Concentrações de Poluentes no Esgoto Tratado

#### 6.2.3.1 DBO, DQO e SS

As Figura 6.15, Figura 6.16 e Figura 6.17 apresentam respectivamente as séries temporais e diagramas de caixa das concentrações de DBO, DQO e SS do efluente tratado da ETE Sobradinho conforme o seu período operacional.



Nota: AR=antes da reforma; R= durante a reforma; DR= depois da reforma.

Figura 6.15 – Série Temporal e Diagramas de caixa de DBO do efluente tratado conforme período operacional da ETE

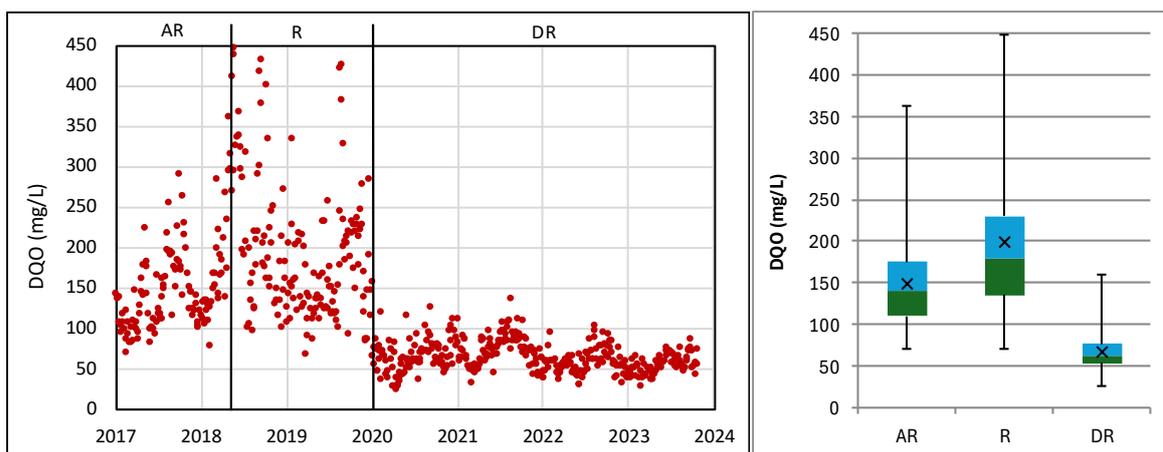
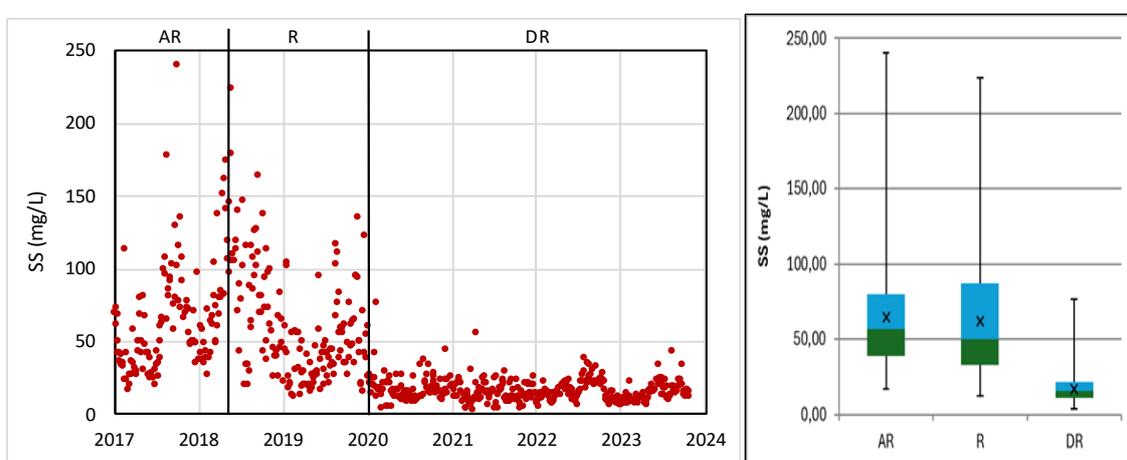


Figura 6.16 – Série Temporal e Diagramas de caixa de DQO do efluente tratado conforme período operacional da ETE



Nota: AR=antes da reforma; R= durante a reforma; DR= depois da reforma.

Figura 6.17 – Série Temporal e Diagramas de caixa de SS do efluente final conforme período operacional da ETE

Tabela 6.12 – Estatísticas Descritivas de DBO, DQO e SS do efluente conforme o período operacional da ETE

Parâmetros	DBO (mg/L)			DQO (mg/L)			SS (mg/L)		
	AR	R	DR	AR	R	DR	AR	R	DR
Nº de Dados	50	72	176	125	162	371	124	162	369
Média	50	88	18	149	198	66	64,5	61,9	16,9
Média Geométrica	43	78	16	142	183	63	56,2	51,3	15,3
Mediana	43	79	17	139	179	63	57,0	50,0	15,6
Máximo	158	230	50	364	449	159	240,0	224,0	76,5
Mínimo	12	16	5	71	70	25	17,0	12,4	3,5
Amplitude	146	214	45	293	379	134	223,0	211,6	73,0
Amplitude Interquartis	29	50	10	66	95	23	41,3	54,3	10,2
Desvio Padrão	30	43	8	52	85	19	36,8	38,3	8,3
Coefficiente de Variação	60%	48%	46%	35%	43%	29%	57%	62%	49%
Erro Padrão	4	5	1	5	7	1	3,3	3,0	0,4
Coefficiente Assimetria	1,6	1,1	0,9	1,3	1,1	0,9	1,8	1,1	2,2

Pela Figura 6.15, Figura 6.16 e Tabela 6.12 percebe-se que o efluente final da ETE apresentou um aumento da mediana e da dispersão de DBO e DQO no período referente a reforma da estação (R). No que se refere à mediana esse comportamento era esperado, uma vez que o reator aerado de nível variável representa grande parte da capacidade de tratamento biológico da estação e sua operação foi paralisada. Cabe ressaltar que o impacto da reforma emergencial foi atenuado pela implementação em caráter emergencial do TPQA, apesar desse tratamento possuir uma eficiência de remoção de matéria orgânica bem menor do que a de sistemas de lodos ativados, sendo as suas eficiências obtidas numericamente descritas no item 6.2.4. Já no que se refere ao aumento da variabilidade no período R, esse comportamento pode ser justificado pela adaptação operacional em caráter emergencial, sendo necessário tempo e análises hidráulicas e laboratoriais para se estabelecer e controlar a dosagem ideal de químicos em relação a vazão e as características do esgoto afluente, de forma a otimizar o TPQA.

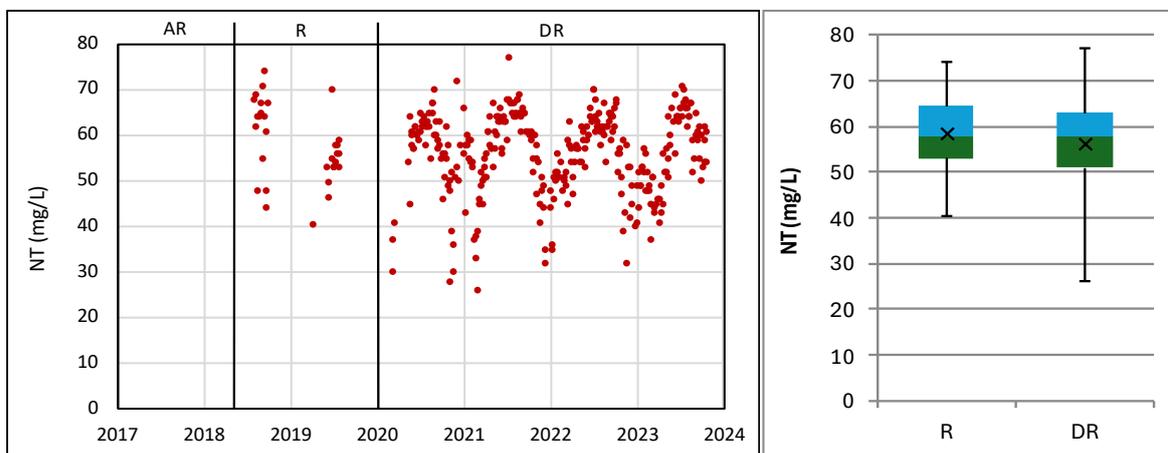
O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças tanto para DBO ( $p < 0,001$ ), quanto para DQO ( $p < 0,001$ ) ao longo dos períodos de operação. O post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas entre os 3 períodos tendo  $p < 0,01$  em todos os casos.

No que se refere a SS, o efluente final do período R se manteve similar ao período AR (Figura 6.17), tendo o post-hoc de Dunn do teste de Kruskal-Wallis apresentado  $p = 0,29$ , indicando a robustez do funcionamento dos decantadores primários e secundários mesmo com a implementação do TPQA. Já o período DR apresentou diferenças significativas em relação aos demais, tendo o post-hoc de Dunn do teste de Kruskal-Wallis apresentado  $p < 0,001$  em ambos os casos.

O período depois da reforma (DR) apresentou uma redução expressiva da mediana e da variação das concentrações de DBO, DQO e SS em relação aos outros dois momentos da ETE. Essa redução pode ser justificada pelo melhor controle operacional da aeração e da recirculação de lodo ativado por meio dos sensores de medição em tempo real da concentração de OD e SS, os quais foram implementados no início do período DR, otimizando como um todo o tratamento realizado pelo sistema de lodos ativados. Outra possível justificativa para essa redução das concentrações de DBO e DQO no efluente é a otimização da distribuição dos aeradores no tanque pulmão, realizada no período DR, o que pode ter possibilitado uma concentração de OD mais uniforme nos reatores, mantendo concentrações adequadas em todo seu volume e evitando a formação de zonas anóxicas.

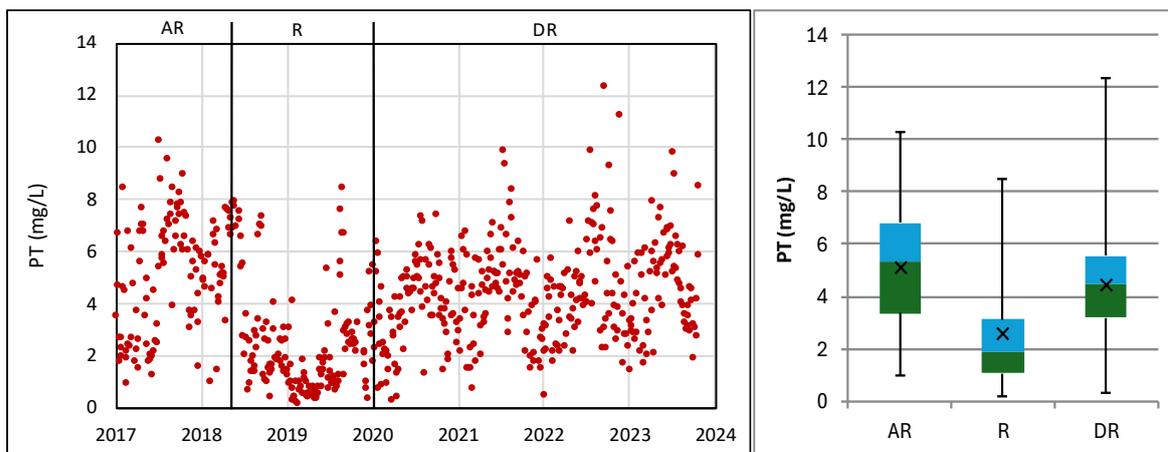
### 6.2.3.2 Nutrientes

As concentrações de NT e PT no efluente final são apresentadas em séries temporais e os diagramas de caixa, divididos pelos períodos operacionais da ETE, na Figura 6.18 e Figura 6.19, respectivamente, tendo suas estatísticas descritivas apresentadas conjuntamente na Tabela 6.13



Nota: AR=antes da reforma; R= durante a reforma; DR= depois da reforma.

Figura 6.18 – Série Temporal e Diagramas de caixa de NT do efluente final conforme período operacional da ETE



Nota: AR=antes da reforma; R= durante a reforma; DR= depois da reforma.

Figura 6.19 – Série Temporal e Diagramas de caixa de PT do efluente final conforme período operacional da ETE

Tabela 6.13 – Estatísticas Descritivas de NT e PT do efluente conforme o período operacional da ETE

Parâmetros	NT (mg/L)			PT (mg/L)		
	AR	R	DR	AR	R	DR
Nº de Dados	0	31	323	117	153	358
Média	-	58,25	56,23	5,12	2,56	4,46
Média Geométrica	-	57,62	55,44	4,55	1,86	4,03
Mediana	-	58,00	58,00	5,30	1,90	4,45
Máximo	-	74,00	77,00	10,30	8,50	12,38
Mínimo	-	40,40	26,00	0,96	0,18	0,32
Amplitude	-	33,60	51,00	9,34	8,32	12,06
Amplitude Interquartis	-	11,50	12,00	3,45	2,06	2,38
Desvio Padrão	-	8,53	8,84	2,17	2,09	1,85
Coefficiente de Variação	-	15%	16%	42%	82%	41%
Erro Padrão	-	1,53	0,49	0,20	0,17	0,10
Coefficiente Assimetria	-	-0,10	-0,81	-0,09	1,31	0,58

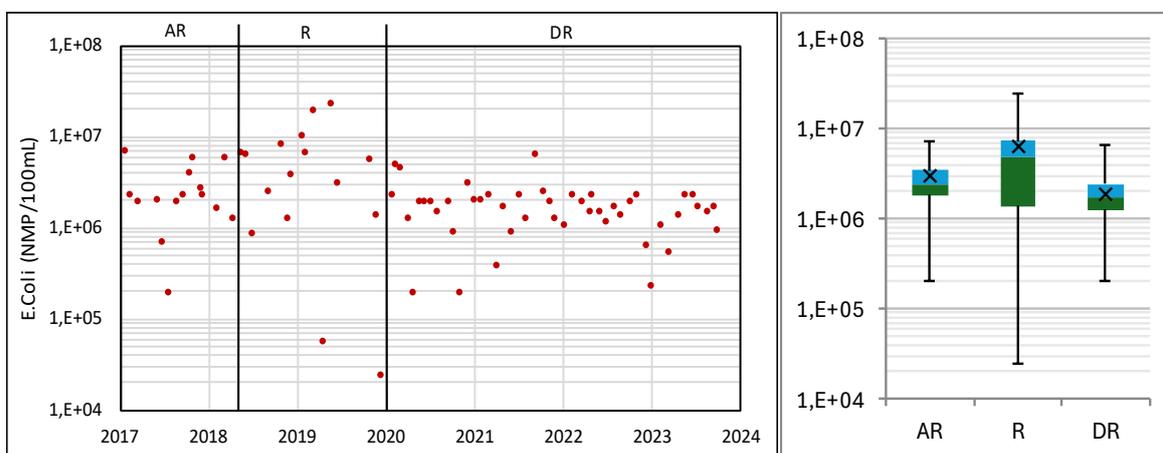
Em relação a NT (Figura 6.18), não foram observadas mudanças expressivas no comportamento comparando os momentos da ETE, havendo apenas indícios de uma sazonalidade acentuando o comportamento de concentrações maiores no período de seca e menores no período de chuvas já identificado na Figura 6.9. O teste de Kruskal-Wallis também não detectou diferenças significativas entre os momentos R e DR ( $p < 0,34$ ). Destaca-se que, em virtude da ausência de dados de NT no período AR, foi feita apenas a comparação dos períodos R e DR.

Já em relação a PT (Figura 6.19) é nítida diferença do período R, sendo a mediana do período R muito inferior à dos períodos AR e DR. Esse comportamento era esperado uma vez que o sistema de lodos ativados da ETE Sobradinho não foi projetado para a realização da remoção de nutrientes e, dessa forma, sem o TPQA não há nenhum processo em que essa remoção possa ser promovida de forma controlada. Cabe destacar que no período DR a mediana e variação das concentrações de PT no efluente final foram menores do que a do momento AR, um comportamento que não era esperado, mas que pode ser justificado pelas melhorias realizadas no controle operacional dos reatores no período DR.

O teste de Kruskal-Wallis confirmou a existência de diferenças significativas entre as concentrações de PT dos períodos ( $p < 0,001$ ). O post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas entre os 3 períodos ( $p < 0,008$  em todas as comparações).

### 6.2.3.3 *E. Coli*

As concentrações de *E. Coli* no efluente final são apresentadas em série temporal e diagrama de caixa, divididos pelos períodos de tratamento da ETE, na Figura 6.20, ressaltasse que nesse caso os eixos Y estão em escala logarítmica. As estatísticas descritivas são apresentadas na Tabela 6.14.



Nota: AR=antes da reforma; R= durante a reforma; DR= depois da reforma.

