



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UNB PLANALTINA
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS
HÍDRICOS - ProfªÁgua

Leonardo Rezende Suguimoto

**DIAGNÓSTICO INTEGRADO DO DESEMPENHO DE ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTOS NO DISTRITO FEDERAL –
EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO, SAZONALIDADE E CONFIABILIDADE
OPERACIONAL**

BRASÍLIA - DF
MARÇO, 2026

LEONARDO REZENDE SUGUIMOTO

**DIAGNÓSTICO INTEGRADO DO DESEMPENHO DE ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTOS NO DISTRITO FEDERAL –
EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO, SAZONALIDADE E CONFIABILIDADE
OPERACIONAL**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de
Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e
Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, como
requisito parcial à obtenção do título de Mestre em
Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Orientador (a): Prof. Dr Mauro Roberto Felizatto

BRASÍLIA - DF

2026

Sd

Suguimoto, Leonardo

DIAGNÓSTICO INTEGRADO DO DESEMPENHO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS NO DISTRITO FEDERAL - EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO, SAZONALIDADE E CONFIABILIDADE OPERACIONAL / Leonardo Suguimoto; orientador Mauro Roberto Felizatto. Brasília, 2026.

123 p.

Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) Universidade de Brasília, 2026.

1. Estações de Tratamento de Esgoto. 2. Distrito Federal. 3. Eficiência de Remoção. 4. Sazonalidade. 5. Confiabilidade Estatística. I. Felizatto, Mauro Roberto, orient. II. Título.

LEONARDO REZENDE SUGUIMOTO

Título: Diagnóstico Integrado do Desempenho de Estações de Tratamento de Esgotos no Distrito Federal – Eficiência de Remoção, Sazonalidade e Confiabilidade Operacional

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos -Prof^água, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Mauro Roberto Felizatto

Prof^água – Universidade de Brasília (UnB)

Dra Daphne Heloisa de Freitas Muniz

Prof^água - Universidade de Brasília (UnB)

Dr. Carlos Eduardo Pacheco Lima

Embrapa Hortaliças

Prof . Dr. Carlos Tadeu Carvalho do Nascimento

Prof^água - Universidade de Brasília (UnB)

Suplente

Brasília/DF, março de 2026

Dedico este trabalho a todos os colaboradores do Mestrado em Rede Nacional – Prof^água, a quem fico lisonjeado por dele ter feito parte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido saúde, sabedoria e força para concluir esta etapa tão importante da minha trajetória acadêmica e profissional.

Ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua, registro minha sincera gratidão, em especial aos professores e professoras que compartilharam seus conhecimentos ao longo do curso. Destaco, de forma especial, a Prof.^a Dra. Lucijane Monteiro e o Prof. Dr. Carlos Tadeu Carvalho do Nascimento, coordenadores do programa.

Aos profissionais do setor administrativo do ProfÁgua, que sempre estiveram prontos para esclarecer dúvidas e auxiliar no andamento do curso, meu muito obrigado. Estendo esse reconhecimento à equipe administrativa do polo da UNESP Ilha Solteira – SP, que prestou apoio fundamental nas questões relativas ao auxílio para participação em eventos acadêmicos.

Sou grato à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), idealizadora do ProfÁgua, e à Universidade de Brasília (UnB), que disponibilizou a infraestrutura necessária e ofereceu apoio institucional para a realização deste curso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mauro Roberto Felizatto, agradeço a orientação técnica e pelas sugestões que contribuíram para o aprimoramento deste trabalho, especialmente nos envios para eventos acadêmicos.

Gratidão aos colegas da turma de 2023 do ProfÁgua, pela convivência generosa e pelo compartilhamento de experiências e conhecimentos que enriqueceram nossa jornada.

Agradeço à Dra. Daphne Heloisa de Freitas Muniz e ao Dr. Carlos Eduardo Pacheco Lima pelas valiosas contribuições, sugestões e revisões realizadas ao longo deste trabalho. Suas observações foram fundamentais para o aprimoramento da qualidade técnica e científica da pesquisa, contribuindo de forma significativa para o seu desenvolvimento.

Por fim, agradeço ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior-Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023.

“O que não se mede, não se melhora.”
William Edwards Deming.

RESUMO

A avaliação do desempenho de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) é fundamental para assegurar a proteção dos corpos hídricos e o atendimento às normas ambientais. Nesse contexto, esta dissertação apresenta um diagnóstico integrado do desempenho de 15 ETEs do Distrito Federal, considerando aspectos operacionais, sazonais e estatísticos que influenciam a qualidade do efluente tratado. O objetivo do estudo foi avaliar o desempenho dessas unidades a partir de três vertentes complementares: (i) o comportamento das concentrações afluentes dos parâmetros Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos Totais (SST) e Fósforo Total (PT); (ii) a eficiência de remoção desses poluentes nos períodos seco e chuvoso; e (iii) a confiabilidade estatística do atendimento aos padrões ambientais de lançamento de efluentes. Foram utilizados dados operacionais referentes ao período de 2017 a 2023, obtidos junto à Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas para realização de análises estatísticas e geração de representações gráficas. A avaliação sazonal da eficiência de remoção foi realizada por meio de gráficos *boxplot*, enquanto a confiabilidade do atendimento aos padrões legais foi analisada com base em indicadores estatísticos de caráter probabilístico, incluindo coeficientes de variação (CV), coeficientes de confiabilidade (CDC) e os valores de $\bar{X}$ projeto e $\bar{X}$ meta. Adicionalmente, as ETEs foram agrupadas em três categorias tecnológicas — lodos ativados e variações, sistemas naturais com polimento final e sistemas naturais — permitindo uma análise comparativa da eficiência sazonal entre os grupos. A análise das concentrações afluentes evidenciou que diversas ETEs operam com esgotos brutos com concentrações superiores às faixas típicas reportadas na literatura, especialmente para DQO e PT, impondo desafios operacionais adicionais aos sistemas de tratamento. Ainda assim, verificou-se que algumas unidades mantêm elevados níveis de eficiência de remoção mesmo sob condições de afluição mais concentradas, evidenciando a robustez operacional de determinadas configurações tecnológicas. A avaliação sazonal indicou variações na eficiência de remoção entre os períodos seco e chuvoso, com maior sensibilidade observada principalmente para o parâmetro SST. A análise de confiabilidade indicou que unidades com processos tecnológicos mais complexos apresentaram maior robustez frente às variações operacionais, enquanto sistemas baseados em lagoas ou com tratamento simplificado demonstraram maior sensibilidade às variações das condições afluentes e climáticas. De forma geral, o recorte tecnológico evidenciou que sistemas mecanizados tendem a apresentar maior estabilidade operacional diante das variações sazonais. Os resultados obtidos foram comparados aos limites legais estabelecidos por normativas federais e estaduais (CONAMA, CEMA, CONSEMA e COEMA), permitindo uma avaliação da conformidade ambiental com nível de confiabilidade de 95%. Dessa forma, o produto técnico resultante desta pesquisa configura-se como uma ferramenta metodológica de apoio à avaliação do desempenho de estações de tratamento de esgotos e à gestão da qualidade da água em bacias hidrográficas, contribuindo para o aprimoramento das práticas de monitoramento, para o fortalecimento da integração entre saneamento e gestão de recursos hídricos e para a implementação de instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos.

Palavras-chave: Estações de Tratamento de Esgoto; Distrito Federal; Eficiência de Remoção; Sazonalidade; Confiabilidade Estatística; Desempenho Operacional.

ABSTRACT

The evaluation of the performance of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) is essential to ensure the protection of water bodies and compliance with environmental regulations. In this context, this dissertation presents an integrated assessment of the performance of 15 WWTPs in the Federal District of Brazil, considering operational, seasonal, and statistical aspects that influence the quality of treated effluent. The objective of this study was to evaluate the performance of these facilities from three complementary perspectives: (i) the behavior of influent concentrations of Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), and Total Phosphorus (TP); (ii) the removal efficiency of these pollutants during dry and rainy seasons; and (iii) the statistical reliability of compliance with environmental discharge standards. Operational data from 2017 to 2023 were obtained from the Environmental Sanitation Company of the Federal District (CAESB). The data were organized in spreadsheets for statistical analysis and graphical representation. Seasonal removal efficiency was evaluated using boxplot graphs, while the reliability of compliance with legal standards was analyzed using probabilistic statistical indicators, including coefficients of variation (CV), coefficients of reliability (CDC), and the indicators X design and X target. In addition, the WWTPs were grouped into three technological categories — activated sludge and variations, natural systems with final polishing, and natural systems — allowing a comparative analysis of seasonal efficiency among the groups. The analysis of influent concentrations showed that several WWTPs operate with raw wastewater concentrations above the typical ranges reported in the literature, particularly for COD and TP, posing additional operational challenges to treatment systems. Nevertheless, some facilities maintained high removal efficiencies even under higher influent concentrations, indicating the operational robustness of certain treatment configurations. Seasonal evaluation revealed variations in removal efficiency between dry and rainy periods, with greater sensitivity mainly observed for the TSS parameter. Reliability analysis indicated that plants with more complex technological processes demonstrated greater robustness against operational variations, whereas lagoon-based or simplified treatment systems showed greater sensitivity to influent and climatic fluctuations. Overall, the technological classification indicated that mechanized systems tend to present greater operational stability under seasonal variations. The results were compared with legal limits established by federal and state regulations (CONAMA, CEMA, CONSEMA, and COEMA), allowing the assessment of environmental compliance with a reliability level of 95%. Thus, the technical product resulting from this research constitutes a methodological tool to support the evaluation of wastewater treatment plant performance and water quality management in river basins, contributing to the improvement of monitoring practices, the strengthening of the integration between sanitation and water resources management, and the implementation of instruments of the Brazilian National Water Resources Policy.

Keywords: Wastewater Treatment Plants; Federal District; Removal Efficiency; Seasonality; Statistical Reliability; Operational Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Funcionamento de uma lagoa facultativa.....	32
Figura 2- Lagoa de Maturação da ETE-Samambaia.....	34
Figura 3- Reatores Aerados Difusos da ETE-Melchior, fase de aeração (à direita) e decantação (à esquerda).....	35
Figura 4- Reatores Aerados Difusos da ETE-Melchior, fase de aeração.....	35
Figura 5- Esquema simplificado de um tratamento tipo Lodos ativados	37
Figura 6- Esquema de um sistema de lodos ativados com aeração prolongada	37
Figura 7- Reator Anaeróbio do tipo UASB da ETE-Paranoá	41
Figura 8- Desenho esquemático de um reator UASB.....	42
Figura 9- Vista do sistema de lagoas da ETE-Brazlândia, com lagoas anaeróbias na porção inferior	44
Figura 10– Fluxograma da metodologia de cálculo do Coeficiente de Confiabilidade (CDC) segundo Niku et al (1979).....	60
Figura 11– Percentual de amostras com concentrações afluentes acima dos valores típicos de referência para DBO, DQO, SST e fósforo total em afluentes de 15 ETEs do Distrito Federal.	62
Figura 12– Faixas interpercentis (P10–P90) de concentrações afluentes por variáveis (DBO, DQO, SST e fósforo total) em 15 ETEs do Distrito Federal com destaque para a comparação com faixas típicas da literatura (von Sperling 2005).....	63
Figura 13- Eficiência de remoção de DBO, DQO e fósforo total na ETE-Alagado por período climático (2017-2023)	66
Figura 14– Eficiência de remoção de DBO, DQO e PT na ETE-Sul nos períodos seco e chuvoso (2017 – 2023)	67
Figura 15– Eficiência de remoção de DBO, DQO e fósforo total na ETE-Norte nos períodos seco e chuvoso (2017–2023).	68
Figura 16– Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE-Brazlândia (2017–2023).	69
Figura 17– Eficiência de remoção de DBO, DQO e fósforo total por período climático na ETE-Gama (2017–2023).....	70
Figura 18- Eficiência de remoção DBO, DQO e SST por período climático na ETE-Melchior (2017–2023).....	71

Figura 19 – Eficiência remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE-Paranoá (2017–2023).....	72
Figura 20 – Eficiência remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE-Planaltina (2017–2023).	73
Figura 21 – Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE-Recanto das Emas (2017–2023).	74
Figura 22 – Eficiência de remoção de DBO, DQO e PT por período climático na ETE Riacho Fundo (2017–2023).	75
Figura 23 – Eficiência de remoção de DBO, DQO e PT por período climático na ETE Samambaia (2017–2023).....	76
Figura 24 – Eficiência de remoção de DBO, DQO e PT por período climático na ETE Santa Maria (2017–2023).	77
Figura 25 – Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE São Sebastião.....	78
Figura 26 – Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE Sobradinho (2017–2023).	79
Figura 27 – Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE Vale do Amanhecer (2017–2023).	80
Figura 28 – Eficiência de remoção de DBO, DQO, PT e SST por período climático das 7 estações cuja tecnologia é do tipo lodos ativados e variações.....	82
Figura 29 – Eficiência de remoção de DBO, DQO e PT por período climático das 3 estações cuja tecnologia é do tipo Sistemas Naturais com polimento final (2017–2023).....	83
Figura 30 – Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático das 5 estações cuja tecnologia é do tipo Sistemas Naturais (2017-2023).....	84
Figura 31 – Eficiência média de remoção por variáveis nas ETEs do Distrito Federal durante o período seco (maio a setembro), no intervalo de 2017 a 2023, conforme disponibilidade de dados por unidade. Os tons de verde indicam maior eficiência, enquanto tons amarelados e avermelhados indicam menor desempenho	90
Figura 32 – Eficiência média de remoção por variável nas ETEs do Distrito Federal durante o período chuvoso (outubro a abril), no intervalo de 2017 a 2023.A figura permite comparar o desempenho da mediana sazonal entre os diferentes variáveis e unidades. As variações de cor ajudam a identificar tendências de redução ou manutenção da eficiência no período chuvoso.....	90

Figura 33- Relação entre os valores estimados de X-meta (95% de confiabilidade) para DBO e DQO nas 15 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do Distrito Federal e os limites legais de lançamento. As linhas tracejadas indicam os limites normativos de 200 mg/L para DQO (Resolução CEMA nº 70/2009 – PR), 120 mg/L para DBO (Resolução CONAMA nº 430/2011) e 60 mg/L para DBO (Resolução CEMA nº 70/2009 – PR). 102

Figura 34 – Valores estimados de X meta (95% de confiabilidade) para Sólidos Suspensos Totais (SST) nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do Distrito Federal em comparação ao limite legal de lançamento..... 103

Figura 35 – Valores estimados de X meta (95% de confiabilidade) para Fósforo Total (PT) nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do Distrito Federal em comparação ao limite legal de lançamento. 103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias de tratamento adotadas nas estações de tratamento de esgoto do Distrito Federal	25
Tabela 2 – Quantidade de dados secundários utilizados na análise de desempenho de ETEs do Distrito Federal, segundo variáveis de Unidade de Tratamento.	52
Tabela 3 – Resultados do teste Kolmogorov–Smirnov por tecnologia e parâmetro	88
Tabela 4 – Estatística descritiva da concentração de DBO (mg/L^{-1}) afluyente nas 15 Estações de Tratamento de Esgoto do Distrito Federal	96
Tabela 5 – Estatísticas descritivas da DQO (mg/L^{-1}) afluyente nas 15 ETEs do Distrito Federal	97
Tabela 6 – Estatísticas descritivas dos SST (mg/L^{-1}) afluentes nas 15 ETEs do Distrito Federal	98
Tabela 7 – Estatísticas descritivas do PT (mg/L^{-1}) afluyente nas 15 ETEs do Distrito Federal	99
Tabela 8 – Valores de X meta (ou padrão projetado) das variáveis DBO, DQO, SST e PT nas 15 ETEs do Distrito Federal e respectivos limites de referência das legislações ambientais	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BOD – Biochemical Oxygen Demand
CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CDC – Coeficiente de Desempenho de Conformidade
CE – Ceará
CEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente (Paraná)
COD – Chemical Oxygen Demand
COEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente (Ceará)
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente (Rio Grande do Sul)
COR – Coefficient of Reliability
CV – Coeficiente de Variação
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DF – Distrito Federal
DQO – Demanda Química de Oxigênio
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
ETEs – Estações de Tratamento de Esgoto
GDF – Governo do Distrito Federal
GDOC – Gestão de Documentos
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
IPEDF – Instituto de Pesquisa e Estatística do Distrito Federal
NR – Norma Regulamentadora
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PAOs – Organismos Acumuladores de Polifosfato
PT – Fósforo Total
RAFA – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RBS – Reator em Batelada Sequencial
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SST – Sólidos Suspensos Totais
TP – Total Phosphorus

TSS – Total Suspended Solids

UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente)

WWTPs – Wastewater Treatment Plants

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Recursos hídricos e saneamento no Distrito Federal	23
2.2 Tratamento de esgoto doméstico.....	27
2.2.1 Tratamento Preliminar	28
2.2.2 Tratamento a Nível Primário.....	29
2.2.3 Tratamento a nível Secundário.....	29
2.2.3.1 Tratamento Aeróbio	30
2.2.3.2 Lagoas Facultativas.....	31
2.2.3.3 Lagoa Aerada Facultativa	32
2.2.3.4 Lagoas de Maturação	33
2.2.3.5 Reator Aerado Difuso – Unitank®.....	34
2.2.3.6 Lodos Ativados Convencionais e o Processo Phoredox	35
2.2.3.7-Lodo Ativado Aeração Prolongada.....	37
2.2.3.8 Lagoa de alta taxa	38
2.2.3.9 Escoamento Superficial	38
2.2.4 Tratamento a nível secundário Anaeróbio.....	39
2.2.4.1 reatores Anaeróbios do tipo UASB	40
2.2.4.2 Lagoas Anaeróbias	43
2.2.5 Tratamento terciário: polimento final químico e flotação por ar dissolvido nas ETEs do Distrito Federal	44
2.3 Importância das Variáveis de Qualidade: DBO, DQO, SST e Fósforo Total.....	46
2.4 Desempenho, confiabilidade e concentrações afluentes do esgoto em estações de tratamento de esgoto.....	49
3 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	51
3.1 Levantamento e seleção de dados	51
3.2 Tratamento estatístico dos dados	53
3.3 Separação Sazonal e Cálculo das Eficiências por Períodos (chuva e seca).....	54