Figura 6.20 - Série Temporal e Diagramas de caixa de *E. Coli* do efluente tratado conforme período operacional da ETE

Tabela 6.14 – Estatísticas Descritivas de *E. Coli* do efluente conforme o período operacional da ETE

Parâmetros	<i>E. Coli</i> (NMP/100mL)		
	AR	R	DR
Nº de Dados	15	16	47
Média	2,91E+06	6,41E+06	1,87E+06
Média Geométrica	2,17E+06	2,64E+06	1,51E+06
Mediana	2,42E+06	4,83E+06	1,73E+06
Máximo	7,27E+06	2,42E+07	6,49E+06
Mínimo	1,99E+05	2,42E+04	1,99E+05
Amplitude	7,07E+06	2,42E+07	6,29E+06
Amplitude Interquartis	1,61E+06	5,93E+06	1,17E+06
Desvio Padrão	2,08E+06	6,90E+06	1,18E+06
Coefficiente de Variação	72%	108%	63%
Erro Padrão	5,37E+05	1,72E+06	1,73E+05
Coefficiente Assimetria	1,03	1,65	1,84

Avaliando tanto a Figura 6.20 quanto a Tabela 6.14, é evidente um aumento da concentração de *E. Coli* no efluente do período AR para o R, seguida de uma redução do período R para o DR, alcançando valores inferiores aos anteriormente apresentados no período AR. O teste de Kruskal-Wallis confirmou a existência de diferenças significativas entre as concentrações de *E. Coli* dos períodos ( $p < 0,01$ ). Contudo, o teste post-hoc de Dunn

indicou a existência de diferenças significativas apenas entre o período R e DR ( $p < 0,005$ ), vale destacar que o valor  $p$  da comparação de AR e DR foi de  $p = 0,078$  e disponibilidade de dados desse parâmetro foi bastante restrita, comprometendo o poder de detecção das análises estatísticas realizadas.

#### 6.2.3.4 Comparação com outros estudos

As faixas de valores observadas (Q10-Q90) no período AR para as concentrações de todos os parâmetros, a exceção de *E. Coli*, no efluente final da ETE são mais amplas e com limites superiores de maior valor do que as apontadas pelos demais trabalhos, o que até certo ponto era esperado tendo em vista que também foram observadas faixas de concentração no esgoto afluente superiores as informadas por essas mesmas referências bibliográficas.

Comparando as faixas de valores do período R com as da literatura, se observou em relação a todos os parâmetros, a exceção de NT e PT, limites inferiores menores. Esse comportamento era esperado em função de a ETE Sobradinho ter operado no período R com um sistema de tratamento misto de TPQA e Lodos Ativado Convencional, sendo esperada uma eficiência melhor do que a tipicamente encontrada em sistemas apenas com TPQA.

Já em relação ao período DR, se obteve limites inferiores e limites superiores menores ou iguais ao reportado pela literatura para DBO e SS, enquanto para DQO apenas o limite superior foi menor. Já para NT e PT a concentração teve limites superiores maiores. Por fim em relação a *E. Coli* os dados possuem faixas mais estreitas de valores do que as apontadas pela literatura, tendo valores superiores aos reportados por Oliveira e von Sperling (2005) e inferiores aos de von Sperling (2014). Assim, é possível afirmar que a reforma da ETE trouxe melhorias a qualidade do efluente nos três parâmetros a qual foi projetada para remover (DBO, DQO e SS), alcançando níveis de qualidade superiores ao observado na literatura para sua tecnologia de tratamento.

A Tabela 6.15 apresenta as faixas de valores observadas e preconizadas como típicas por outros trabalhos, conforme o sistema de tratamento de cada período operacional da ETE.

Tabela 6.15 - Faixas de DBO, DQO e SS no esgoto efluente a ETE Sobradinho nos diferentes períodos avaliados em relação outros trabalhos.

Parâmetro	Período	von Sperling (2014)	Oliveira e von Sperling (2005)	Jordão e Pessoa (2014)	Observada
Faixa DBO (mg/L)	AR	15 a 40	16 a 58	20 a 30	22 a 81
	R	60 a 150	-		44 a 140
	DR	15 a 40	16 a 58	20 a 30	8 a 28
Faixa DQO (mg/L)	AR	45 a 120	35 a 188		100 a 218
	R	150 a 250	-		114 a 328
	DR	45 a 120	35 a 188		44 a 90
Faixa SS (mg/L)	AR	20 a 40	13 a 130	20 a 30	28 a 107
	R	30 a 90	-		21 a 114
	DR	20 a 40	13 a 130	20 a 30	9 a 26
Faixa NT (mg/L)	AR	>20	12 a 33		-
	R	>30	-		48 a 69
	DR	>20	12 a 33		45 a 66
Faixa PT (mg/L)	AR	>4	1 a 2		2 a 8
	R	<2	-		1 a 7
	DR	>4	1 a 2		2 a 7
Faixa <i>E. Coli</i> (NMP/100mL)	AR	10 <sup>6</sup> a 10 <sup>7</sup>	2,9x10 <sup>4</sup> a 2,5x10 <sup>5</sup>		9,6x10 <sup>5</sup> a 6,1x10 <sup>6</sup>
	R	10 <sup>6</sup> a 10 <sup>7</sup>			4,6x10 <sup>5</sup> a 1,5x10 <sup>7</sup>
	DR	10 <sup>6</sup> a 10 <sup>7</sup>	2,9x10 <sup>4</sup> a 2,5x10 <sup>5</sup>		6,1x10 <sup>5</sup> a 2,5x10 <sup>6</sup>

## 6.2.4 Eficiências da ETE Sobradinho

### 6.2.4.1 DBO, DQO e SS:

As distribuições das eficiências de remoção da ETE para os parâmetros de DBO, DQO e SS, são apresentadas nos diagramas de caixa da Figura 6.21.

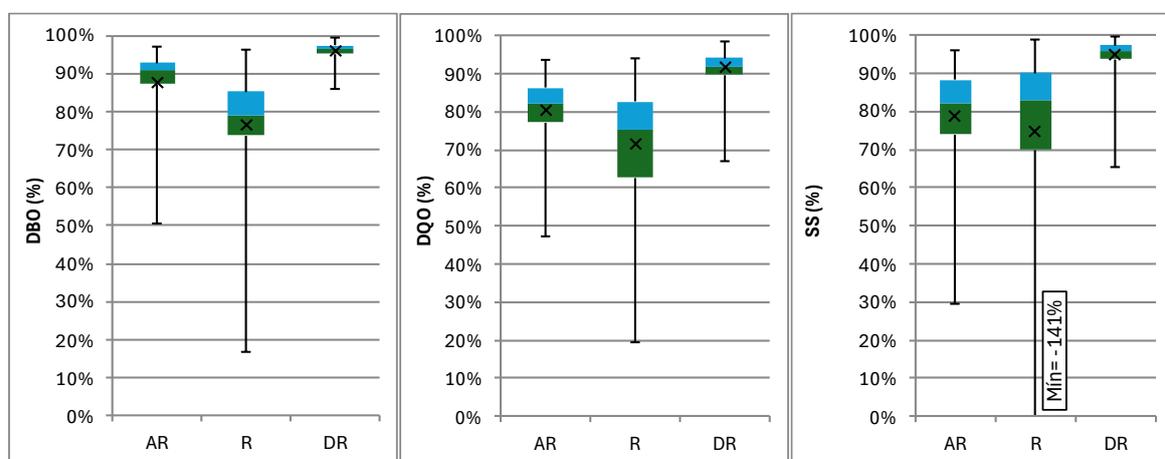


Figura 6.21 - Diagramas de caixa das eficiências de remoção da ETE para os parâmetros de DBO, DQO e SS nos intervalos temporais de operação analisados

Tabela 6.16 – Eficiências de remoção de DBO, DQO e SS conforme o período de operação da ETE

Parâmetros	DBO (mg/L)			DQO (mg/L)			SS (mg/L)		
	AR	R	DR	AR	R	DR	AR	R	DR
Nº de Dados	48	63	170	123	160	357	123	159	353
Média	87,56%	76,44%	95,98%	80,28%	71,40%	91,54%	78,49%	74,75%	94,85%
Média Geométrica	86,83%	74,19%	95,95%	79,65%	69,30%	91,44%	76,86%	-	94,74%
Mediana	91,02%	79,12%	96,50%	82,13%	75,44%	91,94%	82,08%	82,71%	95,67%
Máximo	97,14%	96,23%	99,33%	93,54%	94,02%	98,55%	95,86%	98,87%	99,75%
Mínimo	50,40%	16,75%	86,00%	47,25%	19,31%	66,83%	29,45%	-141,2%	65,52%
Amplitude	46,74%	79,48%	13,33%	46,29%	74,71%	31,72%	66,41%	240,04%	34,24%
Amplitude Interquartis	5,66%	11,38%	2,29%	9,04%	19,92%	4,59%	14,36%	20,28%	3,71%
Desvio Padrão	10,28%	14,93%	2,26%	9,34%	15,28%	4,14%	14,06%	28,45%	4,17%
Coefficiente de Variação	11,74%	19,53%	2,35%	11,63%	21,39%	4,53%	17,91%	38,05%	4,40%
Erro Padrão	1,48%	1,88%	0,17%	0,84%	1,21%	0,22%	1,27%	2,26%	0,22%
Coefficiente Assimetria	-2,27	-1,92	-1,57	-1,66	-1,09	-1,41	-1,51	-4,16	-3,18

A menor eficiência de remoção de DBO, obtida no período R em relação aos demais períodos (Figura 6.21), é justificada pela alteração do tratamento da ETE, em que se implementou em carácter emergencial o TPQA, visando minimizar os impactos da paralisação do reator aerados de nível variável. O aumento da dispersão das eficiências de remoção no período R, em relação aos demais períodos (Tabela 6.16), pode ser justificado pelo tempo de ajuste e otimização da dosagem de químicos para as condições e variações das características do esgoto afluente, além do tempo necessário para o estudo e treinamento dos operadores ao processo de TPQA.

No período DR a ETE apresentou maior mediana e menor variação da eficiência de remoção de DBO, DQO e SS do que no período AR (Figura 6.21), períodos com o mesmo sistema de tratamento. Esse comportamento se justifica pelo melhor controle operacional, possibilitado pelos sensores de OD e SS em tempo real nos reatores biológicos aerados, e pela melhor distribuição dos aeradores no reator aerado de nível variável.

As menores eficiências de remoção de DBO e DQO no período R em relação ao período AR e DR são justificadas pela alteração do tratamento da estação no período de reforma da ETE, em que devido à necessidade de paralisação da operação do tanque pulmão (unidade de tratamento biológico da ETE) se implementou em carácter emergencial o TPQA, visando minimizar os impactos dessa redução expressiva de capacidade de tratamento secundário da ETE.

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças tanto para DBO ( $p < 0,001$ ), quanto para DQO ( $p < 0,001$ ) ao longo dos períodos de operação. O post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas entre os 3 períodos tendo  $p < 0,006$  em todos os casos.

No que se refere a SS, a eficiência de remoção do período R se manteve similar ao período AR, tendo o post-hoc de Dunn do teste de Kruskal-Wallis apresentado  $p = 0,35$ , indicando a robustez do funcionamento dos decantadores primários e secundários mesmo com a implementação do TPQA. Já o período DR apresentou diferenças significativas em relação aos demais tendo o post-hoc de Dunn do teste de Kruskal-Wallis apresentado  $p < 0,001$  em ambos os casos.

#### 6.2.4.2 NT, PT e *E. Coli*:

As distribuições das eficiências de remoção da ETE para os parâmetros de NT, PT e *E. Coli*, são apresentadas em diagramas de caixas na Figura 6.22. Ressalta-se que a ETE não foi projetada visando a remoção de nutrientes e patógenos, de forma que são esperadas baixas eficiências de remoção nesses parâmetros.

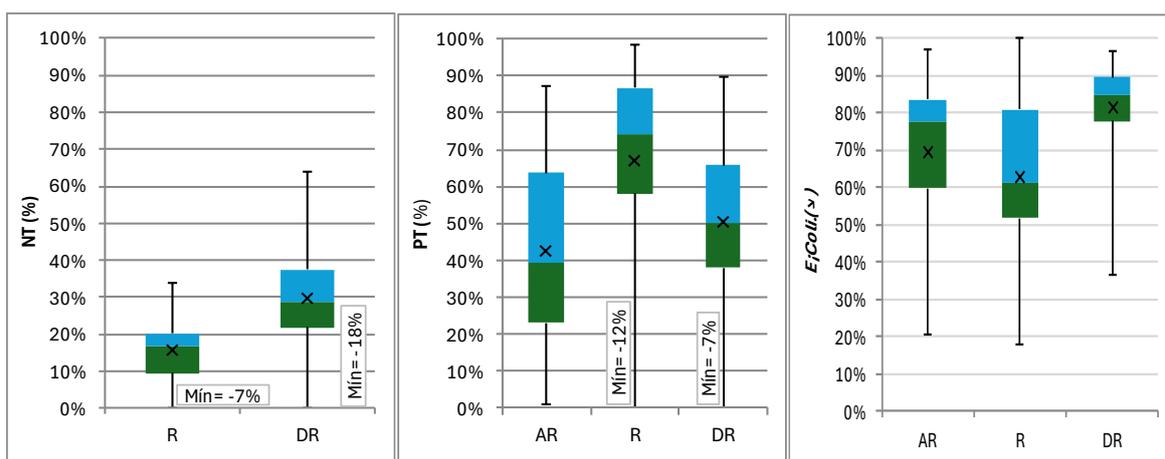


Figura 6.22 – Diagramas de caixa da eficiência de remoção de NT, PT e *E. Coli* conforme período de operação da ETE

Tabela 6.17 – Eficiências de remoção de NT, PT e *E. Coli* conforme o período de operação

Parâmetros	NT (mg/L)		PT (mg/L)			<i>E. Coli</i> (mg/L)		
	R	DR	AR	R	DR	AR	R	DR
Nº de Dados	30	315	116	152	346	15	16	47
Média (%)	15,81%	29,62%	42,30%	67,02%	50,53%	69,46%	62,60%	81,46%
Média Geométrica (%)	-	-	34,07%	-	-	64,01%	56,79%	80,12%
Mediana (%)	16,93%	28,75%	39,23%	74,32%	50,06%	77,57%	61,20%	84,72%
Máximo (%)	33,71%	63,89%	87,12%	98,42%	89,55%	96,94%	99,96%	96,54%
Mínimo (%)	-7,02%	-17,65%	1,10%	-12,12%	-6,95%	20,39%	17,91%	36,65%
Amplitude (%)	40,73%	81,54%	86,02%	110,54%	96,50%	76,55%	82,05%	59,89%
Amplitude Interquartis (%)	10,67%	15,72%	40,56%	28,63%	27,87%	23,77%	29,20%	11,83%
Desvio Padrão (%)	8,76%	11,83%	23,35%	25,28%	19,74%	23,60%	25,22%	13,23%

Parâmetros	NT (mg/L)		PT (mg/L)			<i>E. Coli</i> (mg/L)		
	R	DR	AR	R	DR	AR	R	DR
Coefficiente de Variação (%)	55,41%	39,94%	55,21%	37,73%	39,06%	33,98%	40,29%	16,25%
Erro Padrão (%)	1,60%	0,67%	2,17%	2,05%	1,06%	6,09%	6,30%	1,93%
Coefficiente Assimetria	-0,20	0,18	0,28	-1,18	-0,36	-1,04	-0,12	-1,63

Em relação ao NT, a ETE apresentou um aumento da mediana de eficiência de remoção do período R para o DR. O teste de Kruskal-Wallis também detectou diferenças significativas entre os momentos R e DR ( $p < 0,001$ ). Destaca-se que, em virtude da ausência de dados de NT no período AR, foi feita apenas a comparação dos períodos R e DR.

No que se refere ao PT, o sistema apresentou, conforme o esperado, um aumento da mediana de eficiência de remoção no período R, em que se realizou o TPQA, isso se deve ao fato de o TPQA ser o único tratamento adotado na estação que possibilita a remoção controlada de PT por meio da precipitação química. Ressalta-se a menor dispersão da distribuição de eficiências no período DR, em relação ao período AR, para a qual não foram encontradas explicações. O teste de Kruskal-Wallis confirmou a existência de diferenças significativas entre as concentrações de PT dos períodos ( $p < 0,001$ ). O post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas entre os 3 períodos ( $p < 0,003$  em todas as comparações).

Tendo em vista que o TPQA se mostrou efetivo para a remoção de PT e que o ribeirão Sobradinho é enquadrado na classe 3 pelo conselho de recursos hídricos do DF (CRHDF, 2014), exigindo níveis rigorosamente baixos de PT em sua água após a mistura do efluente da ETE. A manutenção do TPQA no período DR poderia promover a melhoria da qualidade do efluente do período DR, reduzindo o impacto do lançamento e aproximando a qualidade da água do ribeirão aos limites do enquadramento. Contudo, para uma implantação definitiva dessa tecnologia devem ser avaliadas em profundidade a viabilidade técnica e econômica desse sistema em comparação outras possibilidades tecnológicas. Destaca-se que é prevista a avaliação e implantação de um sistema para remoção de nutrientes na 2ª etapa da 2ª fase de ampliação da ETE Sobradinho (CAESB, 2017).

Já no que tange a *E. Coli*, não era esperada uma alteração expressiva das distribuições de eficiências entre os momentos da ETE, sendo inesperado o aumento da mediana e a redução da variação de eficiência de remoção encontrados no período DR. Enfatiza-se que o número de dados de *E. Coli* é baixo para a caracterização da eficiência de tratamento da ETE, apenas permitindo ter uma noção do comportamento geral, podendo as eficiências reais diferirem consideravelmente do calculado.

O teste de Kruskal-Wallis confirmou a existência de diferenças significativas entre as concentrações de *E. Coli* dos períodos ( $p=0,01$ ). Contudo, o post-hoc de Dunn indicou a existência de diferenças significativas apenas entre o período R e DR ( $p=0,007$ ), vale destacar que o valor p da comparação de AR e DR foi de  $p=0,06$  e disponibilidade de dados desse parâmetro foi bastante restrita, comprometendo o poder de detecção das análises estatísticas realizadas

#### 6.2.4.3 Comparação com outros estudos

A Tabela 6.18 apresenta as faixas de eficiência de remoção obtidas pela ETE Sobradinho, em seus diferentes momentos operacionais, em relação as faixas reportadas pela literatura especializada.

Tabela 6.18 - Faixas de eficiência de remoção da ETE Sobradinho nos diferentes períodos avaliados em relação a literatura especializada

Parâmetro	Período	von Sperling (2014)	Oliveira e von Sperling (2005)	Jordão e Pessoa (2014)	Observada
Eficiência DBO (%)	AR	85 a 93	74 a 96	85 a 95	77,5 a 94,7
	R	45 a 80	-	-	62,3 a 91,4
	DR	85 a 93	74 a 96	85 a 95	93,7 a 98,2
Eficiência DQO (%)	AR	80 a 90	62 a 93	-	69,4 a 89,4
	R	55 a 75	-	-	48,8 a 86,3
	DR	80 a 90	62 a 93	-	86,4 a 96,4
Eficiência SS (%)	AR	87 a 93	53 a 95	85 a 95	59,7 a 91,7
	R	60 a 90	-	-	45,0 a 93,8
	DR	87 a 93	53 a 95	85 a 95	90,9 a 98,6
Eficiência NT (%)	AR	<60	20 a 78	-	-
	R	<30	-	-	6,5 a 25,6
	DR	<60	20 a 78	-	16,8 a 44,7
Eficiência PT (%)	AR	<35	35 a 55	-	13,7 a 76,1
	R	75-90	-	-	25,1 a 92,1
	DR	<35	35 a 55	-	25,9 a 75,0
Eficiência <i>E. Coli</i> (%)	AR	90 a 99	96 a 99,8	-	33,0 a 92,9
	R	90	-	-	29,2 a 97,0
	DR	90 a 99	96 a 99,8	-	65,6 a 94,5

As eficiências de remoção de DBO, DQO e SS do período AR possuem uma faixa com valores abaixo e dentro do esperado teoricamente segundo von Sperling (2014) e Jordão e Pessoa (2014), contudo, se encontram inteiramente dentro da faixa obtida por Oliveira e von Sperling (2005) para ETEs de lodos ativados, incluindo as modalidades convencional e

aeração prolongada, indicando que a ETE Sobradinho teve uma eficiência comparável aos sistemas de Lodos Ativados empregados no sudeste brasileiro.

No período R se observou faixas de eficiências de remoção DBO, DQO e SS mais amplas do que as típicas de TPQA, o que era esperado em virtude de o tratamento durante esse período ter sido realizado com sistema de lodos ativados em conjunto com TPQA. Destaca-se novamente que o processo de TPQA foi implementado em carácter emergencial, sendo os ajustes realizados durante a própria operação. Portanto, é justificável que DQO e SS tenham tido eficiências menores do que as indicadas pela literatura em parte do tempo, assim como maiores em relação a DBO, DQO e SS.

Já no período DR as eficiências de remoção de DBO, DQO e SS possuem faixas mais estreitas, se encontrando dentro e acima da faixa reportada pelos 3 autores tomados por referência. Portanto, o sistema depois da reforma tem conseguido operar de maneira satisfatória em relação ao esperado para a tecnologia adotada, obtendo eficiências equiparáveis as de sistema de tratamentos mais sofisticados, como lodos ativados seguido de filtração terciária, que segundo von Sperling (2014), apresentam faixas de remoção de 93-98%, 90-95% e 93-97% respectivamente para DBO, DQO e SS. Uma possível justificativa para essa maior eficiência de remoção de DBO, DQO e SS é o fato de a ETE operar com vazão média inferior a sua capacidade de projeto, sendo o sistema subutilizado e possivelmente tendo parâmetros operacionais próximos aos de um sistema de lodos ativados de aeração prolongada.

Com relação a NT, tanto o período R como o DR inesperadamente apresentaram eficiências de remoção inferiores as típicas de suas tecnologias de tratamento, de acordo com von Sperling (2014), tendo cerca de 25% dos seus dados com valores abaixo das obtidas por Oliveira e von Sperling (2005) em ETEs de lodos ativados do sudeste brasileiro.

Em relação a PT, a ETE no período AR apresentou faixas mais amplas, com cerca de metade dos seus valores de eficiência de remoção superiores ao indicado por von Sperling (2014), contudo, 41% dos valores estiveram abaixo e 28% estiveram acima em relação à faixa apontada por Oliveira e von Sperling (2005). No período R cerca de 50% dos dados foram abaixo da faixa típica de eficiências indicada por von Sperling (2014) o que era esperado em função de parte do efluente não passar pelo TPQA, sendo tratado por sistema convencional de lodos ativados, onde a eficiência de remoção não é objetivada. Destaca-se como inesperado que 14% dos dados de eficiência de remoção estiveram acima da faixa típica indicada. Por fim, com relação ao período DR, a remoção de PT foi, em geral, superior a apontada por von Sperling (2014) em cerca de 75% dos dados e superior a de Oliveira e

von Sperling (2005) em 44% dos dados, indicando que o tratamento teve eficiências de remoção satisfatórias em relação a fósforo nesse período.

Já com relação a *E. Coli*, apesar de ter tido em alguns dias valores de eficiência condizentes ao preconizado pela literatura, a ETE apresentou em geral eficiências de remoção inferiores em todos os períodos.

Ressalta-se novamente que a remoção de NT, PT e *E. Coli* não são objetivos do sistema de tratamento empregado na ETE Sobradinho, sendo as eficiências de remoção observadas efeitos colaterais do tratamento empregado.

### 6.3 AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DA SAZONALIDADE E AFLUÊNCIA DE ÁGUAS PLUVIAIS

As séries históricas de vazão e concentração dos poluentes no esgoto afluente a ETE Sobradinho (apresentadas nos itens 6.2.1 e 6.2.2) apontam para a ocorrência de valores distintos no período de seca e no período de chuvas. Dessa forma, visando investigar essa situação procedeu-se à determinação do período de chuvas típico nos anos de 2017 a 2023 e a análise de sazonalidade. Os resultados obtidos são apresentados nos tópicos subsequentes.

#### 6.3.1 Determinação do período de chuvas

A avaliação visual dados de janeiro de 2017 a fevereiro de 2023 da estação pluviométrica localizada na ETE Sobradinho indicam que o período de chuvas vai de novembro até abril e o de seca vai de maio até outubro, sendo abril e outubro meses de transição (Figura 6.23).

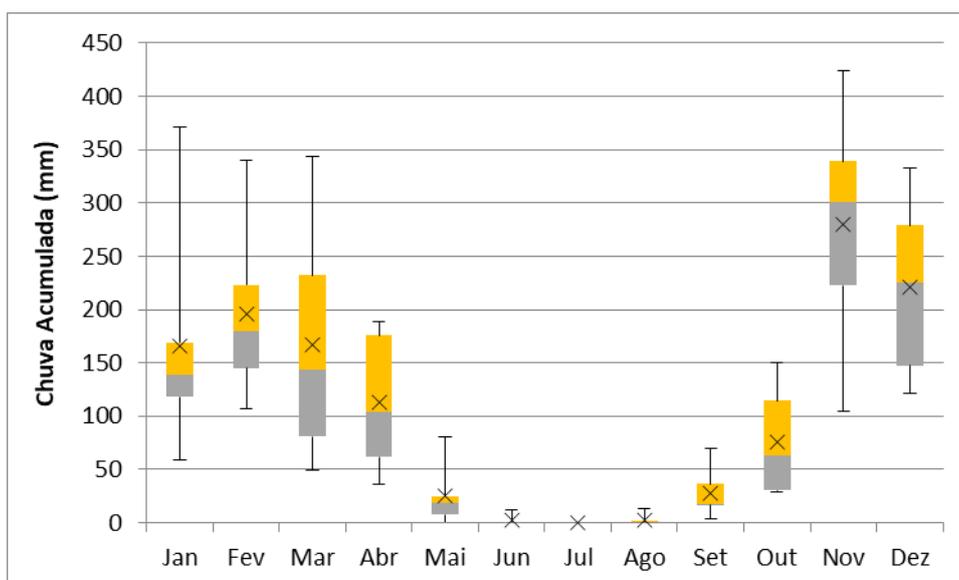


Figura 6.23 – Diagrama de caixas da chuva acumulada mensal da estação pluviométrica da ETE Sobradinho no período de 2017 a fevereiro de 2023

A aplicação do teste de Kruskal-Wallis corroborou com a análise visual da Figura 6.23, obtendo diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre os meses do período de chuvas e do de seca. No que se refere aos meses de transição, abril teve diferenças significativas apenas com junho, julho e agosto ( $p \leq 0,01$ ), enquanto outubro teve diferenças significativas com junho, julho, agosto e novembro ( $p \leq 0,04$ ), e teve  $p = 0,08$  no teste de Dunn comparando com dezembro.

Assim, para as análises do presente estudo, que focam no entendimento do comportamento da ETE no período de 2017 a 2023, foi adotada a definição do período de seca como entre os meses de maio e outubro e do período de chuvas como os meses de novembro a abril. Essa definição se difere da apresentada por Barros (2003) para o Distrito Federal, em que o período de seca é tido como de abril a setembro e o de chuvas de outubro a março, sendo os meses de abril e outubro de transição entre os períodos, dotados de precipitações intermediárias. Contudo, a autora também destaca a variação espacial das chuvas dentro no DF, podendo justificar a diferença entre o regime pluvial de Sobradinho em relação à média obtida no DF.

### 6.3.2 Vazão

Tendo em vista o aumento das vazões a partir de 2020, se dividiu os dados de vazão em 2 períodos: 2017 a 2019 e 2020 a 2023. Os diagramas de caixa das vazões mensais em cada período, são apresentados na Figura 6.24 e na Figura 6.25, respectivamente.

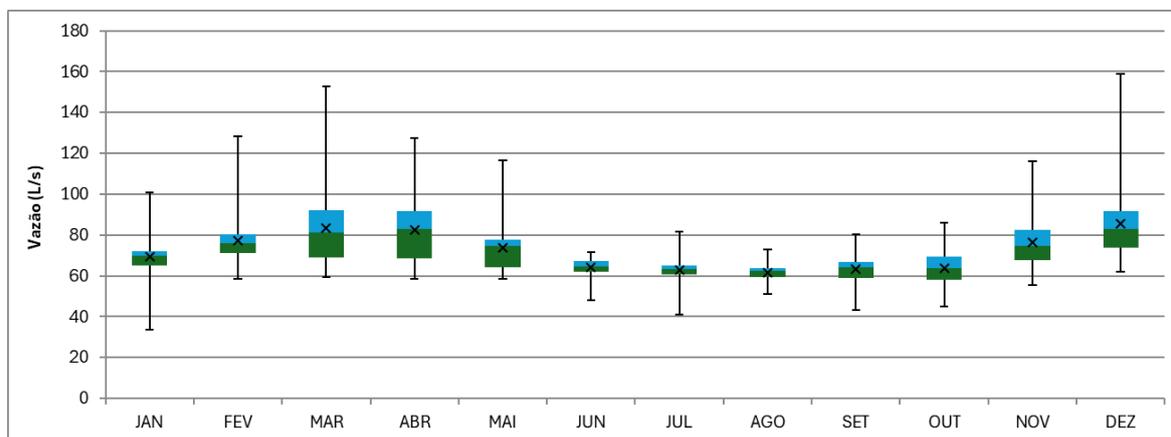


Figura 6.24 - Diagrama de caixas mensal elaborado a partir das vazões médias diárias do período de 2017 a 2019

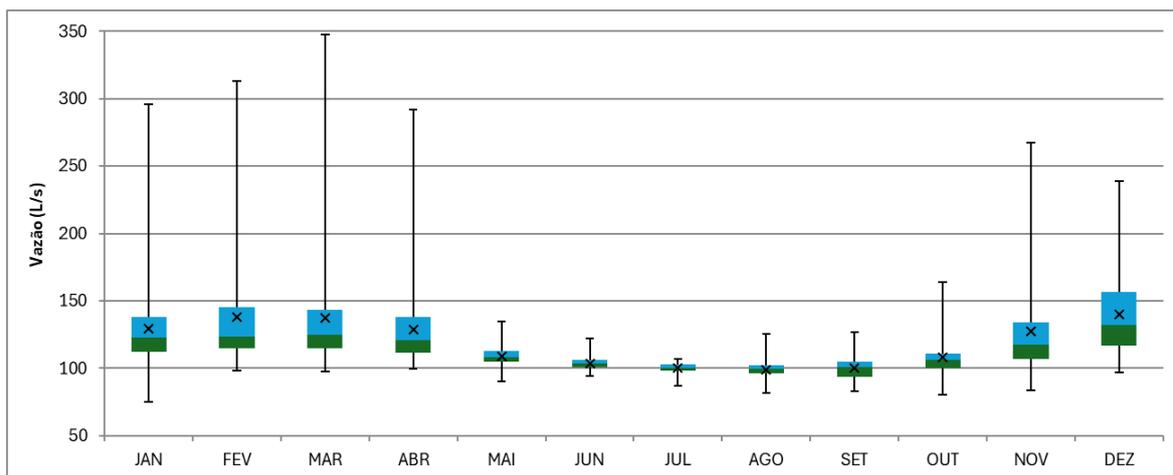


Figura 6.25 - Diagrama de caixas mensal elaborado a partir das vazões médias diárias do período de 2020 a outubro de 2023

Pela análise dos diagramas de caixa percebe-se que a vazão de esgoto afluente a ETE não é uniforme ao longo dos meses. Nos dois períodos as vazões foram superiores nos meses de novembro a abril, sendo a vazão de abril superior à de outubro, o que corrobora a definição do período de chuvas adotada. Além disso, foi aplicado o teste de Mann-Whitney comparando nos dois períodos as vazões e, conforme o esperado, foram encontradas diferenças significativas tanto no período de 2017 a 2019 ( $p < 0,001$ ) quanto no período de 2020 a 2023 ( $p < 0,001$ ).

A existência de diferenças entre a vazão afluente à ETE conforme a sazonalidade é um forte indicativo da existência de ligações clandestinas de águas pluviais na rede de esgoto da região. As séries temporais e diagramas de dispersão da precipitação acumulada e vazão média afluente a ETE (Figura 6.26 e Figura 6.27) destacam a aparente correlação entre a precipitação acumulada e a vazão afluente à ETE. Os testes de Spearman indicaram que se trata de uma correlação significativa em ambos os casos ( $p < 0,001$ ).

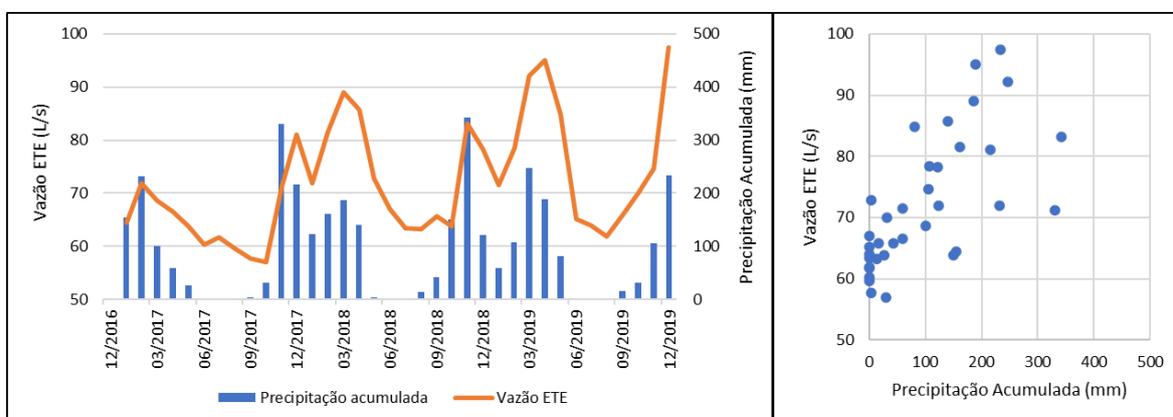


Figura 6.26 – Série temporal e diagrama de dispersão da precipitação acumulada mensal e vazão média mensal da ETE Sobradinho no período de 2017 a 2019.

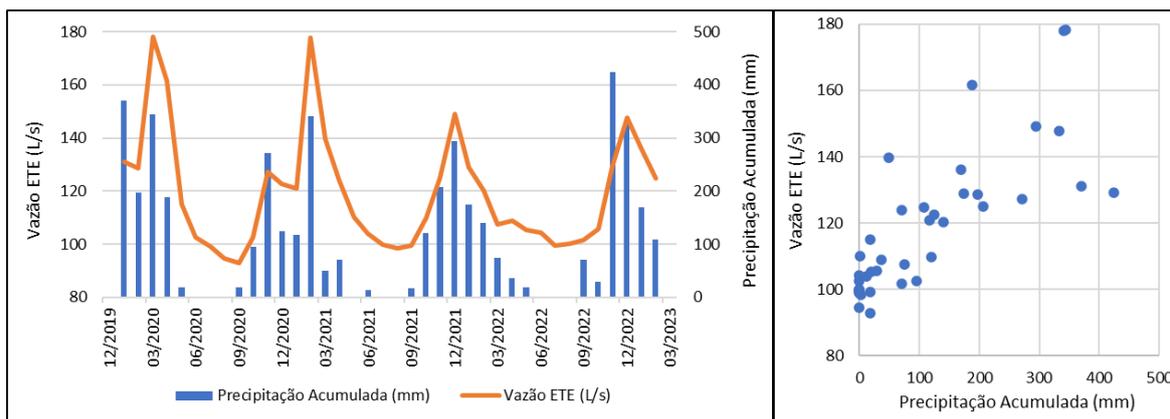


Figura 6.27 – Série temporal e diagrama de dispersão da precipitação acumulada mensal e vazão média mensal no período de janeiro de 2020 a fevereiro de 2023.