3.4 Diagnóstico das Concentrações Afluentes	55
3.5 Análise de Confiabilidade pelo Método de Niku <i>et al.</i> (1979)	57
3.6 Critérios legais adotados para fins comparativos.....	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1 Concentrações Afluentes de poluentes nas ETEs	61
4.2 Eficiência de Remoção por Sazonalidade Climática	64
4.2.1 ETE-Alagado	66
4.2.2 ETE-Sul.....	67
4.2.3 ETE-Norte.....	68
4.2.4 ETE-Brazlândia.....	69
4.2.5 ETE-Gama	70
4.2.6 ETE-Melchior	71
4.2.7 ETE-Paranoá	72
4.2.8 ETE-Planaltina.....	73
4.2.9 ETE-Recanto das Emas.....	74
4.2.10 ETE Riacho Fundo.....	75
4.2.11 ETE Samambaia.....	76
4.2.12 ETE-Santa Maria	77
4.2.13 ETE-São Sebastião.....	78
4.2.14 ETE-Sobradinho	79
4.2.15 ETE-Vale do Amanhecer.....	80
4.3 Análise Comparativa da Eficiência de Remoção por Tecnologia de Tratamento Frente à Sazonalidade Climática	81
4.3.1 Eficiência nos sistemas de Lodos Ativados e Variações	82
4.3.2 Eficiência nos sistemas Naturais com Polimento Final	83
4.3.3 Eficiência nos Sistemas Naturais	84
4.3.4 Análise Comparativa entre Grupos Tecnológicos	85

4.3.5 Avaliação estatística da influência da sazonalidade por meio do teste de <i>Kolmogorov–Smirnov</i>	86
4.4 Análise comparativa das eficiências médias por estação e variáveis em função da sazonalidade – visão holística.....	89
4.5 Importância do monitoramento da eficiência de ETes frente à sazonalidade e aos impactos climáticos	92
4.6 Resultados da Confiabilidade	95
5 PRODUTO TÉCNICO	109
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	112
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade e com os efeitos das mudanças climáticas tem ampliado os desafios associados à gestão do saneamento básico, especialmente no que se refere ao tratamento e à disposição final dos esgotos sanitários. No âmbito da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, estabelecida pela Organização das Nações Unidas (ONU), diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) apresentam relação direta com a temática deste trabalho. Entre eles, destacam-se o ODS 6, que propõe assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos, e o ODS 13, que busca promover ações para enfrentar as mudanças climáticas e seus impactos (ONU, 2015). A articulação entre esses objetivos torna-se particularmente evidente quando se consideram os efeitos de eventos extremos, como períodos prolongados de estiagem ou precipitações intensas, capazes de alterar as condições operacionais dos sistemas de tratamento de esgotos e influenciar a eficiência dos processos de tratamento e a qualidade dos corpos hídricos receptores.

Para além desses objetivos diretamente associados à gestão da água e eventos extremos, esta dissertação estabelece relação direta com outros ODS relevantes para o desenvolvimento sustentável. A coleta e o tratamento adequados de esgotos contribuem para a redução de riscos à saúde pública, estabelecendo conexão com o ODS 3, voltado à promoção da saúde e do bem-estar. De forma semelhante, a implantação e o aprimoramento da infraestrutura de saneamento relacionam-se ao ODS 9, que trata da construção de infraestruturas resilientes e sustentáveis, bem como ao ODS 11, voltado à promoção de cidades e comunidades mais sustentáveis. A redução da poluição hídrica decorrente do lançamento de efluentes tratados também contribui para a proteção dos ecossistemas aquáticos, em consonância com o ODS 14, que aborda a conservação e o uso sustentável dos recursos marinhos. Adicionalmente, a produção de conhecimento científico e a cooperação entre instituições de pesquisa, órgãos gestores e prestadores de serviços de saneamento vinculam-se ao ODS 17, que incentiva o fortalecimento de parcerias voltadas à implementação dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ONU, 2015).

No contexto brasileiro, a universalização do saneamento básico permanece um desafio estrutural e técnico, marcado por desigualdades no acesso aos serviços e por defasagens entre a capacidade instalada das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) e a complexidade dos efluentes recebidos. As condições climáticas sazonais presentes em grande parte do território nacional, associadas à elevada variação das concentrações afluentes, impõem desafios

adicionais à manutenção da eficiência dos sistemas e ao cumprimento dos padrões legais de lançamento de efluentes (SNIS, 2023; von SPERLING, 2014). No caso específico do Distrito Federal, a coexistência de diferentes tipologias de tratamento — incluindo reatores anaeróbios, lagoas de estabilização e sistemas combinados — evidencia a necessidade de análises mais detalhadas sobre o desempenho operacional das ETEs frente à sazonalidade e à variabilidade das concentrações afluentes (CAESB, 2023).

Os sistemas de esgotamento sanitário desempenham papel fundamental na proteção da saúde pública, na preservação dos ecossistemas aquáticos e na manutenção dos usos múltiplos da água, como abastecimento público, irrigação e recreação. Esses sistemas são compostos por um conjunto integrado de infraestruturas destinadas à coleta, transporte, tratamento e disposição final adequada dos esgotos sanitários, envolvendo redes coletoras, interceptores, ETEs (von SPERLING, 2005; METCALF & EDDY, 2014). Nesse conjunto de estruturas, as etapas de coleta e transporte dos esgotos, realizadas por meio das redes coletoras e das estações elevatórias, assumem importância equivalente à etapa de tratamento, uma vez que garantem o encaminhamento adequado dos efluentes às unidades de processamento e contribuem para evitar lançamentos indevidos no meio ambiente (TSUTIYA, 2006). O desempenho global do sistema de esgotamento sanitário depende, portanto, do funcionamento integrado dessas estruturas, visto que o desempenho das ETEs está condicionado, entre outros fatores, às condições hidráulicas e às características qualitativas e quantitativas do esgoto afluente. Ademais, o desempenho das unidades de tratamento relaciona-se à tecnologia empregada, às condições operacionais e de manutenção das unidades e às condições climáticas que influenciam a dinâmica dos processos biológicos de tratamento (von SPERLING, 2005; METCALF & EDDY, 2014).

Nesse cenário, as características do esgoto afluente configuram-se como um dos elementos centrais para a avaliação do desempenho de estações de tratamento de esgoto, uma vez as concentrações dos poluentes, associadas às vazões afluentes, influenciam diretamente a carga aplicada às unidades de tratamento e o funcionamento dos processos biológicos e físicos empregados nas ETEs (von SPERLING, 2014; METCALF & EDDY, 2014). Variações nas concentrações afluentes podem ocorrer em função de fatores como características socioeconômicas da população atendida, infiltrações e contribuições indevidas nas redes coletoras e alterações associadas ao regime pluviométrico (von SPERLING, 2014; METCALF & EDDY, 2014). Em regiões que apresentam períodos bem definidos de seca e chuva, as variações sazonais podem modificar tanto as condições hidráulicas do sistema quanto as características do esgoto afluente, influenciando a diluição dos poluentes, as cargas aplicadas

às unidades de tratamento e o desempenho global das estações (OLIVEIRA; von SPERLING, 2007; von SPERLING, 2014).

Diante dessas variações, a caracterização das concentrações afluentes constitui etapa fundamental para o diagnóstico operacional das ETEs, pois permite avaliar a coerência entre as condições consideradas em projeto e a realidade observada durante a operação dos sistemas. No presente estudo foram analisadas as variáveis Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos Totais (SST) e Fósforo Total (PT), amplamente utilizadas na avaliação do desempenho de sistemas de tratamento de esgoto por representarem, respectivamente, a carga orgânica biodegradável, a carga orgânica total oxidável, a fração particulada do esgoto e o potencial de enriquecimento por nutrientes nos corpos receptores. Esses parâmetros figuram entre os indicadores mais frequentemente empregados em estudos científicos e em normas ambientais voltadas ao controle da poluição hídrica (METCALF & EDDY, 2014; von SPERLING, 2014). A literatura científica, normas de referência e legislação ambiental estabelecem faixas típicas de concentração para esses indicadores; entretanto, estudos nacionais evidenciam frequentes extrapolações desses valores, especialmente em regiões sujeitas a elevada variabilidade pluviométrica, o que pode comprometer a eficiência dos processos de tratamento e o cumprimento dos padrões legais de lançamento de efluentes (OLIVEIRA; von SPERLING, 2007).

Diante desse contexto de variabilidade operacional, a literatura científica aponta que a análise de confiabilidade estatística constitui uma ferramenta complementar à avaliação convencional de desempenho de estações de tratamento de esgoto. O método proposto por Niku *et al.* (1979) permite estimar a probabilidade de uma ETE atender, de forma contínua, aos limites estabelecidos pela legislação ambiental, incorporando a variabilidade natural dos dados operacionais e o comportamento probabilístico dos sistemas. Essa abordagem tem sido empregada em diversos estudos internacionais e nacionais, como os de Dean e Forsythe (1976), Berthouex e Hunter (1983), Oliveira e von Sperling (2007) e Djeedou *et al.* (2013), os quais destacam a importância de critérios de avaliação que considerem a frequência de conformidade ao longo do tempo e não apenas valores médios pontuais.

À luz dessas questões, torna-se pertinente adotar abordagens integradas capazes de relacionar o comportamento hidráulico e orgânico das estações de tratamento de esgoto, as condições climáticas e a confiabilidade dos processos de tratamento. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo geral realizar um diagnóstico integrado do desempenho de 15 Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) do Distrito Federal, considerando a caracterização das concentrações afluentes e sua comparação com valores típicos reportados na literatura, a

eficiência de remoção de poluentes, a influência da sazonalidade (períodos seco e chuvoso) e a confiabilidade operacional no atendimento aos padrões legais de lançamento de efluentes.

Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: (i) caracterizar as concentrações afluentes de DBO, DQO, SST e PT nas 15 ETEs analisadas, estabelecendo as faixas de concentração observadas e comparando-as com valores típicos reportados na literatura, bem como identificando o percentual de amostras que excedem essas referências; (ii) analisar a eficiência de remoção dos parâmetros DBO, DQO, SST e PT, comparando os períodos seco e chuvoso, com o objetivo de identificar possíveis influências da sazonalidade sobre o desempenho das unidades de tratamento; (iii) avaliar a confiabilidade operacional das ETEs no atendimento aos padrões legais de lançamento, considerando um nível de confiabilidade de 95%, com base na metodologia proposta por Niku *et al.* (1979); (iv) relacionar os resultados obtidos com os tipos de tratamento empregados nas ETEs avaliadas, discutindo implicações operacionais, regulatórias e ambientais à luz da legislação vigente, incluindo a Resolução CONAMA nº 430/2011, que estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos (BRASIL, 2011), bem como normas estaduais utilizadas como referência comparativa, como a Resolução CEMA nº 70/2009 (Paraná), a Resolução CONSEMA nº 355/2017 (Rio Grande do Sul) e a Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará).

Cabe destacar que, no Distrito Federal, não há atualmente regulamentação específica que estabeleça limites de lançamento para algumas das variáveis analisadas neste estudo, como DQO, SST e PT em efluentes de estações de tratamento de esgoto. Diante dessa lacuna normativa, optou-se por utilizar, como referência comparativa, limites estabelecidos em legislações ambientais estaduais brasileiras que apresentam critérios técnicos consolidados para esses parâmetros, como a Resolução CEMA nº 70/2009 (Paraná), a Resolução CONSEMA nº 355/2017 (Rio Grande do Sul) e a Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará). Essa estratégia metodológica permitiu ampliar a análise do desempenho das ETEs avaliadas, possibilitando a comparação dos resultados obtidos com padrões normativos adotados em diferentes contextos regulatórios no país.

A abordagem integrada desenvolvida neste estudo contribui para ampliar a compreensão sobre o desempenho operacional das ETEs do Distrito Federal frente à variação das cargas afluentes e às condições sazonais de operação, ao mesmo tempo em que subsidia a construção de uma ferramenta metodológica voltada à avaliação do desempenho de estações de tratamento de esgotos e à gestão da qualidade da água em bacias hidrográficas ao inserir a confiabilidade como ferramenta de monitoramento.

Nesse sentido, a abordagem proposta nesta dissertação busca integrar diferentes dimensões do desempenho de estações de tratamento de esgotos, articulando a análise das concentrações afluentes, a eficiência de remoção de poluentes, os efeitos da sazonalidade e a confiabilidade operacional no atendimento aos padrões legais de lançamento. Ao reunir essas perspectivas em um diagnóstico integrado aplicado às ETEs do Distrito Federal, o estudo contribui para ampliar a compreensão sobre o comportamento desses sistemas frente à variabilidade das condições operacionais e ambientais. Além disso, a incorporação de métodos de análise estatística e de comparação com referências da literatura e da legislação ambiental permite fortalecer a interpretação dos resultados e apoiar a construção de instrumentos técnicos voltados ao monitoramento e à gestão do saneamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Recursos hídricos e saneamento no Distrito Federal

O Distrito Federal (DF), localizado na região Centro-Oeste do Brasil, possui área aproximada de 5.760 km² e população estimada em cerca de 3 milhões de habitantes, distribuídos em diferentes Regiões Administrativas (IBGE, 2023). Diferentemente dos demais estados brasileiros, o DF não é dividido em municípios, sendo sua organização territorial baseada em regiões administrativas.

Do ponto de vista hidrológico, o DF apresenta uma configuração peculiar, caracterizada por rios de cabeceira com pequenas áreas de drenagem e vazões relativamente limitadas.

Embora perenes esses cursos d'água possuem reduzida capacidade de diluição de cargas poluidoras, o que os torna especialmente sensíveis às pressões antrópicas decorrentes da urbanização e do lançamento de efluentes (ANA, 2018; ADASA, 2019). Nesse contexto, o tratamento adequado dos esgotos sanitários assume papel essencial para a preservação da qualidade das águas superficiais e para a manutenção dos usos múltiplos dos recursos hídricos.

Em ambientes naturais, os corpos hídricos apresentam certa capacidade de autodepuração da matéria orgânica por meio de processos físicos, químicos e biológicos. No entanto, a elevada carga poluidora presente nos esgotos domésticos exige tratamentos mais eficientes e sistemáticos antes de seu lançamento nos corpos receptores. As ETEs desempenham papel fundamental nesse processo, ao reproduzir e acelerar os mecanismos naturais de degradação da matéria orgânica e remoção de poluentes, contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados aos efluentes sanitários (von SPERLING, 2016).

No Distrito Federal, os serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário são operados pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), empresa responsável pela gestão dos sistemas de saneamento em todo o território distrital. O DF apresenta desempenho expressivo no cenário nacional do saneamento básico. Segundo a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2021), o Distrito Federal ocupa posição de destaque entre as capitais brasileiras no ranking de universalização do saneamento, com aproximadamente 90% de cobertura de coleta de esgotos e 100% do esgoto coletado submetido a tratamento antes de seu lançamento nos corpos hídricos.

Atualmente, o sistema de esgotamento sanitário do Distrito Federal conta com 17 ETEs em operação, porém neste trabalho analisaremos as 15 mais relevantes, distribuídas ao longo do território e associadas a diferentes bacias hidrográficas. Essas unidades utilizam diversas configurações tecnológicas de tratamento, incluindo processos baseados em lodos ativados, reatores anaeróbios do tipo UASB, lagoas de estabilização e sistemas combinados com polimento final químico. A diversidade dessas tecnologias reflete as diferentes características operacionais e ambientais das áreas atendidas. Nesse contexto, torna-se relevante compreender o panorama das principais estações de tratamento de esgotos do Distrito Federal, considerando suas capacidades de projeto e os níveis de tratamento adotados.

Entre as quinze estações de tratamento de esgotos analisadas observa-se diversidade de capacidades de projeto e de níveis de tratamento, refletindo as diferentes estratégias adotadas para o controle da poluição hídrica no Distrito Federal. A vazão média de projeto das unidades varia de aproximadamente 35 L/s, na ETE Vale do Amanhecer, até cerca de 1.500 L/s, na ETE Brasília Sul, evidenciando a coexistência de estações de pequeno, médio e grande porte no sistema distrital de esgotamento sanitário. Considerando o conjunto das unidades avaliadas, a capacidade total instalada ultrapassa 6.000 L/s, o que demonstra a relevância da infraestrutura de tratamento de esgotos existente no Distrito Federal (CAESB, 2024).

Do ponto de vista do nível de tratamento, verifica-se predominância de sistemas com tratamento terciário, presentes em nove das quinze estações analisadas. Nesse grupo encontram-se unidades de grande porte, como Brasília Sul (1.500 L/s), Melchior (1.469 L/s) e Brasília Norte (920 L/s), além de estações de porte intermediário, como Gama (328 L/s), Samambaia (284 L/s) e Recanto das Emas (246 L/s). Também utilizam tratamento terciário as unidades Riacho Fundo (94 L/s), Alagado (154 L/s) e Santa Maria (154 L/s). A presença dessa etapa adicional de tratamento permite melhorar a qualidade do efluente final, promovendo maior remoção de sólidos suspensos e nutrientes antes do lançamento nos corpos hídricos receptores.

Por outro lado, seis estações operam com nível de tratamento secundário, voltado principalmente à remoção biológica da matéria orgânica presente no esgoto doméstico. Nesse grupo encontram-se as ETEs Paranoá (112 L/s), Planaltina (255 L/s), Sobradinho (196 L/s), São Sebastião (226 L/s), Brazlândia (87 L/s) e Vale do Amanhecer (35 L/s). Essas unidades apresentam capacidades de projeto predominantemente intermediárias ou menores quando comparadas às grandes estações do sistema, atendendo regiões administrativas específicas e contribuindo para a redução da carga orgânica lançada nos corpos hídricos locais (CAESB, 2024).

De forma geral, a presença simultânea de estações com tratamento secundário e terciário evidencia a adaptação do sistema de esgotamento sanitário do Distrito Federal às diferentes condições urbanas e ambientais do território. Grandes unidades com tratamento terciário concentram elevada capacidade de tratamento e atendem áreas mais densamente urbanizadas, enquanto estações de menor porte, frequentemente associadas ao tratamento secundário, atendem localidades específicas com diferentes características de ocupação. Essa diversidade tecnológica e operacional fornece um panorama representativo da infraestrutura de tratamento de esgotos do Distrito Federal e constitui base importante para as análises de desempenho e eficiência apresentadas neste estudo (CAESB, 2024). As principais tecnologias de tratamento empregadas nas ETEs do Distrito Federal são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1– Tecnologias de tratamento adotadas nas estações de tratamento de esgoto do Distrito Federal

Estação de Tratamento de Esgoto	Tipo de tratamento detalhado
ETE-Sul	Lodos ativados – variação <i>Phoredox</i> (Bardenpho modificado) de 3 estágios com polimento final químico
ETE-Norte	Lodos ativados – variação <i>Phoredox</i> (Bardenpho modificado) de 3 estágios com polimento final químico
ETE-Riacho Fundo	Reator em batelada sequencial (RBS) com adição de sulfato de alumínio
ETE-Melchior	Reatores <i>UASB</i> com Sistema de Fluxo Alternativo (Unitank®)
ETE-Samambaia	Reatores <i>UASB</i> seguidos de lagoas facultativas, lagoas de alta taxa e lagoas de maturação, com polimento final químico
ETE-Gama	Lodos ativados – variação <i>Phoredox</i> (Bardenpho modificado) de 5 estágios com precipitação química
ETE-Santa Maria	Reatores <i>UASB</i> seguidos de lagoas de alta taxa e polimento final químico
ETE-Brazlândia	Lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa
ETE-Sobradinho	Lodos ativados convencional

Tabela 1 (Continuação)

Estação de Tratamento de Esgoto	Tipo de tratamento detalhado
ETE-Alagado	Reatores <i>UASB</i> seguidos de lagoa de alta taxa e polimento final químico
ETE-Paranoá	Reatores <i>UASB</i> seguidos de lagoas de estabilização e lagoas aeradas
ETE-Planaltina	Reatores <i>UASB</i> seguidos de lagoa facultativa e lagoa de maturação
ETE-Vale do Amanhecer	Reatores <i>UASB</i> seguidos de lagoa aerada e lagoa de maturação
ETE-São Sebastião	Reatores <i>UASB</i> seguidos de escoamento superficial e duas lagoas de maturação
ETE-Recanto das Emas	Reatores <i>UASB</i> seguidos de reator aerado e lagoa aerada facultativa

Fonte: Autor

A distribuição dessas ETEs ocorre ao longo de quatro importantes bacias hidrográficas que compõem o sistema hidrológico do Distrito Federal: as bacias dos rios Corumbá, Descoberto, São Bartolomeu e Paranoá. A localização dessas unidades ao longo dessas bacias é particularmente relevante, uma vez que muitos desses cursos d'água desempenham papel estratégico no abastecimento público, na manutenção de ecossistemas aquáticos e na regulação ambiental da região.