Replicando o processo de Tsutiya e Bueno (2004) estimou-se o incremento máximo de vazão promovido pela afluência indevida de águas pluviais no SES através da diferença da vazão máxima do período de chuvas em relação à máxima do período de seca (QMPS). Os valores no período de 2017 a 2019 foram respectivamente de 79%, 60% e 36% sobre QMPS, enquanto no período de 2020 a 2022 foram de 112%, 98% e 105% sobre a QMPS, destacando o impacto que a afluência de águas pluviais pode ter sobre a ETE. Os valores obtidos após 2020 se comparam aos dos 2 SES com maiores influências das águas pluviais citados por Tsutiya e Bueno (2004) e ultrapassam em muito o valor limite, de 50% da vazão de pico, a partir do qual Metcalf e Eddy (2016) indicam que se realize uma investigação para redução da afluência de águas pluviais.

### 6.3.3 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

As diferenças entre as concentrações de DBO afluente dos períodos de chuvas e de seca de cada momento operacional da ETE são aparentes no diagrama de caixas (Figura 6.28), sendo esperada a maior concentração no período de seca, observada nos períodos AR e DR. Os testes de Mann-Whitney indicaram diferenças significativas entre seca e chuvas no momento AR ( $p=0,001$ ) e DR ( $p=0,004$ ). O período R teve comportamento inesperado, com concentrações no período de chuvas maiores do que as do período de secas, contudo, o teste de Mann-Whitney não detectou diferenças significativas nessa comparação ( $p=0,18$ ).

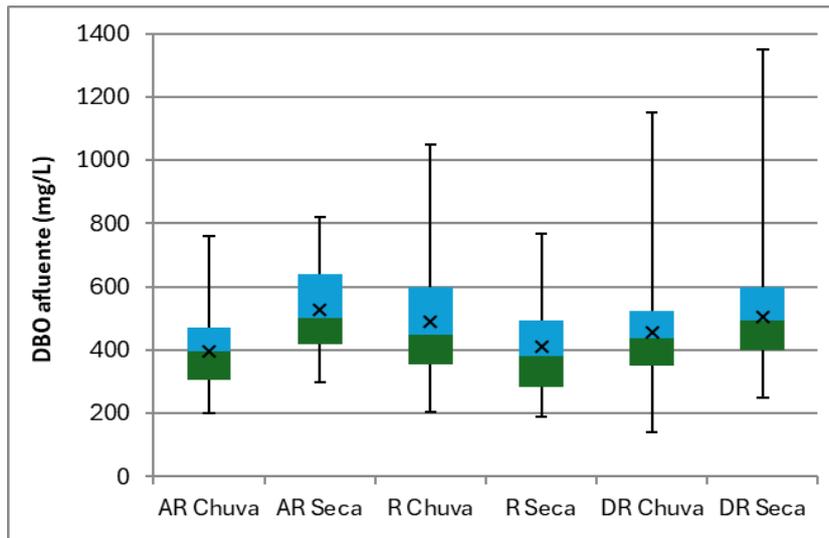


Figura 6.28 – Diagrama de caixas da concentração de DBO no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

Em comparação visual com o afluente, as diferenças entre as concentrações de DBO no efluente, conforme o período pluvial, são mais sutis em todos os momentos operacionais da ETE (Figura 6.29). Os testes de Mann-Whitney entre os períodos de seca e chuvas não indicaram diferenças significativas no momento AR ( $p=0,31$ ) e R ( $p=0,08$ ). Contudo, detectou diferenças significativas no período DR ( $p=0,006$ ). Destaca-se a diferença do poder de detecção dos testes de cada período em função do número de dados disponíveis em cada categoria, o período DR tem mais que o dobro da quantidade de dados do período R e mais que o triplo que o período AR. Além da evidente diferença entre as dispersões dos dados em cada categoria.

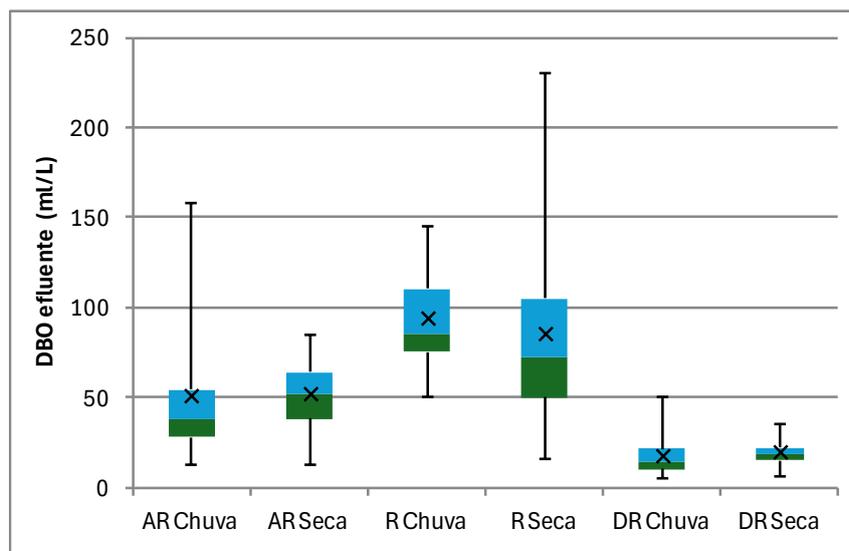


Figura 6.29 - Diagrama de caixas da concentração de DBO no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

O diagrama de caixas das eficiências de redução de DBO (Figura 6.30) não indicam visualmente um comportamento distinto padrão conforme a sazonalidade, no período AR se observa um aumento da amplitude no período de chuvas, contudo, no período R o comportamento se dá de forma oposta, havendo uma redução da amplitude no período de chuvas e o período DR não tem sua amplitude afetada pela sazonalidade. Os testes de Mann-Whitney entre os períodos de seca e chuvas não indicaram diferenças significativas entre as eficiências em nenhum dos 3 momentos: AR ( $p=0,96$ ), R ( $p=0,77$ ) e DR ( $p=0,16$ ). Ou seja, apesar das diferenças das vazões e concentrações no afluente conforme a sazonalidade, a ETE conseguiu manter a eficiência do seu tratamento em relação à DBO, destacando a capacidade do sistema de Lodos Ativados convencional em lidar com variações de carga afluente. Resultados similares foram obtidos por Saliba e von Sperling (2017).

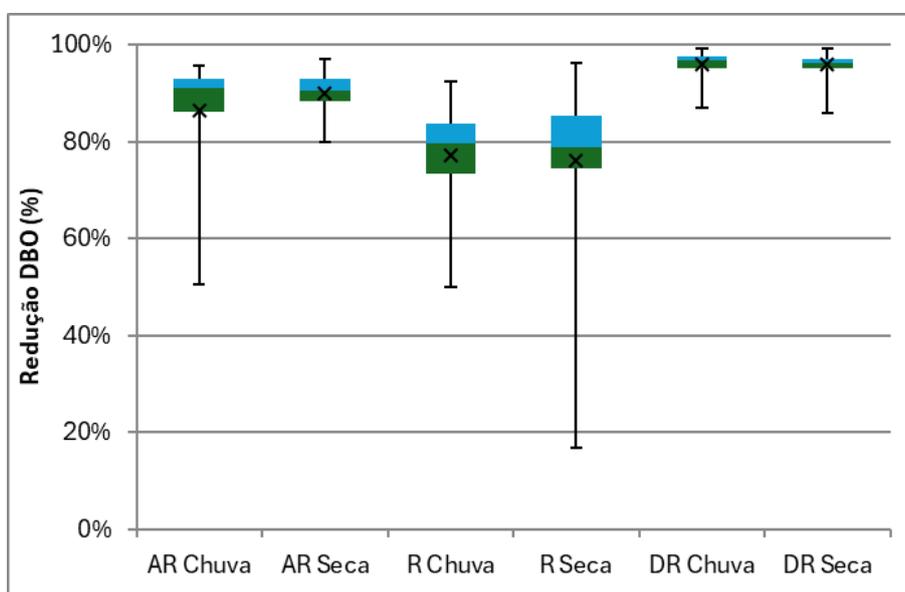


Figura 6.30 - Diagrama de caixas da eficiência de redução de DBO conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

#### 6.3.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A partir do diagrama de caixas é possível ver diferenças aparentes entre as concentrações de DQO afluente dos períodos de chuvas e de seca de cada momento operacional da ETE (Figura 5.31), se confirmando a expectativa de uma maior concentração no período de seca, observada nos 3 momentos operacionais da ETE. Os testes de Mann-Whitney indicaram diferenças significativas entre os períodos de seca e chuvas nos três momentos: AR ( $p<0,001$ ), R ( $p<0,001$ ) e DR ( $p=0,01$ ). Ou seja, no que se refere a DQO, o esgoto afluente a ETE é diferente no período de chuvas em relação ao período de seca

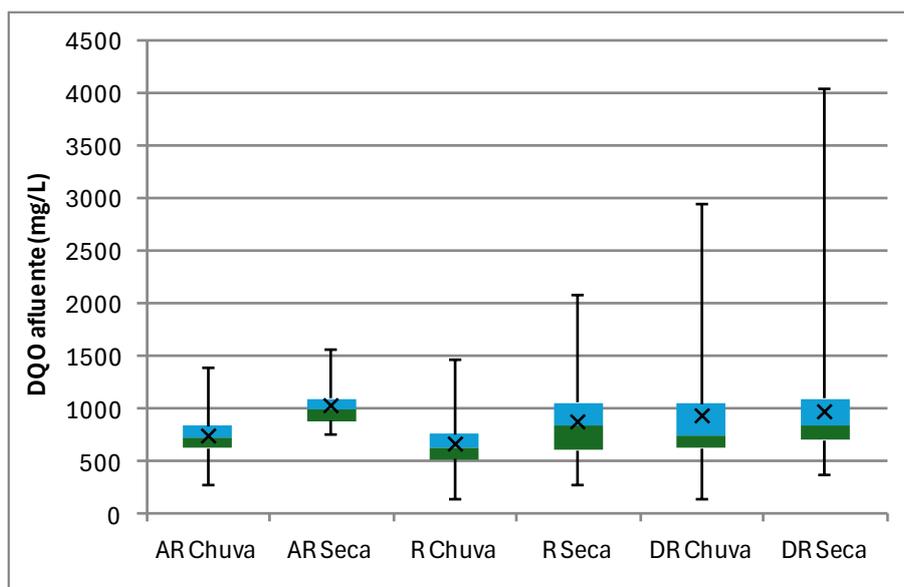


Figura 6.31 – Diagrama de caixas da concentração de DQO no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

Em comparação visual com o afluente, as diferenças entre as concentrações de DQO no efluente, conforme o período pluvial, são mais expressivas em todos os momentos operacionais da ETE (Figura 6.32). Os testes de Mann-Whitney indicaram diferenças significativas entre os períodos de seca e chuvas nos três momentos: AR ( $p=0,003$ ), R ( $p<0,001$ ) e DR ( $p<0,001$ ). Ou seja, as concentrações de DQO no efluente à ETE são diferentes entre os períodos, sendo o período de seca dotado de maiores concentrações.

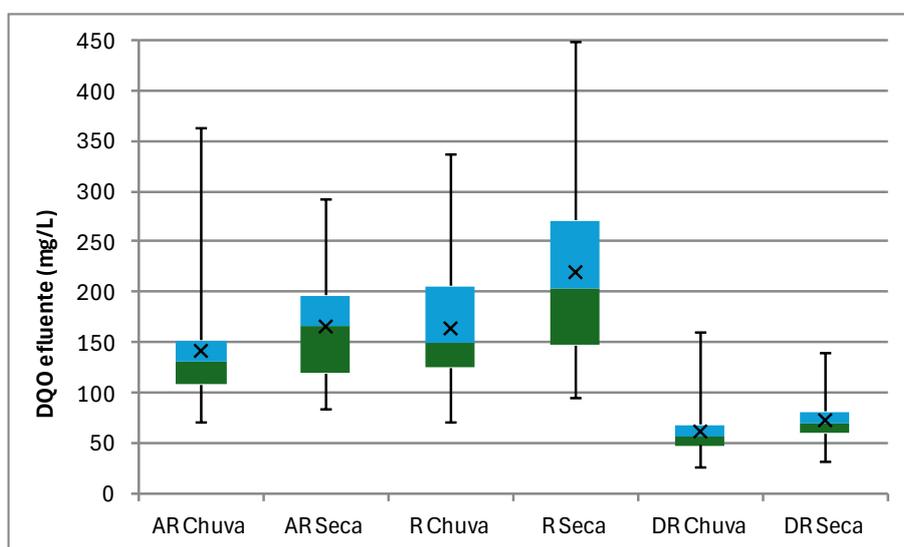


Figura 6.32 - Diagrama de caixas da concentração de DQO no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

O diagrama de caixas das eficiências de redução de DQO (Figura 6.33) apresenta o mesmo comportamento observado para DBO (Figura 6.30) não indicando visualmente um comportamento distinto padrão conforme a sazonalidade. Os testes de Mann-Whitney entre

os períodos de seca e chuvas indicaram diferenças significativas apenas entre as eficiências do período AR ( $p=0,02$ ), sendo o período de seca dotado de melhores eficiências, indicando um impacto negativo da afluência de águas pluviais na eficiência do tratamento da ETE nesse período. Em relação ao período R e DR, é possível afirmar que o desempenho da ETE de redução de DQO não foi afetado consideravelmente pela sazonalidade.

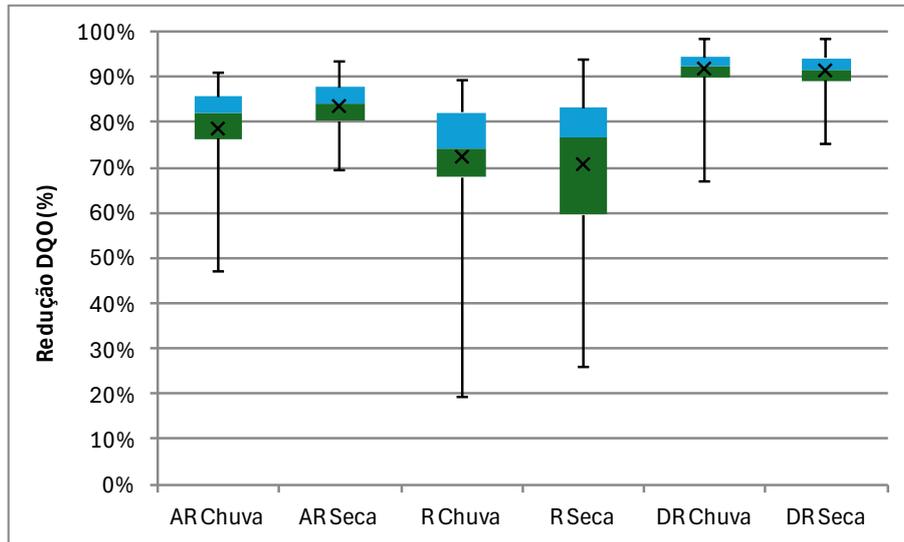


Figura 6.33 - Diagrama de caixas da eficiência de redução de DQO conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

### 6.3.5 Sólidos em Suspensão (SS)

Observam-se diferenças aparentes entre as concentrações de SS afluente dos períodos de chuvas e de seca do período AR e R da ETE (Figura 6.34), sendo maior a concentração no período de seca em relação ao período de chuvas, provavelmente em função da diluição do esgoto pelas águas pluviais. Os testes de Mann-Whitney indicaram diferenças significativas entre seca e chuvas nos períodos AR ( $p<0,001$ ) e R ( $p=0,014$ ). Não foram detectadas diferenças significativas no período DR ( $p=0,4$ ).

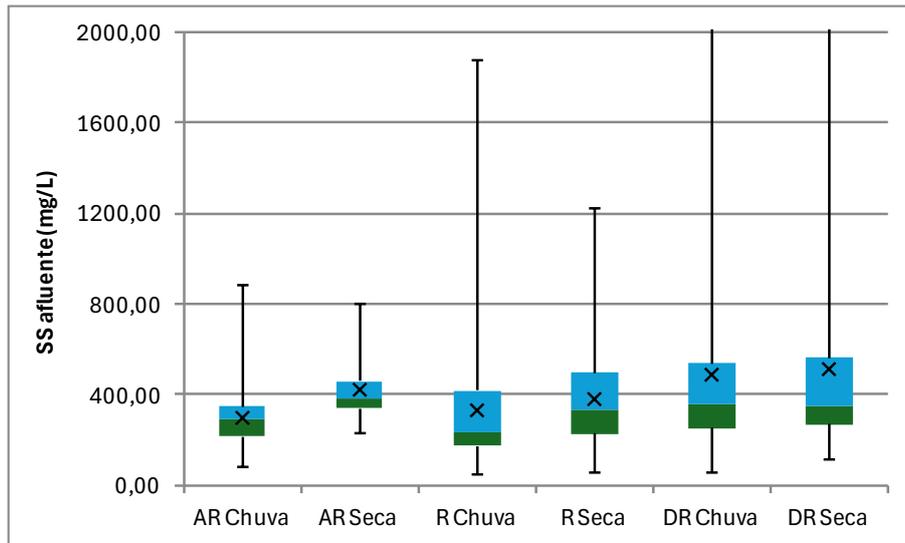


Figura 6.34 – Diagrama de caixas da concentração de SS no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

Em comparação visual com o afluente, as diferenças entre as concentrações de SS no efluente conforme o período pluvial são mais expressivas em todos os momentos operacionais da ETE (Figura 6.35). Os testes de Mann-Whitney entre os períodos de seca e chuvas indicaram diferenças significativas no período R ( $p < 0,001$ ) e DR ( $p < 0,001$ ). O teste do AR ( $p = 0,075$ ) teve valor próximo aos 5%, sendo a não detecção de diferenças significativas possivelmente motivada pelo menor poder de detecção do teste nesse período em função da menor quantidade de dados disponíveis.

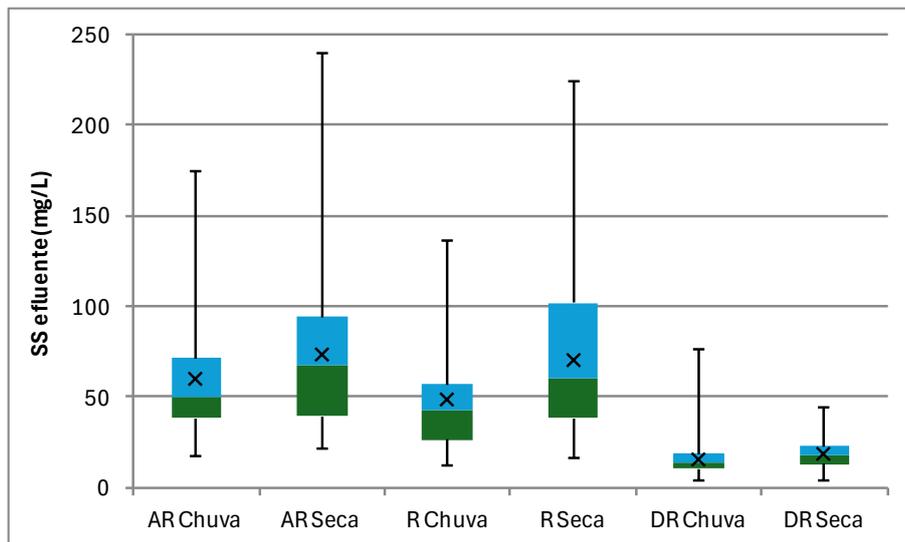


Figura 6.35 - Diagrama de caixas da concentração de SS no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

Por fim, o diagrama de caixas das eficiências de remoção de SS (Figura 6.36) aparenta retratar um comportamento indistinto entre o período de seca e chuvas em todos os

momentos da ETE, com exceção do período AR em que se observa uma redução da média e aumento da amplitude no período de chuvas. Os testes de Mann-Whitney entre os períodos de seca e chuvas indicaram diferenças significativas apenas entre as eficiências do período DR ( $p=0,046$ ), apresentando valor  $p$  próximo ao nível de significância adotado. Assim, é possível afirmar que o desempenho de redução de SS no período AR e R não foi afetado consideravelmente pela sazonalidade, apesar de terem sido encontradas diferenças na concentração afluente no período AR e nas concentrações afluente e efluente no período R.

As eficiências de remoção negativa no período R de seca provavelmente se devem a problemas operacionais, como a resuspensão de sólidos nos decantadores secundários, aumentando a concentração de sólidos acima dos valores de concentração obtidos no afluente.

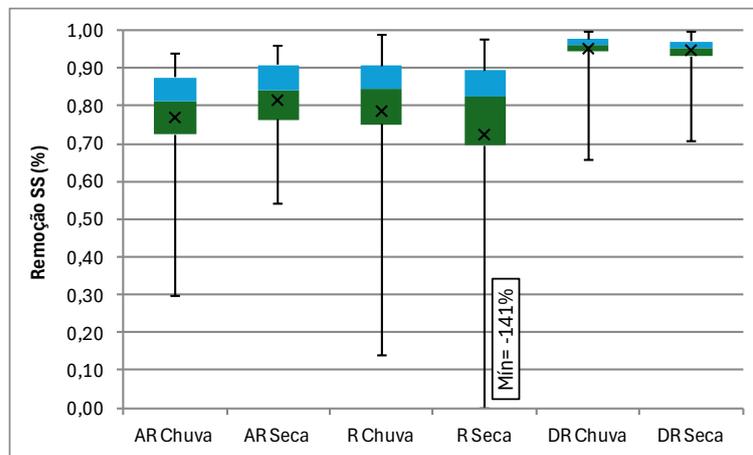


Figura 6.36 - Diagrama de caixas da eficiência de remoção de SS no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

### 6.3.6 Nitrogênio Total (NT)

Devido à inexistência de dados de NT no momento AR e à existência de apenas 2 dados no período de chuvas do momento R, não foi possível realizar a análise da sazonalidade nesses momentos. No que se refere ao momento DR o teste de Mann-Whitney indicou diferenças significativas entre o período de seca e de chuvas, tendo  $U=6294$  e  $p<0,001$ ).

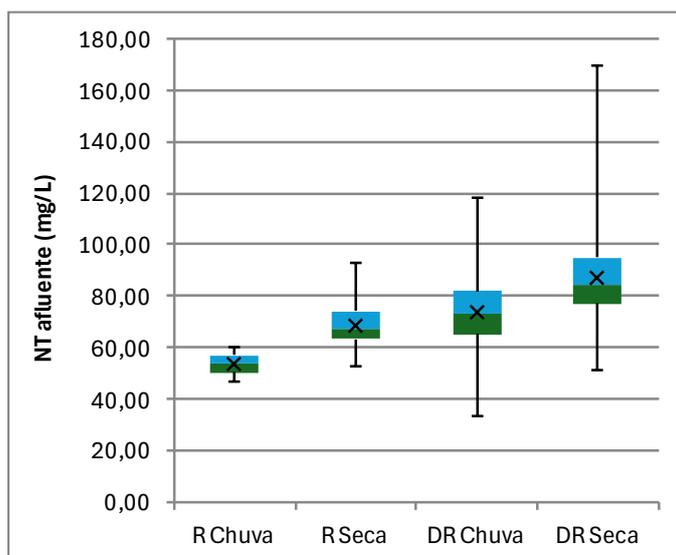


Figura 6.37 – Diagrama de caixas da concentração de NT no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

Assim como no caso das concentrações de NT no afluente, a indisponibilidade de dados no momento AR inviabilizou a aplicação do teste de Mann-Whitney nesse momento operacional da ETE. No que se refere ao momento DR apenas pela análise visual do diagrama de caixas (Figura 6.38) observa-se uma diferença aparentemente significativa entre os períodos de seca e chuvas. O teste de Mann-Whitney indicou diferenças significativas no momento DR ( $U=2235$  e  $p<0,001$ ). O resultado era esperado na medida em que o sistema de tratamento da ETE nesse momento de operação não objetiva a remoção nitrogênio, sendo apenas a redução da concentração do afluente para o efluente apenas um efeito colateral do processo de tratamento.

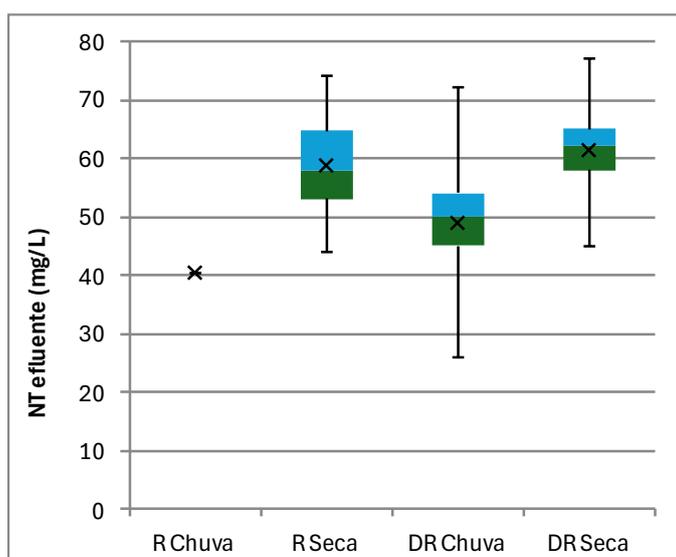


Figura 6.38 - Diagrama de caixas da concentração de NT no efluente da ETE conforme sazonalidade e momento operacional

O diagrama de caixas das eficiências de remoção de NT (Figura 6.39) indica visualmente um comportamento distinto conforme a sazonalidade. O teste de Mann-Whitney do período DR indicou diferenças significativas entre as eficiências no período de seca e de chuvas, tendo  $p=0,96$ . O resultado era esperado na medida em que houve diferenças na concentração afluente e o sistema de tratamento da ETE não objetiva a remoção de NT.

Ressalta-se novamente que a ETE não foi projetada para a remoção de nutrientes e patógenos, sendo as eficiências observadas efeitos colaterais do tratamento executado. Além disso, destaca-se que as eficiências de remoção negativas obtidas nos períodos de seca do momento R e DR ocorreram em dias em que se teve eficiências de remoção negativas de outros parâmetros também, sendo provável a ocorrência de problemas operacionais na ETE nos dias em questão. No caso dos dias do período R em que se teve eficiências negativas de remoção de SS, uma possibilidade é a de resuspensão de sólidos nos decantadores secundários, aumentando a concentração de sólidos e nutrientes acima dos valores de concentração obtidos no afluente.

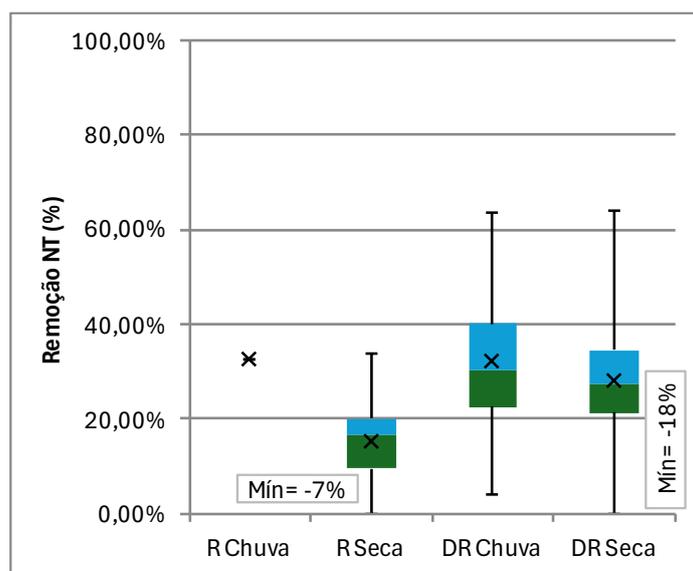


Figura 6.39 - Diagrama de caixas da eficiência de remoção de NT conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

### 6.3.7 Fósforo Total (PT)

Pela observação no diagrama de caixas há indícios de diferenças entre as concentrações de PT afluente dos períodos de chuvas e de seca em todos os momentos operacionais da ETE (Figura 6.40), sendo esperada a maior concentração no período de seca, conforme observado em todos os períodos. Os testes de Mann-Whitney indicaram diferenças significativas entre seca e chuvas entre todos os momentos: AR ( $U=559$  e  $p<0,001$ ), R ( $U=2029$  e  $p=0,006$ ) e DR ( $U=9473$  e  $p<0,001$ ), sendo as concentrações de PT maiores no

período de seca do que no período de chuvas, indicando uma provável diluição do esgoto afluente pela afluência de águas pluviais.

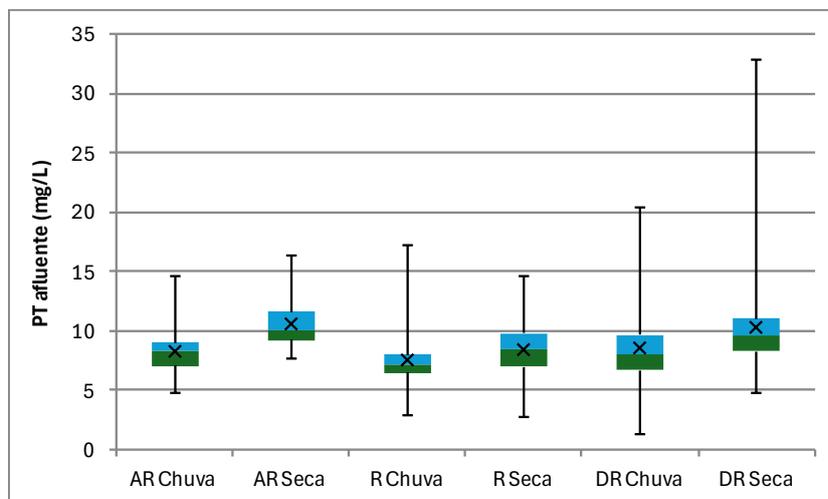


Figura 6.40 – Diagrama de caixas da concentração de PT no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

Com relação as concentrações efluentes, os testes de Mann-Whitney indicaram diferenças significativas entre seca e chuvas entre todos os momentos: AR ( $U=1124$  e  $p=0,006$ ), R ( $U=1628$  e  $p<0,001$ ) e DR ( $U=7570,5$  e  $p<0,001$ ), novamente apresentando maiores concentrações no período de seca em relação ao de chuvas. A perpetuação da diferença significativa do afluente para o efluente era esperada para o período AR e DR, devido à ausência de tecnologias focadas na remoção de fósforo; e pode ser justificada no período R em função da dificuldade de ajuste da dosagem de coagulantes e tempo de detenção do TPQA na ocorrência de oscilação da vazão e concentração do esgoto.

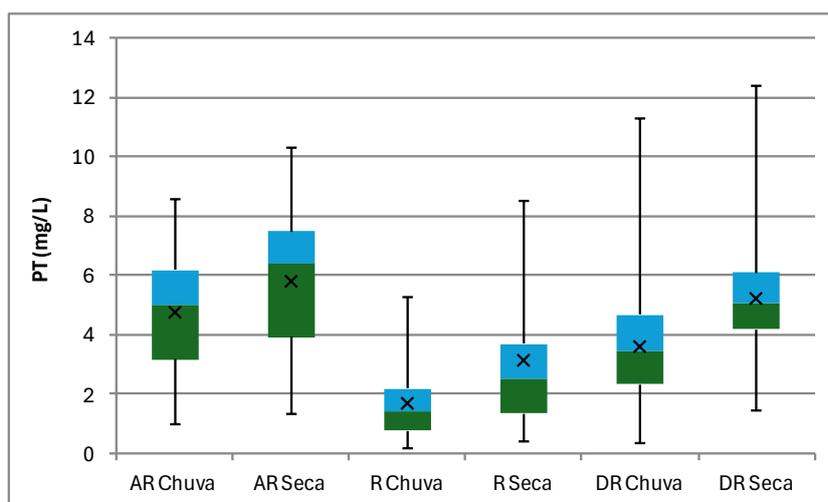


Figura 6.41 - Diagrama de caixas da concentração de PT no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

O diagrama de caixas das eficiências de redução de PT (Figura 6.42) indica visualmente um comportamento distinto das eficiências conforme a sazonalidade no período R e DR. Os testes de Mann-Whitney entre os períodos de seca e chuvas indicaram diferenças significativas entre as eficiências nos momentos R ( $U=1835$  e  $p=0,001$ ) e DR ( $U=10736,5$  e  $p<0,001$ ). Contrariando o esperado o momento AR ( $U=1524$  e  $p=0,8$ ) não apresentou diferenças em relação a sazonalidade. Na medida em que houve diferenças na concentração afluente e efluente conforme a sazonalidade e o sistema de tratamento da ETE não objetiva a remoção de PT, à exceção do momento R, era esperado que as eficiências de remoção de PT fossem diferentes conforme a sazonalidade em todos os períodos.

Ressalta-se novamente que a ETE não foi projetada para a remoção de nutrientes e patógenos, sendo as eficiências observadas efeitos colaterais do tratamento executado. Além disso, destaca-se que as eficiências de remoção negativas obtidas nos períodos de seca do momento R e DR ocorreram em dias em que se teve eficiências de remoção negativas de outros parâmetros também, sendo provável a ocorrência de problemas operacionais na ETE nos dias em questão. No caso dos dias do período R em que se teve eficiências negativas de remoção de SS, uma possibilidade é a de resuspensão de sólidos nos decantadores secundários, aumentando a concentração de sólidos e nutrientes acima dos valores de concentração obtidos no afluente.

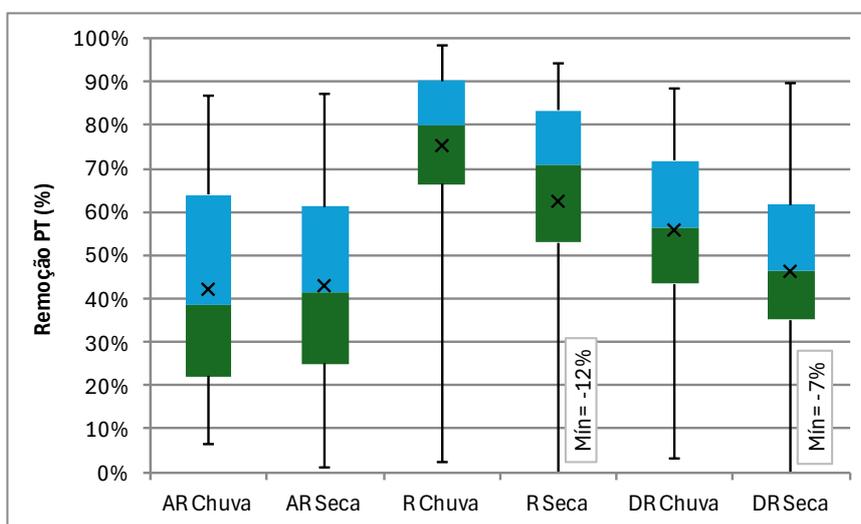


Figura 6.42 - Diagrama de caixas da eficiência de redução de PT no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

### 6.3.8 E. Coli

Os testes de Mann-Whitney indicaram diferenças significativas entre as concentrações de *E. Coli* no período de seca e chuvas apenas no momento DR ( $U=146$  e  $p=0,005$ ). Os períodos AR e R tiveram comportamento inesperado, com concentrações no

período de chuvas maiores do que as do período de secas, contudo, os testes de Mann-Whitney não detectaram diferenças significativas nessas comparações. Destaca-se que os testes de Mann-Whitney podem não ter encontrado diferenças significativas no período AR e R em função da baixa quantidade de dados, tendo os grupos dos períodos AR e R menos de 10 dados, o que confere baixo poder de detecção aos testes.