A bacia do rio Corumbá está localizada majoritariamente no estado de Goiás e constitui uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Paraná. Possui extensão aproximada de 567 km e altitude média em torno de 1.200 m, abrangendo diversos municípios da região Centro-Oeste (FEINDT, 2006). Essa bacia é considerada estratégica para o abastecimento da população do Distrito Federal, especialmente após a implantação do Sistema Produtor Corumbá, que capta água no reservatório de Corumbá IV. No território distrital, estão associadas a essa bacia as ETEs Gama, Santa Maria, Alagado e Recanto das Emas, cujos efluentes tratados são lançados em cursos d'água que integram esse sistema hidrográfico.

A bacia do rio Descoberto, por sua vez, possui área aproximada de 895,9 km² e ocupa a porção oeste do Distrito Federal. Essa bacia abriga o reservatório do Descoberto, responsável pelo abastecimento de grande parcela da população da capital federal (DO CARMO *et al.*, 2021). O rio Descoberto nasce na região da Chapada da Veredinha e desempenha papel fundamental na segurança hídrica da região. Nessa bacia estão localizadas as ETEs Brazlândia, Samambaia e Melchior, cujos sistemas de tratamento contribuem para a proteção da qualidade das águas utilizadas para abastecimento público.

A bacia do rio São Bartolomeu constitui a maior bacia hidrográfica em área dentro do território do Distrito Federal. Segundo Carvalho (2005), essa bacia abrange extensas áreas das

regiões administrativas de Sobradinho, Planaltina, Paranoá e São Sebastião, sendo subdividida em três microbacias: alto, médio e baixo São Bartolomeu. Um de seus principais afluentes é o ribeirão Mestre D'Armas, cuja nascente se localiza na Lagoa Bonita, situada na Estação Ecológica de Águas Emendadas. Essa área possui grande relevância ambiental por representar um importante divisor natural de águas entre as bacias hidrográficas do Tocantins-Araguaia e do Prata. As ETEs Planaltina, Sobradinho, Vale do Amanhecer e São Sebastião estão inseridas nessa bacia, exercendo influência direta sobre os cursos d'água que compõem esse sistema hidrográfico.

Por fim, a bacia do Lago Paranoá é a única bacia hidrográfica inteiramente localizada dentro do território do Distrito Federal, abrangendo área aproximada de 1.034 km², correspondente a cerca de 18% da área total do DF (FERRANTE *et al.*, 2001). Essa bacia concentra importantes áreas urbanas da capital federal e possui grande relevância para atividades de lazer, turismo e abastecimento público. Nela estão inseridas as ETEs Riacho Fundo, Brasília Sul, Brasília Norte e Paranoá, cujos efluentes tratados são lançados em tributários do Lago Paranoá. Dada a importância estratégica desse corpo hídrico, o monitoramento da qualidade dos efluentes e a eficiência dos sistemas de tratamento tornam-se aspectos fundamentais para a preservação ambiental e para a manutenção dos usos múltiplos da água.

Considerando as características hidrológicas do Distrito Federal e a relevância ambiental de seus corpos hídricos, a avaliação do desempenho das Estações de Tratamento de Esgoto torna-se essencial para compreender a interação entre os sistemas de saneamento e os recursos hídricos regionais. Nesse contexto, o presente estudo analisa o desempenho de 15 ETEs do Distrito Federal, considerando diferentes tecnologias de tratamento e sua distribuição nas principais bacias hidrográficas do território.

2.2 Tratamento de esgoto doméstico

O tratamento das águas residuárias domésticas tem como principal objetivo acelerar, em ambiente controlado, os processos naturais de degradação da matéria orgânica. Em condições ambientais normais, esse processo ocorreria de forma mais lenta e com risco significativo à saúde humana e ao meio ambiente. Assim, ETEs são projetadas para promover a remoção de matéria orgânica, microrganismos patogênicos, sólidos em suspensão e, em determinadas situações, nutrientes como nitrogênio e fósforo, especialmente quando não há presença significativa de contaminantes industriais (METCALF & EDDY, 2014).

A definição da tecnologia de tratamento adotada em uma ETE depende de diversos fatores, entre eles as características físico-químicas e biológicas do esgoto, os padrões exigidos para o efluente tratado e a qualidade requerida para o corpo receptor. A eficiência do sistema está diretamente relacionada ao nível de tratamento aplicado, que deve estar em conformidade com os padrões legais e ambientais vigentes (von SPERLING, 2007). No entanto, aspectos econômicos, sociais, operacionais, disponibilidade de área e as demandas da comunidade local também exercem influência significativa na escolha da solução tecnológica, conforme destacado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2017).

De modo geral, os sistemas de tratamento de esgoto doméstico seguem uma sequência de etapas que podem ser classificadas em diferentes níveis. Segundo Baird (2002) e von Sperling (2014), os processos são divididos em tratamento preliminar, primário, secundário e terciário, cada qual com funções específicas na remoção de poluentes e adequação do efluente para o lançamento final.

2.2.1 Tratamento Preliminar

O tratamento preliminar constitui a etapa inicial do processo de depuração do esgoto sanitário, sendo responsável pela remoção de sólidos grosseiros que, embora representem uma fração pequena da carga poluidora, podem comprometer a operação das unidades subsequentes. Nessa fase são retirados materiais como areia, gordura, folhas, plásticos e outros resíduos flutuantes ou sedimentáveis por meio de processos essencialmente físicos (von SPERLING, 2016).

Para essa finalidade, são empregados dispositivos como grades, peneiras e caixas de areia, que têm como função reter os resíduos maiores, protegendo bombas, tubulações e equipamentos eletromecânicos contra obstruções e desgastes prematuros. Além disso, essa etapa também pode incluir estruturas de medição de vazão, como a calha *Parshall*, cuja função é controlar e registrar a quantidade de esgoto que afluirá às demais etapas do tratamento (CAESB, 2021).

O tratamento preliminar, portanto, desempenha um papel estratégico na preservação da integridade e da eficiência do sistema como um todo. Sua principal função é evitar danos operacionais e garantir que o esgoto chegue às etapas seguintes com menor risco de interferência mecânica, contribuindo, inclusive, para a proteção dos corpos receptores contra materiais não biodegradáveis. Conforme destaca von Sperling (1995), essa etapa deve ser cuidadosamente dimensionada e mantida em condições adequadas de operação, uma vez que

seu desempenho influencia diretamente a confiabilidade e a durabilidade de todo o sistema de tratamento.

2.2.2 Tratamento a Nível Primário

No estágio de tratamento primário, o foco recai sobre a remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis, o que contribui diretamente para a redução das cargas de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio). Esta fase operacional utiliza princípios físicos para separar a matéria orgânica mais pesada do efluente, diminuindo significativamente a carga poluidora que segue para os estágios seguintes. Segundo von Sperling (1995), os principais mecanismos envolvidos incluem sedimentação, decantação, flotação e digestão de sólidos.

Em conformidade com as práticas adotadas pela CAESB, o tratamento primário consiste na retenção dos sólidos sedimentáveis que se acumulam no fundo do tanque decantador, formando o chamado lodo primário. Este material é periodicamente removido e encaminhado para etapas subsequentes de tratamento ou disposição final. Já as substâncias menos densas, como graxas e óleos, permanecem na superfície e são removidas por meio de *skimmers* ou dispositivos similares (CAESB, 2021).

Dessa forma, o tratamento primário tem papel essencial no sistema da ETE, pois reduz a carga de poluentes desde o início do processo, diminuindo a demanda sobre os tratamentos biológicos seguintes e facilitando o controle operacional. A eficiência dessa etapa é fundamental para o desempenho global da estação, afetando diretamente a qualidade dos efluentes e o custo e a durabilidade das fases subsequentes.

2.2.3 Tratamento a nível Secundário

O tratamento secundário representa a fase biológica do processo de depuração do esgoto, sendo destinado à remoção da matéria orgânica dissolvida e em suspensão, assim como à redução de nutrientes como nitrogênio e fósforo, quando presentes em concentrações significativas. Nessa etapa, os microrganismos desempenham papel central ao degradar a matéria orgânica por meio de reações bioquímicas que ocorrem sob condições aeróbias ou anaeróbias (BAIRD, 2002).