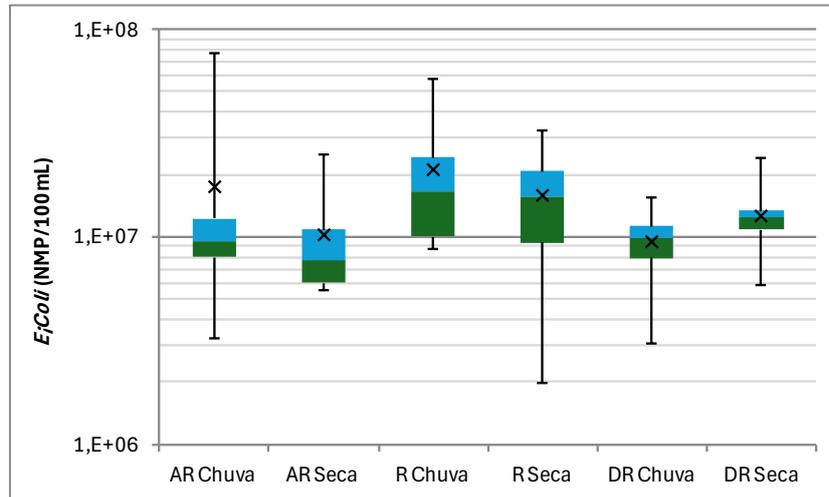


Figura 6.43 – Diagrama de caixas da concentração de *E. Coli* no afluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

Os testes de Mann-Whitney entre os períodos de seca e chuvas não indicaram diferenças significativas das concentrações de *E. Coli* no efluente em nenhum dos 3 momentos operacionais da ETE, momento AR ( $p=0,53$ ) e R ( $p=0,44$ ). Contudo, detectou diferenças significativas no período DR ( $p=0,51$ ). Destaca-se novamente o baixo poder de detecção dos testes em função do pequeno número de dados em cada grupo de dados avaliado.

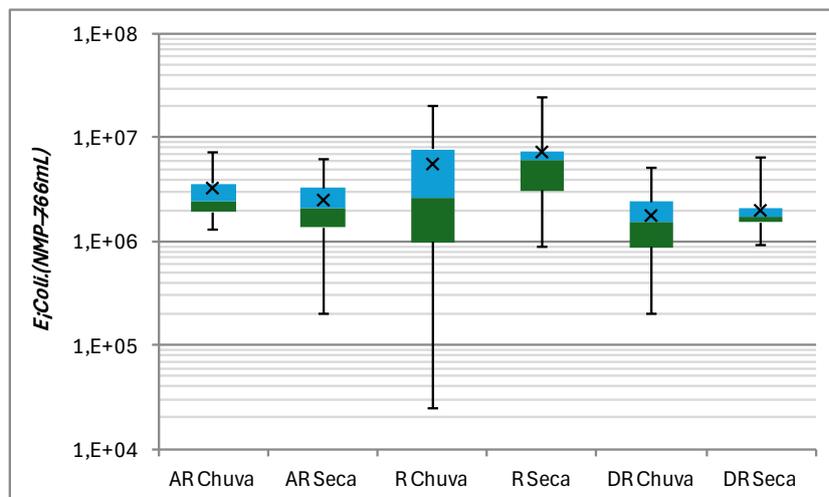


Figura 6.44 - Diagrama de caixas da concentração de *E. Coli* no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

Os testes de Mann-Whitney entre os períodos de seca e chuvas não indicaram diferenças significativas entre as eficiências em nenhum dos 3 momentos: AR ( $p=0,69$ ), R ( $p=0,51$ ) e DR ( $p=0,81$ ). Destaca-se mais uma vez o baixo poder de detecção dos testes em função do pequeno número de dados em cada grupo de dados avaliado.

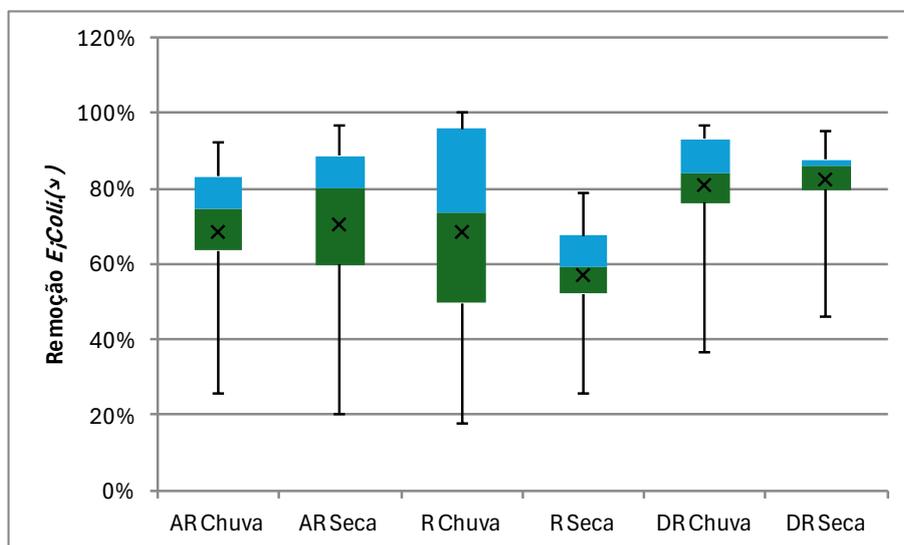


Figura 6.45 - Diagrama de caixas da eficiência de redução de *E. Coli* no efluente conforme sazonalidade e momento operacional da ETE

### 6.3.9 Avaliação geral da interferência da sazonalidade e afluência de águas pluviais

A Tabela 6.19 sintetiza os resultados obtidos pelos testes de Mann-Whitney, comparando o período de chuvas e de seca de cada momento de operação da ETE, de cada um dos parâmetros avaliados.

Tabela 6.19 – Valores p dos testes de Mann-Whitney para diferença sazonal dos parâmetros de monitoramento da ETE, conforme momento operacional

Parâmetro	AR	R	DR	Parâmetro	AR	R	DR
Vazão Afluente	<0,001	<0,001	<0,001	Afluente	-	-	<0,001
Afluente	0,001	0,18	0,004	NT Efluente	-	-	<0,001
DBO Efluente	0,31	0,08	0,006	Eficiência	-	-	0,96
Eficiência	0,96	0,77	0,16	PT Afluente	<0,001	0,006	<0,001
Afluente	<0,001	<0,001	0,01	Efluente	0,006	<0,001	<0,001
DQO Efluente	0,003	<0,001	<0,001	Eficiência	0,8	0,001	<0,001
Eficiência	0,02	0,99	0,24	<i>E. Coli</i> Afluente	0,61	0,57	0,005
Afluente	<0,001	0,014	0,4	Efluente	0,54	0,44	0,51
SS Efluente	0,08	<0,001	<0,001	Eficiência	0,69	0,51	0,81
Eficiência	0,13	0,31	0,046				

Obs.: Valores menores que  $\alpha = 0,05$  indicam diferença significativa entre o período de chuvas e de seca.

A diferença de vazão conforme a período sazonal foi nítida em todos os períodos, indicando a afluência indevida de águas pluviais no sistema de esgotamento sanitário. A

influência da sazonalidade também pode ser observada em todas as concentrações afluentes, a exceção de *E. Coli* no período AR, de DBO e *E. Coli* no período R e de SS no período DR.

Conforme o esperado, a mudança de qualidade do esgoto afluente promoveu mudanças significativas na qualidade do efluente tratado, a exceção de SS e DBO no período AR, DBO no período R e *E. Coli* em todos os períodos.

Contudo, no que se refere à eficiências de remoção a ETE Sobradinho conseguiu, até certo ponto, lidar com as diferenças sazonais, apresentado diferenças significativas entre as eficiências de remoção no momento AR somente em relação à DQO, no momento R em relação à PT e no momento DR em relação a SS e PT.

#### **6.4 AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DA ETE EM RELAÇÃO AOS PADRÕES DE LANÇAMENTO**

Como dito no item 4.5, a outorga de lançamento de efluentes da ETE Sobradinho estabelece o lançamento máximo 196 L/s de esgoto tratado no corpo receptor, o que equivale a 16.934,4 m<sup>3</sup>/dia. Sendo que esse efluente pode ter DBO máxima de 63 mg/L em 2017 e de 42mg/L nos anos seguintes.

A outorga de vazão foi excedida apenas no período DR e em um pequeno número de vezes, sendo todas durante o período chuvoso (Figura 6.46). É importante ressaltar que os dados de vazão da ETE Sobradinho são medidos apenas na entrada da estação e dentre as unidades da ETE se encontram o decantador primário maior e o reator aerado de nível variável, que exercem em certa medida o papel de tanques de equalização. Portanto, apesar de a vazão do dia ter sido superior a outorgada, com a correta operação dessas unidades é possível minimizar os picos de lançamento e, conseqüentemente, o impacto no corpo hídrico receptor.

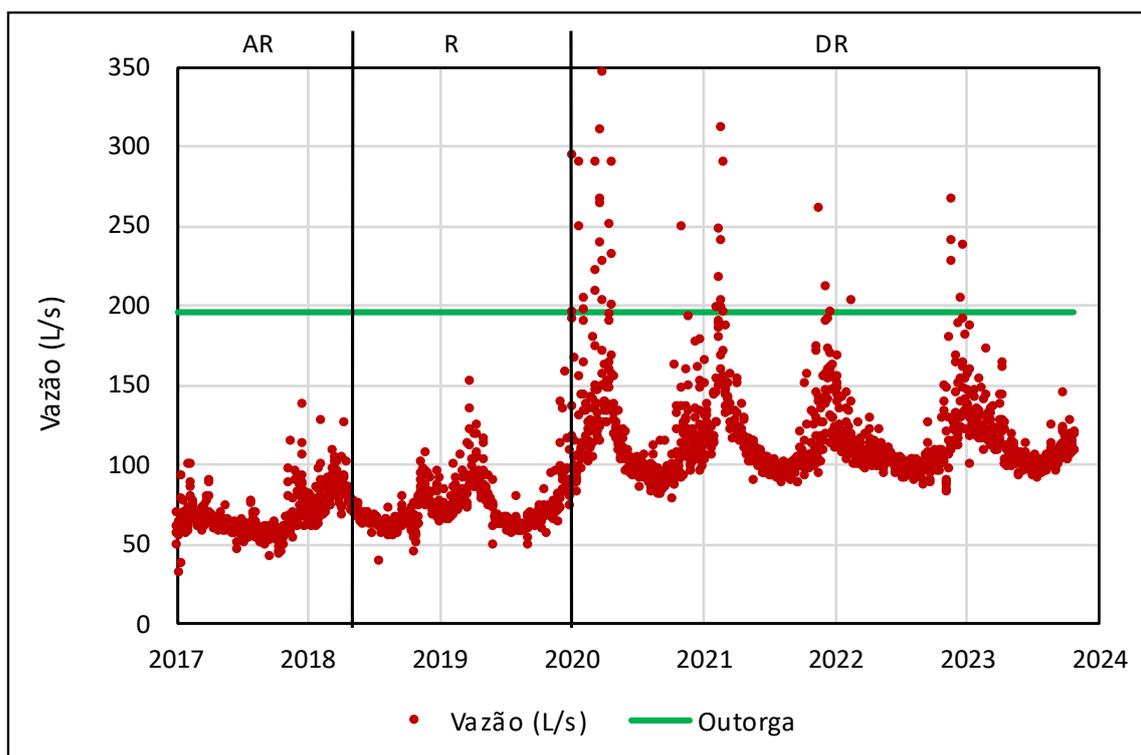


Figura 6.46 - Série temporal de Vazão em função do momento de operação da ETE em comparação com a outorga de lançamento

O limite de DBO estabelecido pela outorga foi excedido nos três momentos de operação da ETE (Figura 6.47): os descumprimentos no momento AR ocorreram predominantemente em 2018, em função da redução do valor máximo estabelecido pela outorga sem a alteração do sistema de tratamento da ETE; já no período R, como o esperado, a ETE operou em boa parte do tempo em descumprimento com a outorga, em função da mudança do seu sistema de tratamento em carácter emergencial para manutenção do reator aerado de nível variável; por fim, no período DR houve apenas 1 dado de monitoramento acima do estipulado pela outorga, sendo ele no período de chuvas.

Ainda no que se refere à DBO, comparando o atendimento à outorga da ETE com o obtido em relação aos padrões de lançamento estabelecidos pelas outras normativas avaliadas, observa-se que: o valor de 120mg/L da resolução CONAMA nº 430 de 2011 implicaria num percentual de atendimento muito maior, sendo descumprido apenas no período R e em 2 dados do período AR; o padrão de lançamento preconizado pelas normativas dos Estados de RS e RJ é similar ao da outorga, obtendo conformidades aproximadamente iguais; por fim, o padrão da União Europeia (UE) é mais rigoroso que a outorga, implicando num baixo percentual de atendimento até mesmo no período após a reforma da ETE Sobradinho.

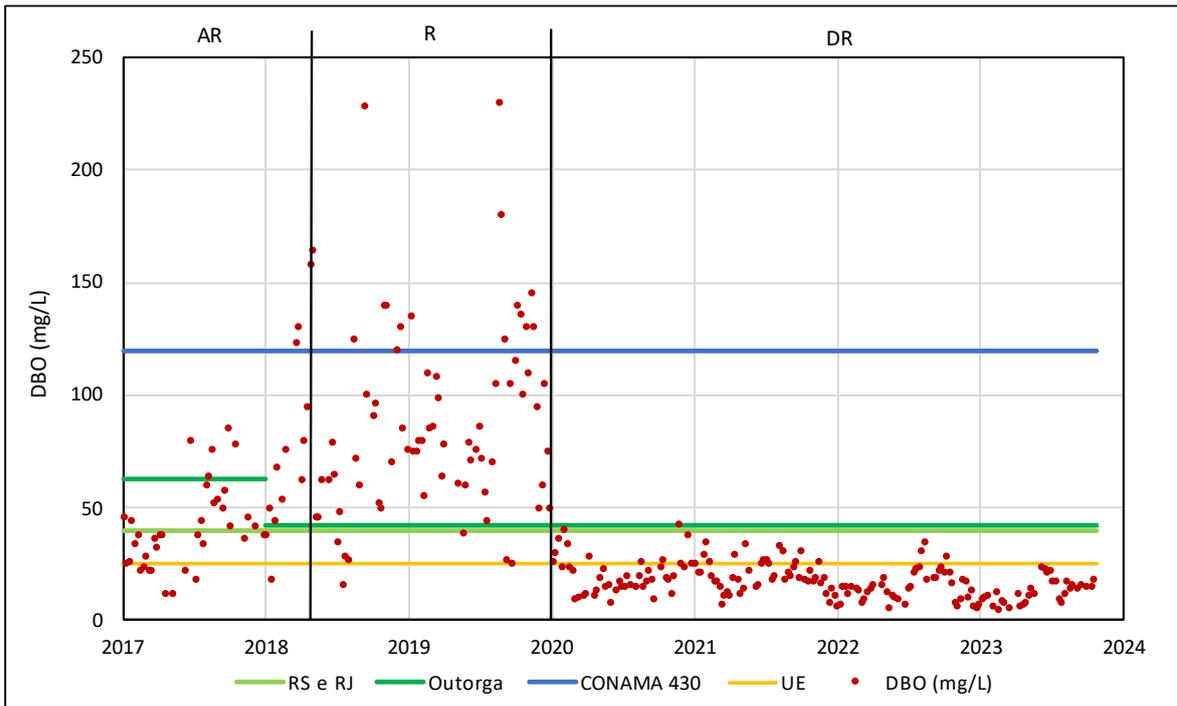


Figura 6.47 - Série temporal de DBO em função do momento de operação da ETE em comparação com a outorga de lançamento

Apesar de nem sempre estabelecido nas outorgas, as vazões de esgoto devem, sempre que possível, ser avaliadas de forma conjunta com as concentrações dos parâmetros de qualidade a fim de que se possa ter um entendimento da carga poluente do efluente (VON SPERLING et al., 2020). Assim, avaliando a carga de DBO limite, através da multiplicação da vazão com a concentração máxima de DBO outorgada, conclui-se que a ETE possui autorização para o lançamento de no máximo 1.066,87 kg DBO/dia no ano de 2017 e 711,24 kg DBO/dia nos anos seguintes. Contudo, em função da folga hídrica na operação da ETE, principalmente entre 2017 e 2019 (momentos antes e durante a reforma), a ocorrência de dados com carga orgânica em inconformidade com a outorga de lançamento é muito menos frequente do que no caso das concentrações de DBO (Figura 6.48).