Em sistemas aeróbios, os microrganismos utilizam o oxigênio para oxidar compostos orgânicos, convertendo-os em gás carbônico, água e biomassa microbiana. Já em processos

anaeróbios, como os reatores *UASB* (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), ocorre a conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono, com menor consumo energético, embora com eficiência geralmente inferior no que se refere à remoção de nutrientes e sólidos coloidais (von SPERLING, 2016).

Segundo Metcalf e Eddy (2014), a remoção da matéria orgânica dissolvida é geralmente alcançada por meio de processos biológicos como o sistema de lodos ativados ou por métodos físico-químicos como a oxidação avançada. No entanto, é importante destacar que frações não biodegradáveis da matéria orgânica, frequentemente presentes nos esgotos, tendem a resistir ao tratamento biológico convencional e, portanto, demandam etapas adicionais para sua remoção, o que caracteriza o início do tratamento terciário.

2.2.3.1 Tratamento Aeróbio

O tratamento aeróbio caracteriza-se pelo uso de microrganismos que promovem a degradação da matéria orgânica presente no esgoto na presença de oxigênio. Esse oxigênio pode ser fornecido de forma natural, por difusão atmosférica, ou artificialmente, por meio de sistemas de aeração mecânica ou difusa. Nesse ambiente oxidativo, os microrganismos consomem a matéria orgânica como fonte de energia, convertendo-a em biomassa microbiana, gás carbônico e água (von SPERLING, 2016).

Nos sistemas aeróbios mais utilizados, como os de lodos ativados, a biomassa é mantida em suspensão e continuamente recirculada para manter contato eficiente com o esgoto afluente. Durante esse processo, forma-se uma grande quantidade de lodo secundário, que necessita ser removido, tratado e descartado de forma adequada. Essa elevada produção de lodo é uma das principais características dos sistemas aeróbios (METCALF e EDDY, 2014).

Quando comparados aos sistemas anaeróbios, os processos aeróbios são geralmente mais eficazes na remoção de matéria orgânica e nutrientes, embora demandem maior consumo energético e apresentem maior volume de lodo gerado. Já os processos anaeróbios, por outro lado, tendem a gerar menor quantidade de lodo e permitem sua estabilização simultânea, o que pode representar uma vantagem operacional e econômica em determinados contextos (von SPERLING, 2016; CHERNICHARO, 2007).

2.2.3.2 Lagoas Facultativas

Embora as lagoas facultativas apresentem em sua estrutura zonas anaeróbias e processos característicos do metabolismo anaeróbio, para fins de organização deste trabalho, serão tratadas nesta subseção, vinculadas ao grupo de tratamentos com presença de oxigênio, dada a importância da atividade aeróbia e fotossintética na superfície do sistema.

As lagoas facultativas são unidades amplamente utilizadas em sistemas de estabilização de esgotos domésticos, caracterizadas por sua capacidade de promover simultaneamente a degradação da matéria orgânica por processos anaeróbios, aeróbios e fotossintéticos (Figura 1). O fundo da lagoa é tipicamente anaeróbio, onde ocorre a digestão dos sólidos sedimentados. Na zona intermediária, a oxidação aeróbia é conduzida por bactérias heterotróficas, enquanto a zona superior é dominada por algas que realizam fotossíntese, contribuindo com oxigênio dissolvido para o sistema. A espessura dessas camadas depende da temperatura, da radiação solar e da carga orgânica aplicada ao sistema (von SPERLING, 2016).

Segundo von Sperling (2007), a DBO solúvel e finamente particulada é degradada na fase líquida por bactérias aeróbias dispersas, enquanto a DBO particulada tende a sedimentar e ser transformada de forma anaeróbia em metano, gás carbônico, água e outros subprodutos. As lagoas facultativas apresentam boa eficiência na remoção de matéria orgânica, com valores de DBO variando entre 70% e 90%, sendo cerca de 30% desse desempenho atribuível à digestão anaeróbia (MENDONÇA, 2000). Além disso, também contribuem para a remoção de microrganismos patogênicos, especialmente sob alta incidência de radiação solar e em condições de pH e oxigênio dissolvido elevados (MAYNARD *et al.*, 1999).

Entre as 15 ETEs do Distrito Federal operadas pela CAESB, três unidades utilizam lagoas facultativas como parte do sistema de tratamento: ETE Samambaia, ETE Brazlândia e ETE Recanto das Emas. Em todas essas estações, as lagoas facultativas estão integradas a outras tecnologias, formando sistemas híbridos adaptados às características específicas do esgoto e às demandas operacionais locais.

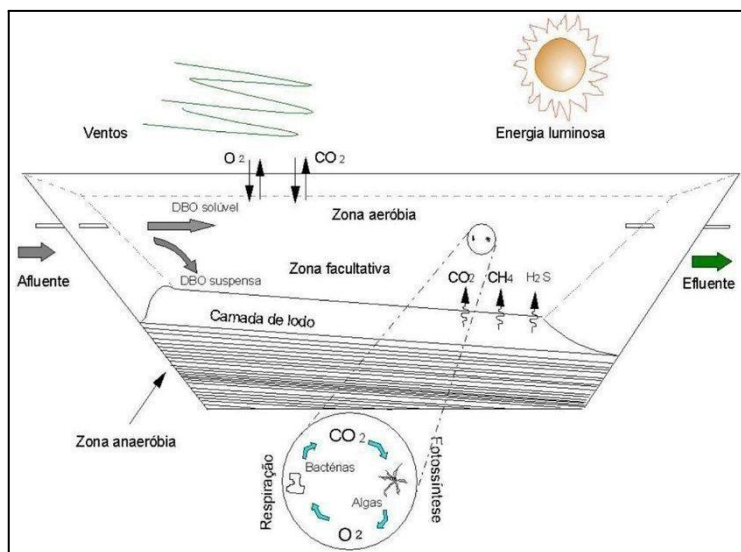


Figura 1-Funcionamento de uma lagoa facultativa

Fonte: (von SPERLING, 2002)

2.2.3.3 Lagoa Aerada Facultativa

As Lagoas Aeradas Facultativas (LAF) constituem uma variação dos sistemas aeróbios de tratamento de esgoto, nas quais a oxigenação é promovida de forma mecânica. Diferentemente das lagoas facultativas convencionais, nas quais a oxigenação ocorre principalmente por meio da fotossíntese de algas e da difusão atmosférica, as LAF utilizam aeradores mecânicos para introduzir oxigênio diretamente na massa líquida (von SPERLING, 2016; MARA, 2004).

De acordo com von Sperling (2016), trata-se de um sistema predominantemente aeróbio, mas denominado "facultativo" porque a energia fornecida pelos aeradores não é suficiente para manter todos os sólidos em suspensão em toda a profundidade da lagoa. Como resultado, parte desses sólidos sedimenta, formando uma camada de lodo no fundo, onde ocorre a digestão anaeróbia.

O processo de injeção de ar gera turbulência na superfície, favorecendo a dispersão do oxigênio atmosférico e acelerando a estabilização da matéria orgânica presente no esgoto. Essa combinação de mecanismos permite que as LAF operem com menor tempo de detenção hidráulica e necessitem de áreas menores em comparação com as lagoas facultativas tradicionais, sendo, portanto, uma solução viável para localidades com restrições espaciais, sem renunciar à eficiência no tratamento (von SPERLING, 2016; MARA, 2004).

No contexto do Distrito Federal, a ETE Recanto das Emas, operada pela CAESB, adota essa tecnologia como parte integrante de seu sistema de tratamento, em associação com reatores

anaeróbios e reatores aerados, formando um arranjo híbrido voltado para maior eficiência e robustez operacional.

2.2.3.4 Lagoas de Maturação

As lagoas de maturação são unidades de tratamento complementar utilizadas ao final dos sistemas de lagoas de estabilização, tendo como principal finalidade a remoção de microrganismos patogênicos e a melhoria da qualidade final do efluente. Essas lagoas são caracterizadas por sua baixa profundidade, geralmente entre 0,8 e 1,5 metros, e por apresentarem elevada concentração de algas, o que favorece a produção de oxigênio dissolvido e a atividade microbiológica aeróbia.

Com cargas orgânicas mais baixas e tempos de detenção hidráulica prolongados, as lagoas de maturação também atuam na remoção de sólidos em suspensão, nutrientes e coliformes. A eficiência desse processo depende de fatores como profundidade, tempo de detenção, temperatura e pH, que influenciam diretamente a taxa de inativação de organismos patogênicos. A elevada concentração de oxigênio dissolvido promove uma intensa competição por nutrientes entre os microrganismos aeróbios e os patógenos, contribuindo para a redução da carga biológica do efluente.

Segundo Jordão e Pessoa (2005), essas lagoas desempenham papel fundamental na etapa final do tratamento por lagoas, atuando como um “polimento” do efluente, com vistas à adequação aos padrões legais de lançamento, sobretudo no que se refere à balneabilidade e reuso agrícola.

No Distrito Federal, três estações de tratamento de esgoto operadas pela CAESB utilizam lagoas de maturação em sua linha de tratamento: ETE Samambaia, ETE Planaltina e ETE São Sebastião. Nessas unidades, as lagoas de maturação encontram-se associadas a arranjos compostos por lagoas facultativas, lagoas de alta taxa ou reatores anaeróbios, desempenhando papel relevante no controle sanitário do efluente final, conforme ilustrado na Figura 2.



Figura 2-Lagoa de Maturação da ETE-Samambaia

Fonte: Autor

2.2.3.5 Sistema de Fluxo Alternativo – Unitank®

O reator do tipo Unitank® é uma tecnologia de tratamento aeróbio baseada no processo de lodos ativados, operando com aeração contínua e controle das fases de aeração e sedimentação. Nesse sistema, os microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica permanecem em suspensão no interior do reator, onde recebem oxigênio por meio de aeração difusa ou mecânica, promovendo a oxidação biológica dos poluentes (von SPERLING, 2014).

Após a etapa de aeração, o efluente passa por um período de sedimentação, em que ocorre a separação entre a biomassa ativa (lodo) e o líquido tratado. Parte do lodo sedimentado é recirculado para o reator, mantendo a concentração de microrganismos no sistema e assegurando a continuidade do processo. O restante é direcionado para etapas de tratamento e disposição de lodo.

O Unitank® difere dos sistemas convencionais por integrar em um mesmo tanque as funções de aeração, decantação e recirculação, operando em ciclos com alternância de zonas aeradas e de sedimentação, o que permite uma operação mais compacta, eficiente e automatizada. Esse tipo de sistema está presente, por exemplo, na ETE Melchior (Figuras 3 e 4), conforme verificado na tabela de tratamento das ETEs do Distrito Federal apresentada neste trabalho.



Figura 3- Reatores Aerados Difusos da ETE-Melchior, fase de aeração (à direita) e decantação (à esquerda).

Fonte: Autor



Figura 4- Reatores Aerados Difusos da ETE-Melchior, fase de aeração

Fonte: Autor

2.2.3.6 Lodos Ativados Convencionais e o Processo Phoredox

O sistema de lodos ativados, concebido no Reino Unido por Arden e Lockett em 1914, tornou-se uma das tecnologias mais amplamente utilizadas no mundo para o tratamento de esgotos domésticos e industriais. Segundo von Sperling (2016), sua aplicação se destaca especialmente em contextos que exigem elevada qualidade do efluente tratado e limitação de área disponível.

De forma geral, o processo baseia-se na oxidação biológica da matéria orgânica e de compostos inorgânicos por uma população microbiana mantida em suspensão em meio aerado. De acordo com Bento *et al.* (2005), a eficiência do sistema depende diretamente da capacidade de floculação da biomassa ativa e da composição dos flocos, que são formados por bactérias, fungos, protozoários e micrometazoários. Esses flocos são os principais responsáveis pela remoção da matéria orgânica carbonácea (DBO), além de participarem do controle microbiológico por meio da predação e competição por nutrientes.

O sistema opera com um reator aerado (tanque de aeração) acoplado a um decantador secundário. Parte do lodo sedimentado é recirculado ao reator, mantendo a biomassa em atividade, enquanto o excesso é descartado. Conforme Lapolli (1993), esse lodo excedente, ainda não estabilizado, passa posteriormente por digestores anaeróbios para completar a degradação da matéria orgânica celular. A idade do lodo em sistemas convencionais varia de 4 a 15 dias, e o tempo de detenção hidráulica gira em torno de 4 a 8 horas, resultando em eficiências de remoção de DBO entre 85% e 95% (JORDÃO E PESSÔA, 2011).

Como evolução desse modelo, surgem variantes voltadas à remoção de nutrientes, entre elas o processo *Phoredox*. Essa configuração é baseada na criação de zonas anaeróbias seguidas por zonas aeróbias, promovendo a remoção biológica simultânea de fósforo e nitrogênio. No estágio anaeróbio, bactérias acumuladoras de fósforo (BAPs) absorvem compostos orgânicos e liberam fósforo no meio. Na etapa aeróbia seguinte, esse fósforo é reabsorvido em excesso e removido juntamente com o lodo excedente. O processo também favorece a desnitrificação parcial, com a conversão de nitrato em nitrogênio gasoso, especialmente quando precedido por zona anóxica (METCALF; EDDY, 2016).

No DF, a ETE Sul, operada pela CAESB, é um exemplo de aplicação prática desse sistema, adotando o arranjo *Phoredox* em sua configuração de tratamento, com o objetivo de atender a padrões mais restritivos de remoção de nutrientes, especialmente o Fósforo Total (CAESB, 2017). A eficiência do processo está diretamente associada à manutenção de tempos adequados de detenção hidráulica, disponibilidade de carbono, e controle das condições redox em cada zona do sistema.

Além da ETE Sul, outras unidades como a ETE Norte e ETE-Gama operam com o sistema de lodos ativados variação *Phoredox*.

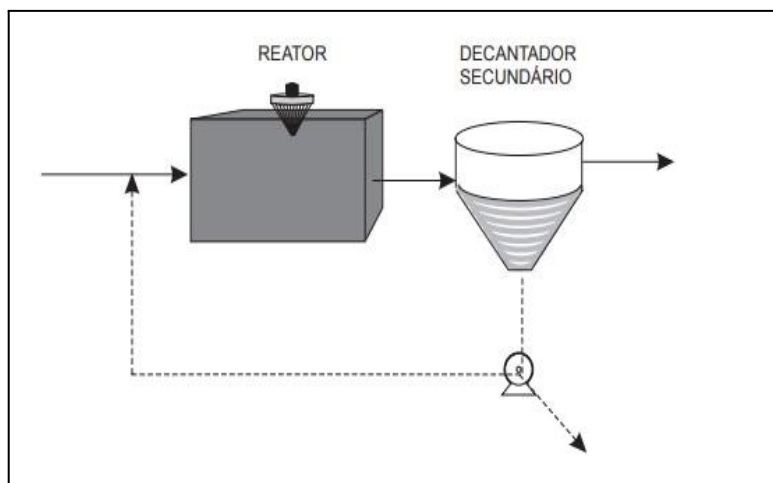


Figura 5- Esquema simplificado de um tratamento tipo Lodos ativados
Fonte: von Speling (2016)

2.2.3.7-Lodo Ativado Aeração Prolongada

O sistema de lodos ativados com aeração prolongada constitui uma variação do processo convencional caracterizada pelo aumento do tempo de permanência da biomassa no sistema, da ordem de 18 a 30 dias. Como a quantidade de biomassa no reator (em kg SSV/m³) é maior que no sistema de lodos ativados convencional, o volume do reator aeróbio deve ser também mais elevado, e o tempo de detenção hidráulica varia em torno de 16 a 24h (von SPERLING, 2012).

Como não ocorre a estabilização do lodo biológico excedente do sistema de aeração prolongada, visto que já ocorre a estabilização da biomassa de forma aeróbia no próprio tanque de aeração, não se utilizam decantadores primários antes dos sistemas de aeração prolongada, torna mais simples o fluxograma do processo: não há decantadores primários nem unidades de digestão do lodo (von SPERLING, 2012). A figura 6 apresenta esquema desse sistema:

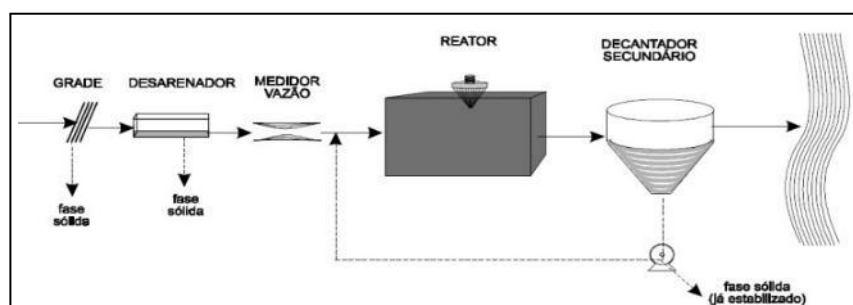


Figura 6- Esquema de um sistema de lodos ativados com aeração prolongada
Fonte: von Sperling (2012)

2.2.3.8 Lagoa de alta taxa

As lagoas de alta taxa são unidades de tratamento que operam sob condições predominantemente aeróbias, com elevada taxa de degradação bioquímica e sem a necessidade de introdução artificial de oxigênio. De acordo com Picot *et al.* (1993), caracterizam-se por sua pouca profundidade (0,30 a 0,60 metros), tempo de detenção hidráulica reduzido (2 a 12 dias), superfície específica de tratamento menor por habitante e agitação contínua que promove a homogeneização da massa líquida. A profundidade da lagoa deve coincidir com a profundidade da zona eufótica, maximizando a eficiência fotossintética.

Nas lagoas de alta taxa, as algas desempenham papel central na produção de oxigênio dissolvido via fotossíntese. Esse oxigênio é utilizado por bactérias aeróbias para oxidar a matéria orgânica presente no esgoto. Em contrapartida, as algas assimilam os nutrientes liberados na decomposição bacteriana, formando material celular novo. Como destaca Bahlaoui (1990), a eficiência depuradora do sistema depende da taxa de crescimento algal e da consequente produção de oxigênio dissolvido.

Além da eficiência na remoção de carga orgânica, as lagoas de alta taxa apresentam vantagens adicionais. Segundo Nascimento (2001), esses sistemas possuem baixa produção de lodo, ausência de odores e de insetos, remoção parcial de amônia por volatilização, remoção de fósforo por precipitação e atingem níveis equivalentes ao tratamento terciário, devido à sua elevada produtividade primária.

O tempo de detenção relativamente curto nessas lagoas, conforme Andrade Neto (1997), permite que a área necessária para sua implantação seja menor que em sistemas convencionais de lagoas facultativas, o que as torna atrativas para locais com restrição de espaço, desde que haja alta incidência solar e temperaturas favoráveis.