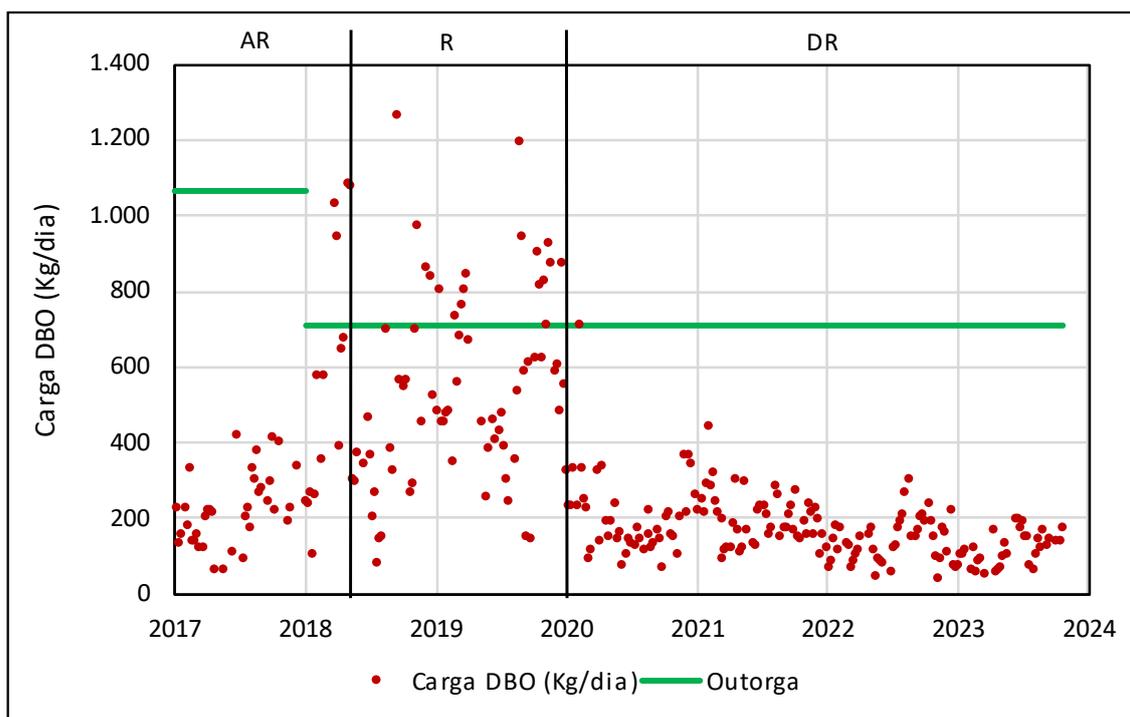


Figura 6.48 – Serie temporal de carga orgânica em função do momento de operação da ETE em comparação com a outorga de lançamento

A metodologia utilizada por Adasa (2020) estabelece a conformidade em função da razão entre o número de dados em conformidade e o número total de dados do monitoramento, sendo a precisão do percentual de conformidade maior ou menor a depender da quantidade e representatividade dos dados disponíveis. Assim, caso a ETE possua uma maior disponibilidade de dados em um período que a ETE teve efluentes de maior ou menor concentração, como no caso de ETE Sobradinho pela sazonalidade, o resultado é afetado levando a uma interpretação equivocada da conformidade geral da ETE.

Já a metodologia utilizada por Adasa (2022) estabelece a conformidade em função da razão entre o número de médias mensais em conformidade e o total de meses, sendo fortemente influenciada pela presença de valores extremos, uma vez que as médias não são medidas resistentes, podendo um único valor alto de concentração levar a média a valores inconformes quando as médias mensais são compostas por poucos dados, como é o caso do monitoramento de DBO na ETE Sobradinho, em que se tem no máximo 5 análises de DBO por mês.

A Tabela 6.20 sintetiza os resultados de percentual de conformidade obtido através das duas metodologias adotadas em relação à outorga de lançamento da ETE Sobradinho.

Tabela 6.20 – Análise de conformidade da ETE em relação a sua outorga de lançamento, conforme período operacional.

Parâmetros	Vazão			DBO			Carga DBO		
	AR	R	DR	AR	R	DR	AR	R	DR
Período de operação									
conformidade por frequência amostral (%)	>99,9	>99,9	97,2	70,0	9,7	98,9	94,0	75,0	99,4
Conformidade por frequência média mensal (%)	>99,9	>99,9	>99,9	75,0	5,0	>99,9	93,8	65,0	>99,9

Foi observado, por ambas metodologias, uma redução do percentual de conformidade de DBO e carga orgânica do período AR para o período R, seguido de um aumento do percentual no período DR a níveis superiores aos obtidos inicialmente no período AR.

Destaca-se que os valores de percentual de atendimento de DBO e carga de DBO obtidos pela metodologia de frequência média mensal no período R foram consideravelmente menores, momento em que pela condição de reforma emergencial da ETE foi recorrente o lançamento esporádico de concentrações altas de DBO, podendo esses picos de concentração terem distorcido as médias dos meses para valores maiores do que o estipulado pela outorga.

A Tabela 6.21 sintetiza os resultados de percentual de conformidade de DBO, DQO e SS no período depois da reforma obtidos através das metodologias adotadas em relação às diretrizes de padrão de lançamento: Nacional (Resolução CONAMA nº430 de 2011); do Rio Grande do Sul (Resolução CONSEMA nº 355/2017); do Rio de Janeiro (Resolução CONEMA nº90/2021); e da União Europeia (UE Directive 91/271/EEC).

Tabela 6.21 – Análise de conformidade da ETE em relação as diretrizes de lançamento de DBO, DQO e SS da Resolução CONAMA nº 430, as diretrizes dos Estados de RS e RJ e da União Europeia no período DR

Parâmetros	DBO			DQO		SS		
	CONAMA	RJ e RS	UE	RS	UE	RS	RJ	UE
conformidade por frequência diária (%)	>99,9	98,86	85,23	99,43	98,30	98,30	96,59	95,45
conformidade por frequência média mensal (%)	>99,9	>99,9	89,13	>99,9	>99,9	>99,9	>99,9	>99,9

Observa-se percentuais de conformidade similares a partir dos cálculos com os dois métodos, contudo, sendo evidente que o método por frequência mensal superestima a conformidade da ETE. O padrão de lançamento da resolução CONAMA de 120mg DBO/L, conforme o esperado, mostrou-se muito permissivo para um sistema de Lodos ativados

convencional, sendo atendido facilmente pela ETE no período DR. Destaca-se os bons percentuais de conformidade obtidos pela ETE Sobradinho em relação tanto às diretrizes da norma do Rio Grande do Sul quanto às do Rio de Janeiro, obtendo conformidades acima de 96%.

No que se refere à normativa da União Europeia, a ETE não conseguiu cumprir com as exigências de conformidade de DBO, em que para os números de amostras médios anuais seria requerido um percentual de atendimento mínimo de 89,13%. Contudo cumpriu com as exigências de DQO e SS, as quais seriam de no mínimo 90,72% e 90,63%, respectivamente, para o número médio de amostras anuais da ETE Sobradinho. Assim, cabe destacar a importância da consideração de uma probabilidade de inconformidade aceitável, como determinado na normativa europeia.

## 6.5 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DA ETE EM RELAÇÃO À OUTORGA

A metodologia de Niku, Schroeder e Samaniego (1979) foi utilizada para a análise da confiabilidade do tratamento da ETE. Elaborada com base na consideração da aderência dos dados a uma distribuição lognormal, utilizando os dados amostrais para descrever o comportamento da população, a metodologia estrutura um modelo que possibilita o cálculo do percentual de atendimento futuro esperado a um padrão de lançamento de interesse, considerando que o tratamento da ETE continuará tendo os mesmos valores de média e coeficiente de variação (CV).

Os resultados dos testes de aderência dos dados de DBO, DQO e SS indicam que, em sua grande maioria, os parâmetros podem ser bem descritos por distribuições lognormal (Tabela 6.22), confirmando a viabilidade de aplicação do método de confiabilidade proposto por Niku, Schroeder e Samaniego (1979).

Tabela 6.22 – Resultados dos testes de aderência dos dados de DBO, DQO e SS

Parâmetro	Período	Nº de amostras	K-S	L-F	A-D	S-W
DBO	AR	50	Norma, <b>Log</b> , Gama, Beta	<b>Log</b> , Gama, Beta	Log, Gama	Log*
	R	72	Normal, Log, <b>Gama</b> , Beta	Log, <b>Gama</b> , Beta	Log, <b>Gama</b>	Log*
	DR	179	Normal, Log, <b>Gama</b> , Beta	Log, <b>Gama</b>	Gama	Log*
DQO	AR	125	<b>Log</b> , Gama, Beta	Log	Log	Log*
	R	162	<b>Log</b> , Gama	Log	<u>Log</u>	
	DR	371	<b>Log</b> , Gama, Beta	<b>Log</b> , Gama, Beta	<b>Log</b> , Gama	Log*

Parâmetro	Período	Nº de amostras	K-S	L-F	A-D	S-W
SS	AR	124	<b>Log</b> , Gama, Beta	Log	Log	Log*
	R	162	Log, Gama, <b>Beta</b>	Log, <b>Beta</b>	<u>Log</u>	-
	DR	369	Log, Gama	Log, Gama	<u>Log</u>	-

Legenda: K-S=Kolmogorov-Smirnov; L-F=Lilliefors; A-D=Anderson-Darling; S-W=Shapiro-Wilk; \*O teste verificou a normalidade dos dados após transformação logarítmica; AR=antes da reforma; R= durante a reforma; DR= depois da reforma; Log=Lognormal; Negrito=Melhor resultado no teste; sublinhado= Valor abaixo, mas próximo do limite de significância.

Assim como constatado por Oliveira (2006), os testes de Kolmogorov-Smirnov tiveram resultados pouco precisos, aceitando diversas distribuições como passíveis de descrever o comportamento dos dados.

A Tabela 6.20 sintetiza os resultados do percentual de confiabilidade obtido em relação à outorga de lançamento da ETE Sobradinho.

Tabela 6.23 – Análise de confiabilidade da ETE em relação a sua outorga de lançamento, conforme período operacional.

Parâmetros	Vazão (L/s)			DBO (mg/L)			Carga DBO (Kg/dia)		
	AR	R	DR	AR	R	DR	AR	R	DR
Nº de dados	485	610	1400	50	72	176	50	72	176
Média	69,41	73,89	117,58	50,2	88,1	17,7	311,34	552,48	173,09
Desvio Padrão	13,31	13,92	29,25	30,1	42,7	8,05	228,75	259,38	84,27
CV	0,19	0,19	0,25	0,60	0,48	0,46	0,73	0,47	0,49
<b>Confiabilidade de atendimento (%)</b>	<b>&gt;99,9</b>	<b>&gt;99,9</b>	<b>98,6</b>	-	<b>8,3</b>	<b>98,7</b>	-	<b>78,5</b>	<b>&gt;99,9</b>

Em função da mudança do valor da outorga em 2018, não foi possível a determinação do percentual de atendimento esperado para DBO e carga orgânica no período AR pela metodologia de Niku, Schroeder e Samaniego (1979).

Foi observada uma redução do percentual de conformidade de DBO e carga orgânica do período AR para o período R, seguido de um aumento do percentual no período DR a níveis superiores aos obtidos inicialmente no período AR. Em geral, os percentuais de confiabilidade obtidos foram numericamente próximos aos percentuais de conformidade por frequência amostral (Tabela 6.20), indicando que o modelo é capaz de representar adequadamente a dinâmica dos dados de concentração efluente.

A análise de confiabilidade obteve como resultado o percentual de conformidade esperado para o futuro, caso as condições de tratamento e eficiência do sistema se mantenham as mesmas, contudo, sempre há uma chance de que as condições de tratamento

mudem. Assim, apesar de terem sido obtidas probabilidades esperadas altas do lançamento estar em conformidade com a outorga em relação à carga orgânica, é recomendável que se faça uma análise de risco de ocorrência de lançamentos de efluente com cargas superiores ao normatizado a fim de avaliar se a probabilidade de ocorrência é razoável em face dos impactos ambientais, econômicos e sociais que podem advir desse lançamento inconforme.

A Tabela 6.21 sintetiza os resultados do percentual de confiabilidade de DBO, DQO e SS esperados para o futuro em relação aos padrões de lançamento: da Resolução CONAMA nº430 de 2011; do Rio Grande do Sul (Resolução CONSEMA nº 355/2017); do Rio de Janeiro (Resolução CONEMA nº90/2021); e da União Europeia (UE Directive 91/271/EEC).

Tabela 6.24 – Análise de confiabilidade da ETE em relação aos padrões de lançamento de DBO, DQO e SS da Resolução CONAMA nº 430, das diretrizes dos Estados de RS e RJ e da União Europeia

Parâmetros	DBO			DQO		SS		
	Normativa	CONAMA	RJ e RS	UE	RS	UE	RS	RJ
Atendimento pelo método de confiabilidade (%)	>99,9	98,21	84,56	99,87	99,13	99,50	98,17	96,42

O padrão de lançamento da resolução CONAMA de 120mg DBO/L mostrou-se muito permissivo para um sistema de Lodos ativados convencional adequadamente operado, sendo esperado que a ETE atenda-o facilmente. Foram obtidos bons percentuais de conformidade esperados para a ETE Sobradinho no futuro, tanto em relação às diretrizes do Rio Grande do Sul quanto às do Rio de Janeiro, obtendo em todos os casos conformidades acima de 98%.

No que se refere à normativa da União Europeia, é esperado pelo modelo de confiabilidade que a ETE consiga cumprir as exigências de DQO e SS, contudo, mantendo a qualidade do tratamento atual é esperado que o lançamento de DBO esteja fora do preconizado por essa diretriz.

Ressalta-se a importância estatística do resultado obtido pela metodologia de Niku, Schroeder e Samaniego (1979), permitindo inferir sobre a probabilidade de conformidade futura e auxiliar a tomada de decisão quanto à necessidade de realização de melhorias no processo de tratamento da ETE, buscando maiores percentuais de conformidade em relação à outorga.

O método de Niku, Schroeder e Samaniego (1979) permite ainda o cálculo da concentração de projeto necessária para que, dada a variação observada na qualidade do

efluente final, obtenha-se um lançamento em conformidade com o valor de outorga com uma determinada confiabilidade. Para o seu cálculo foi primeiramente determinado os valores de do coeficiente de confiabilidade de cada um dos parâmetros para o atendimento dos padrões de lançamento em 95%, sendo obtidos os valores de 0,54 para DBO, 0,65 para DQO e 0,52 para SS. A Tabela 6.25 apresenta as concentrações de projeto de DBO, DQO e SS necessárias para o cumprimento das normativas de lançamento de efluentes avaliadas.

Tabela 6.25 – Concentração de projeto para o cumprimento das diferentes diretrizes de lançamento de efluentes durante 95% do tempo

<b>Parâmetro</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>SS (mg/L)</b>
Concentração para Outorga	22,6	-	-
CONAMA nº430	48,0	-	-
Normativa RS	16,0	80,2	19,0
Normativa RJ	16,0	-	15,2
Normativa UE	10,0	66,8	13,3

Assim como observado em relação aos valores de CV, os valores obtidos para o CDC de DBO condizem com o obtido em outras ETEs de lodos ativados convencionais, estando dentro das faixas obtidas por *Niku et al.* (1979), Oliveira e von Sperling (2008) e Messoud *et al.* (2013). O valor de CDC de DQO e SS no período DR foram levemente superiores aos obtidos por Oliveira e von Sperling (2008) e Messoud *et al.* (2013), indicando uma maior confiabilidade do tratamento em relação à remoção de DQO e SS daquele identificado nas ETEs de lodos ativados convencional desses estudos.

As concentrações de operação requeridas para o cumprimento das diretrizes de lançamento em 95% do tempo (Tabela 6.25) implicam em eficiências de remoção médias de 95% para DBO, 96,1% para SS, e acima de 90,6% para DQO, valores dentro e até acima das eficiências máximas encontradas tipicamente em sistemas de lodos ativados de taxa convencional de acordo com von Sperling (2014), Jordão e Pessoa (2014) e Metcalf e Eddy (2016). Assim, tratam-se de concentrações de operação dificilmente alcançáveis, sendo pertinente uma ou mais das seguintes modificações: adoção de padrões de lançamento menos restritivos; adoção de um percentual de conformidade menor do que 95%; otimização da operação do sistema, aumentando a estabilidade do tratamento, reduzindo o coeficiente de variação das concentrações no efluente e, conseqüentemente, reduzindo a concentração de operação alvo; mudança do sistema de tratamento da ETE por sistemas de tecnologia de tratamento mais avançada.

## 7 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar estatisticamente o desempenho, confiabilidade e sazonalidade da ETE Sobradinho ao longo do tempo. Os resultados obtidos permitiram obter as seguintes conclusões:

O esgoto afluente à ETE Sobradinho é mais concentrado do que o apontado como típico pela literatura, possuindo faixas de valores mais amplas e com limites superiores maiores do que as apresentadas por von Sperling (2014) e Oliveira (2006) para ETEs de Lodos Ativados em relação a todos os parâmetros de qualidade. Contudo, as faixas obtidas são coerentes com as apresentadas por Oliveira e von Sperling (2005) e Metcalf e Eddy (2016) para esgotos domésticos, à exceção de SS e NT, em que foram observadas na ETE Sobradinho limites superiores maiores. O esgoto afluente em 2018 apresentou para todos os parâmetros, exceto *E. Coli*, concentrações significativamente diferentes aos demais anos, indicando que se tratou de um ano atípico.

O esgoto tratado teve concentrações significativamente diferentes ao longo dos 3 períodos operacionais da ETE em relação a DBO, DQO e PT ( $p < 0,01$ ). O período da reforma (R) apresentou, em geral, uma maior concentração efluente de DBO e DQO e menor concentração de PT, confirmando a expectativa de uma menor remoção da matéria orgânica e uma maior remoção de fósforo com a implementação emergencial do tratamento misto de Lodos ativados e TPQA em relação ao exclusivamente por Lodos Ativados empregado nos períodos antes da reforma (AR) e depois da reforma (DR). No que se refere à concentração de SS, não se teve diferenças significativas do período R em relação ao período AR, indicando a robustez dos decantadores da ETE e a boa adaptação emergencial da ETE com o sistema misto de TPQA e lodos ativados. Além disso, o período DR apresentou uma redução significativa das concentrações de DBO, DQO e SS em relação aos outros dois períodos, indicando os benefícios da reforma com a mudança do sistema de aeração e implementação das sondas contínuas para o controle operacional.

Em comparação com as faixas de concentração reportadas por von Sperling (2014) e Oliveira e von Sperling (2005), para efluentes de sistemas de lodos ativados e sistemas de TPQA, o efluente final da ETE Sobradinho possui faixas de DBO, DQO e SS mais amplas e com limites superiores de maior valor no período AR; mais amplas e com limites inferiores menores no período R e mais restritas e com limites inferiores e superiores menores ou iguais no período DR. Não foram obtidas diferenças significativa na concentração de NT, sendo o

efluente mais concentrado do que o tipicamente obtido em sistemas de lodos ativados e sistemas de TPQA

As eficiências de remoção de todos os parâmetros do período AR apresentaram valores abaixo e dentro do esperado, segundo von Sperling (2014) e Jordão e Pessôa (2014); e dentro da faixa obtida por Oliveira e von Sperling (2005) para ETEs de Lodos Ativados.

No período R se teve eficiência de remoção DBO, DQO menores e remoção de fósforo superior aos demais períodos, sendo coerente com a mudança do tratamento realizada. O período teve faixas de eficiência de remoção de DBO, DQO, SS e PT mais amplas do que as típicas de TPQA indicado por von Sperling (2014), o que era esperado em virtude de o tratamento durante esse período ter sido realizado com sistema misto de lodos ativados e TPQA. Assim, pode-se concluir que a alteração em carácter emergencial foi adequadamente realizada, cumprindo dentro das possibilidades do sistema de tratamento adotado o seu papel de atenuar a queda das eficiências de remoção da ETE com a paralisação da principal unidade de tratamento biológico da ETE.

O período DR apresentou um aumento da eficiência de remoção de todos os parâmetros em relação ao período AR, se encontrando dentro e acima da faixa reportada pela literatura. Assim, pode-se inferir que a reforma da ETE se deu de maneira adequada e as melhorias realizadas, de implementação das sondas de medição em tempo real de OD e SS nos reatores aerados e a melhor distribuição dos aeradores no reator aerado de nível variável, permitiram o melhor controle operacional e a otimização das eficiências de remoção da ETE.

A ETE apresentou nítida interferência do período sazonal, sendo as vazões nos períodos de chuvas expressivamente superiores às dos períodos de seca, indicando a afluência de águas pluviais no sistema de esgotamento sanitários. A sazonalidade também foi observada nas concentrações afluentes e efluentes da maioria dos parâmetros, sendo em geral o esgoto mais concentrado no período de seca. Contudo, no que se refere as eficiências de remoção, a ETE Sobradinho conseguiu, até certo ponto, lidar com as diferenças sazonais, apresentando diferenças significativas apenas entre as eficiências de remoção de DQO no momento AR, SS no momento DR e PT nos momentos R e DR.

A ETE Sobradinho teve uma redução expressiva do percentual de atendimento a outorga em relação a DBO do período AR para o período R, seguida de uma melhoria considerável no período DR em relação aos períodos anteriores. Se destaca em todos os períodos a diferença dos percentuais de conformidade de DBO e carga orgânica, indicando que a folga hídrica da operação da ETE em relação a sua outorga permitiria o lançamento de concentrações de DBO superiores à estabelecida pela outorga.

A análise de confiabilidade estimou percentuais de atendimento futuro à outorga de 98,6% em relação a vazão, 98,7% em relação à DBO e mais de 99,9% em relação a carga orgânica, caso a ETE continue operando nas mesmas condições do período DR. Avaliando a confiabilidade do lançamento de DBO, DQO e SS da ETE Sobradinho em relação às diretrizes do Rio Grande do Sul e do Rio de Janeiro, ambas mais rigorosas do que a outorga da ETE para DBO, se obteve percentuais de atendimento futuro superiores a 98% em relação aos três parâmetros. Já em relação a normativa da União Europeia é esperado pelo modelo de confiabilidade que a ETE Sobradinho atenda apenas as diretrizes de lançamento de DQO e SS, não sendo esperado que consiga alcançar os 89,13% de conformidade exigido para DBO, considerando a mesma frequência de monitoramento anual praticada no período DR.

Por fim, determinou-se as concentrações de operação que promoveriam um atendimento as diretrizes de lançamento de efluentes de DBO, DQO e SS em 95% do tempo, constatando-se a necessidade de eficiências médias de remoção acima de 95% para DBO e SS, e acima 90% para DQO, valores próximos aos limites máximos de eficiência tipicamente encontrados em sistemas de lodos ativados de taxa convencional.

## **8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Analisar a presença de outliers por outros métodos além do método do intervalo interquartis, em virtude da baixa capacidade de detecção de valores abaixo do limite inferior quando se trabalha com dados de concentração de poluentes, obtendo frequentemente limites com valores negativos, incoerentes para concentrações;
- Caracterizar de forma aprofundada a área atendida pela ETE Sobradinho contemplando análise populacional, topográfica, de chuvas e da infraestrutura de drenagem urbana e esgotamento sanitário existente e projetada para o futuro;
- Avaliar o desempenho e sazonalidade do tratamento da ETE em termos de cargas, permitindo a elaboração e entendimento dos balanços de massa dos poluentes no tratamento da ETE;
- Avaliar a mudança da vazão e qualidade do esgoto afluente a ETE ao longo do tempo;
- Verificar o dimensionamento das unidades da ETE Sobradinho em relação as diretrizes da NBR 12.209 de 2011;
- Avaliar as vazões, concentrações e eficiências de remoção individuais das unidades de tratamento da ETE (decantadores, reatores aerados) ou de suas etapas de tratamento (tratamento preliminar, primário e secundário), objetivando o entendimento e otimização das unidades e de sua operação;
- Analisar o impacto do lançamento do efluente sobre a qualidade do corpo d'água receptor;
- Avaliar o tratamento da ETE com base na análise de risco em engenharia, considerando a probabilidade de falha em conjunto com o prejuízo potencial decorrente dessa falha;
- Modelar computacionalmente o tratamento da ETE, descrevendo os impactos positivos e negativos das alterações dos parâmetros operacionais e prevendo os impactos da qualidade do efluente em face das alterações de vazão e qualidade previstas para o esgoto afluente a ETE no futuro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro. 2011
- ADASA. Relatório de Fiscalização da ETE Sobradinho - RVF/015/2019, 2019a.
- ADASA. Relatório de Fiscalização da ETE Sobradinho - RVF/018/2019, 2019b.
- ADASA. Relatório de Fiscalização do Sistema de Esgotamento Sanitário do Rio São Bartolomeu, 2015.
- ADASA. Relatório de Monitoramento do Atendimento ao Padrão de Lançamento Outorgado pelas ETEs no Distrito Federal, 2020.
- ADASA. Relatório de Monitoramento Regular do Consumo de Água do Distrito Federal de 2020, 2021
- ADASA. Relatório de Vistoria e Fiscalização - Monitoramento Regular - Capacidade e Eficiência de Tratamento das Estações de Tratamento de Esgoto em 2020, 2022a.
- ADASA. Relatório de Vistoria e Fiscalização - Monitoramento Regular - Eficiência de Tratamento das Estações de Tratamento de Esgoto em 2021, 2022b.
- ADASA. Relatório de Vistoria e Fiscalização - Monitoramento Regular - Eficiência de Tratamento das Estações de Tratamento de Esgoto em 2022, 2023.
- ADASA; ENGEPLUS. Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Afluentes Distritais do Rio Paranaíba. 2020.
- ALVES, M. S. et al. Performance evaluation and coefficients of reliability for waste stabilization ponds in northeast Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 16. 2021.
- ASSIS, A. P. et al. **Métodos Estatísticos e Probabilísticos Aplicados a Geotecnia**. Departamento Engenharia Civil e Ambiental-Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Brasília, 2018.
- BARROS, Juliana Ramalho. **A CHUVA NO DISTRITO FEDERAL: O REGIME E AS EXCEPCIONALIDADES DO RITMO**. Dissertação de Mestrado. Unesp. Rio Claro, 2003
- Branco M.A.T.P. **Descargas não controladas de efluentes por efeito de aflúncias indevidas**. O caso de uma estação elevatória. 2015. Tese de Doutorado. Universidade do Porto (Portugal).
- BRASIL. Lei Federal nº 11.445/2007 - Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico.
- BUGAJSKI, P.; PAWEŁEK, J.; KUREK, K. Concentrations of organic and biogenic pollutants in domestic wastewater after mechanical treatment in the aspect of biological reactor design. **Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich**, n. IV/3, p. 1811-1822, 2017.
- CAESB. Sinopse do Sistema de Esgotamento Sanitário do Distrito Federal. Brasília. 2011.
- CAESB. Sinopse do Sistema de Esgotamento Sanitário do Distrito Federal, Brasília, Brasil, 2014.
- CAESB. Análise do projeto básico e Elaboração do projeto executivo das Unidades da 2ª Etapa de ampliação da ETE sobradinho, Relatório de Análise do Projeto Básico. Brasília. 2017.
- CAESB. Plano Diretor de Água e Esgoto do Distrito Federal - PDAE/DF, Brasília, Brasil, 2019.
- CHAVES, V. S. et al. Desempenho das estações de tratamento do esgoto de Aracaju. **Revista DAE**, v. 66, p. 51-58, 2017.
- CODEPLAN. Plano Distrital por Amostra de Domicílios. Brasília. 2013.
- CODEPLAN. Atlas do Distrito Federal. Brasília. 2017.
- CODEPLAN. Plano Distrital por Amostra de Domicílios. Brasília. 2018.

- CODEPLAN. Plano Distrital por Amostra de Domicílios. Brasília. 2022a.
- CODEPLAN. Projeções Populacionais para as Regiões Administrativas do Distrito Federal (2010-2020). Brasília. 2019.
- CODEPLAN. Projeções Populacionais para as Regiões Administrativas do Distrito Federal (2020-2030). Brasília. 2022b.
- CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 357. Ministério do Meio Ambiente, Brasil. 2005.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430. Ministério do Meio Ambiente, Brasil. 2011.
- CONEMA - Conselho Estadual de Meio Ambiente do Rio de Janeiro. Resolução nº 90. Rio Grande do Sul, Brasil. 2021.
- CONSEMA - Conselho Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul. Resolução nº 355. Rio Grande do Sul, Brasil. 2017.
- COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. Consolidate text of Council directive of 21 may 1991 concerning urban wastewater treatment (91/271/EEC). Official Journal of the European Communities, Document 01991L0271-20140101, 01 jan, 2014.
- CRHDF - Conselho de Recursos Hídricos do Distrito Federal. Resolução nº02. Brasília. 2014.
- DANTAS, C. R. A. A. et al. Análise de ETEs que operam com reatores UASB nos municípios de Fortaleza e Maracanaú, com relação ao atendimento de descarte em corpos d'água, 2017.
- DANTAS, M.S. **Análise integrada do tratamento de esgotos domésticos e da qualidade das águas superficiais nas bacias hidrográficas do Rio das Velhas e dos Rios Jequitai e Pacuí - MG.** Dissertação de mestrado. UFMG. Belo Horizonte. 2020.
- DANTAS, M. S. *et al.* Municipal wastewater discharge standards for ammonia nitrogen in Brazil: technical elements to guide decisions. *Water Science and Technology*, v. 85, n. 12, p. 3479-3492, 2022. doi: 10.2166/wst.2022.183
- FACIN, F. et al. Avaliação operacional de ETE composta por reator UASB seguido de biofiltro aerado submerso, um estudo de caso em ETE de escala real no município de Luzerna-SC, 2018.
- FERNANDES, P. A. A.; DIAS, E. H. O. Análise de confiabilidade de uma ETE de médio porte com sistema de lodos ativados com aeração prolongada, 2021.
- GDF. Plano Distrital de Saneamento Básico e de Gestão Integrada de Resíduo Sólidos. Brasília. 2017.
- Grupo de Trabalho Ribeirão Sobradinho-GDF. Relatório de Diagnósticos e Soluções para a Recuperação Ambiental do Ribeirão Sobradinho. Brasília. 2013.
- ISHAK, Anuar et al. The reliability and process capability assessment of suspended growth sewage treatment plant in Melaka, Malaysia. *Water Science & Technology*, v. 86, n. 9, p. 2233-2247, 2022.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 7. ed. ABES. Rio de Janeiro, 2014.
- KATO, M. T.; PIVELI, R. P. **Qualidade das águas e poluição: Aspectos físico-químicos.** ABES. São Paulo, p. 285, 2005.
- KUMAR, K.; KUMAR, P.; BABU, M. Performance evaluation of waste water treatment plant. *International Journal of Engineering Science and Technology*, v. 2, n. 12, p. 7785-7796, 2010.
- LAPPONI, J. C. **Estatística usando excel.** Elsevier Brasil, 2005.

- LILLIEFORS, Hubert W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. **Journal of the American statistical Association**, v. 62, n. 318, p. 399-402, 1967.
- MAKUWA, S. et al. The effects of dry versus wet season on the performance of a wastewater treatment plant in North West Province, South Africa. **Water SA**, v. 48, n. 1, p. 40-49, 2022.
- MARZEC, M. Reliability of removal of selected pollutants in different technological solutions of household wastewater treatment plants. **Journal of Water and Land Development**, v. 35, n. 1, p. 141, 2017.
- MESSAOUD, D., BACHIR, A.; MAURICE, M. Determination and analysis of daily reliability level of municipal wastewater treatment plant. **Courrier du Savoir**, v.17, pp.39-46, 2013.
- METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5.ed. Porto Alegre, AMGH, 2016.
- MŁYŃSKI, D. et al. Investigation of the wastewater treatment plant processes efficiency using statistical tools. **Sustainability**, v. 12, n. 24, p. 10522, 2020.
- MONTGOMERY, D.C. e RUNGER, G.C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: GEN. 2016.
- MORAIS, N. W. S.; SANTOS, A. B. dos. Análise dos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reúso de águas residuárias de diversos estados do Brasil. **Revista DAE**, São Paulo, v. 67, n. 215, p. 40-55, 2019.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. CPRM, 2007.
- NIKU, S.; SCHROEDER, E.D.; SAMANIEGO, F. J. Performance of activated sludge processes and reliability-based design. **Journal (Water Pollution Control Federation)**, p. 2841-2857, 1979.
- NIKU, S., SCHROEDER, E.D., TCHOBANOGLIOUS, G., SAMANIEGO F.J. Performance of activated sludge process: reliability, stability and variability. **Environmental Protection Agency (EPA)**, Cincinnati, EPA-600/S2-81-227., pp. 1 – 11, 1981.
- OLIVEIRA S. C., SOUKI I. e VON SPERLING M. Lognormal behaviour of untreated and treated wastewater constituents. **Water Science and Technology**, v. 65, n. 4, p. 596–603, 2012.
- OLIVEIRA, D.B.C.; SOARES, W.A.; HOLANDA., M.A.C.R. Effects of rainwater intrusion on an activated sludge sewer treatment system. **Revista Ambiente e Água**, v. 15, n. 3, p. e2497, 2020.
- OLIVEIRA, S. C.; VON SPERLING, M. Reliability analysis of wastewater treatment plants. **Water research**, v. 42, n. 4-5, p. 1182-1194, 2008.
- OLIVEIRA, S.M.A.C. **Análise de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de esgotos**. Tese de doutorado. UFMG. Belo Horizonte. 2006.
- OLIVEIRA, S.M.A.C.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1 - análise de desempenho. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, p. 347-357, 2005.
- OWUSU-ANSAH, E. J. *et al.* Performance, compliance and reliability of waste stabilization pond: effluent discharge quality and environmental protection agency standards in Ghana. **Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology**, v. 10, n. 11, p. 1293-1302, 2015.
- RIBEIRO, V.O.; PEIXOTO, M. S. Avaliação da contribuição pluvial parasitária no sistema de esgotamento sanitário afluente à ETE Guaxinim, Dourados/MS. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 10, n. 3, p. 144-155, 2018.

- SALIBA, P. D.; VON SPERLING, M. Performance evaluation of a large sewage treatment plant in Brazil, consisting of a UASB reactor followed by activated sludge. **Water Science & Technology**, v. 76, n. 8, 2017.
- SILVA, Catarina; ROSA, Maria João. A treatment reliability-based method for supporting infrastructure asset management of wastewater treatment plants. **Water**, v. 14, n. 7, p. 1106, 2022.
- SILVEIRA, A. G. M. **Análise de eficiência e confiabilidade em sistemas de baixo custo de tratamento de esgotos do tipo lagoas de estabilização**. 2011. 109 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- SEDUH. Dados Georreferenciados disponíveis publicamente em Geoportal. 2022. Disponível em: seduh.df.gov.br, data de consulta: 05/05/2023
- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento-SNIS. Dados de Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - Visão Geral do ano de referência de 2021. 2022.
- SOBRINHO, P.A.; TSUTIYA, M.T. **Coleta e Transporte de Esgoto Sanitário**. 2. ed. São Paulo. 2000.
- VON SPERLING, M. Análise dos padrões brasileiros de qualidade de corpos d'água e de lançamento de efluentes líquidos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 1, p. 111-132, 1998.
- VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4ª Edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, v. 1, 2014.
- VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. **Lodos ativados**. 4ª Edição. Editora UFMG, v. 4, 2016.
- VON SPERLING, M.; VERBYLA, M. E.; OLIVEIRA, S. M. A. C. **Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data: A guide for students, researches and practitioners**. Londres, Inglaterra: IWA publishin, 2020.
- TSUTIYA, Milton Tomoyuki; BUENO, Rui Cesar Rodrigues. Contribuição de águas pluviais em sistemas de esgoto sanitário no Brasil. **Água latinoamérica**, v. 4, n. 4, p. 20-25, 2004.