No Distrito Federal, a CAESB utiliza lagoas de alta taxa como parte do arranjo de tratamento de duas estações de esgoto: ETE Alagado e ETE Santa Maria. Nessas unidades, as lagoas de alta taxa estão integradas a outros processos, como reatores anaeróbios ou lagoas facultativas, compondo sistemas híbridos que buscam associar simplicidade operacional a maior eficiência de remoção de poluentes.

2.2.3.9 Escoamento Superficial

O escoamento superficial no solo é uma tecnologia natural de tratamento de esgoto sanitário, na qual o efluente é distribuído sobre rampas inclinadas, geralmente compostas por

solos relativamente impermeáveis e recobertas por vegetação adaptada. O esgoto percorre a superfície das rampas, sofrendo processos físicos, químicos e biológicos que promovem sua depuração. Esses processos incluem sedimentação, adsorção, degradação microbiana e absorção de nutrientes pelas plantas (von SPERLING, 2005).

Segundo Cerqueira (2004), trata-se de um sistema de baixo custo de implantação, operação e manutenção, podendo ainda possibilitar o aproveitamento agrícola do efluente tratado em certas condições. O solo funciona como um filtro natural, e sua eficácia depende da interação entre a vegetação, os microrganismos presentes e as propriedades físico-químicas do solo. Como apontado por Milen (2014), os microrganismos utilizam a matéria orgânica presente no esgoto como fonte de alimento e energia, promovendo sua transformação em compostos mais simples.

A eficiência do sistema tem sido objeto de estudo em diferentes contextos. De acordo com Taebi e Droste (2008), o escoamento superficial pode atingir remoções de aproximadamente 90% para DBO e sólidos suspensos totais (SST), entre 70% e 90% para nitrogênio, e entre 40% e 60% para fósforo total, quando bem dimensionado e operado.

Entretanto, o desempenho desse tipo de tratamento é influenciado por fatores ambientais, como clima, tolerância da vegetação utilizada, inclinação do terreno e temperatura. Milen (2014) observa que os melhores resultados ocorrem em períodos de clima mais quente, devido à intensificação da atividade biológica. Além disso, há desvantagens importantes, como o risco de contaminação da vegetação de cobertura, do lençol freático e de corpos hídricos receptores. A técnica também pode transformar o solo em vetor de agentes patogênicos, representando riscos potenciais à saúde pública (SANTA MARIA & TORANZOS, 2003).

No Distrito Federal, a única estação de tratamento de esgoto que utiliza o escoamento superficial como parte integrante de seu sistema é a ETE São Sebastião, onde esse método é combinado com reatores anaeróbios e lagoas de maturação, formando um arranjo simplificado e de baixo custo, adequado ao porte e localização da unidade.

2.2.4 Tratamento a nível secundário anaeróbio

O tratamento anaeróbio de águas residuárias tem ganhado destaque como alternativa de baixo custo energético e operacional em comparação a processos aeróbios convencionais, como o sistema de lodos ativados, ou mesmo como substituto de grandes áreas exigidas por sistemas de lagoas (VELA, 2006). Esse tipo de processo tem se mostrado especialmente promissor em

países tropicais como o Brasil, onde predominam temperaturas elevadas ao longo do ano, fator que favorece o metabolismo microbiano típico dos reatores anaeróbios (CHERNICHARO, 2001).

O processo é caracterizado pela ausência de oxigênio dissolvido e pela não necessidade de sua introdução artificial. O esgoto, ao adentrar o reator com concentrações insignificantes de oxigênio, inicia seu tratamento justamente sob essas condições redutoras, o que define a natureza anaeróbia do sistema (ZEEMAN & LETTINGA, 1999).

Durante o tratamento, uma parte significativa da matéria orgânica biodegradável — geralmente entre 70% e 90% — é convertida em biogás, composto predominantemente por metano e dióxido de carbono. Esse biogás é liberado da fase líquida e pode ser aproveitado energeticamente, dependendo da configuração do sistema. Apenas uma fração menor, de aproximadamente 5% a 15% da matéria orgânica, é transformada em biomassa microbiana, que constitui o lodo excedente a ser eventualmente removido (CHERNICHARO, 2001).

A simplicidade operacional, o reduzido consumo de energia, a menor produção de sólidos e o potencial de aproveitamento do biogás tornam os sistemas anaeróbios uma escolha estratégica para diversas regiões brasileiras. No Distrito Federal, várias estações da CAESB utilizam reatores anaeróbios — especialmente do tipo RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB*) — como etapa central de tratamento, isoladamente ou em combinação com lagoas e pós-tratamentos aeróbios. Sobre as que utilizam essa tecnologia, podemos citar: ETEs Melchior, ETE-Samambaia, ETE-Santa Maria, ETE-Alagado, ETE-Paranoá, ETE-Planaltina, ETE-Vale do Amanhecer, ETE-São Sebastião e ETE-Recanto das Emas.

2.2.4.1 Reatores Anaeróbios do tipo UASB

No Brasil, um dos principais reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de esgotos sanitários é o *UASB*. Essa tecnologia foi desenvolvida na década de 1970, na Holanda, na Universidade de Agricultura de Wageningen, pelos professores Van der Meer e Gatzke Lettinga (HAANDEL *et al.*, 1994). Seu objetivo principal é promover o tratamento de esgoto com eficiência e simplicidade operacional, sem a necessidade de aporte externo de oxigênio.

A partir dos anos 1980, os reatores *UASB* passaram a ser implantados no Brasil, impulsionados por condições ambientais favoráveis, como o clima tropical, e por características operacionais vantajosas: exigência reduzida de área, baixo custo de implantação e manutenção, mínima ou nenhuma demanda energética, possibilidade de aproveitamento energético do biogás

gerado, e eficiência satisfatória na remoção de matéria orgânica — com taxas de remoção de DBO_5 e DQO entre 65% e 75% (CHERNICHARO, 2007).

Os reatores *UASB* atuam de maneira integrada, funcionando simultaneamente como decantador primário, reator biológico e digestor de lodo. Essa multifuncionalidade torna o sistema eficiente mesmo para esgotos previamente tratados, sendo recomendado para a remoção biológica da matéria orgânica sob condições redutoras, ou seja, na ausência de oxigênio dissolvido.

Segundo Louzada (2000), a aplicação dessa tecnologia ainda é restrita a alguns países, sendo mais comum na América Latina, onde a maioria das experiências em escala real foi desenvolvida. No reator *UASB*, o esgoto é alimentado pelo fundo do reator, estabelecendo um fluxo ascendente, com a saída do efluente ocorrendo pela parte superior. Essa configuração permite o contato íntimo entre a biomassa e a carga orgânica, otimizando o processo de degradação anaeróbia. A Figura 7 a seguir apresenta um reator tipo *UASB*.



Figura 7- Reator Anaeróbio do tipo UASB da ETE-Paranoá
Fonte: Autor

A eficiência dos Reatores *UASB* está intimamente associada à formação e manutenção de uma biomassa granulada de alta atividade metabólica. Segundo Rissoli (2004), o bom desempenho desse tipo de reator depende diretamente do desenvolvimento de grânulos microbianos, responsáveis pela degradação da matéria orgânica presente no esgoto.

Além disso, o autor destaca que a definição adequada da velocidade de fluxo ascendente e a presença de mecanismos eficientes de separação de fases são fatores cruciais para garantir

a estabilidade operacional do sistema. A manutenção dessas condições favorece a retenção da biomassa ativa no reator, aumentando sua eficiência depuradora.

O lodo excedente gerado nesses sistemas, quando removido, apresenta elevada densidade e alto grau de estabilização, resultado da longa permanência da biomassa ativa em condições anaeróbias dentro do reator. Essa característica reduz a necessidade de etapas subsequentes de digestão do lodo, o que contribui para a simplicidade e viabilidade do processo. Figura 8 representa o esquema de um reator tipo *UASB*.

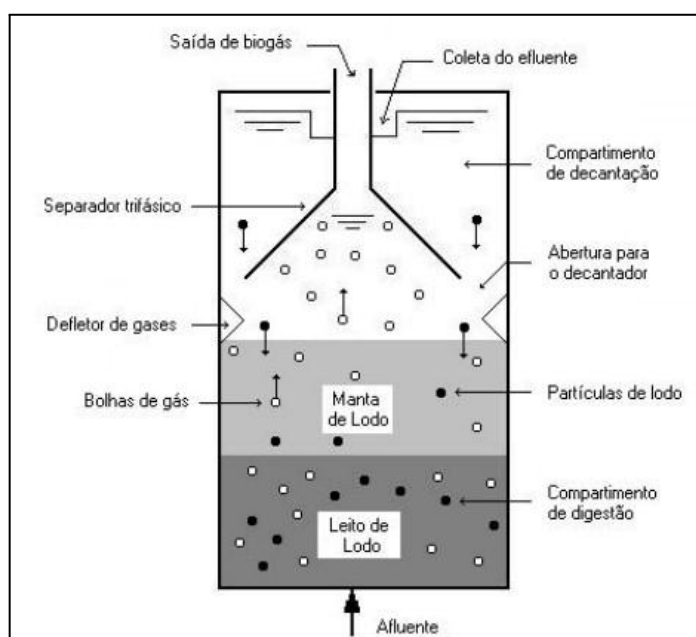


Figura 8- Desenho esquemático de um reator UASB
Fonte: Chernicharo (1997)

A boa operação e o desempenho dos reatores anaeróbios do tipo *UASB* dependem diretamente da gestão adequada dos subprodutos gerados, especialmente do lodo excedente. Segundo a Sanepar (2005), o lodo acumulado no reator deve ser removido periodicamente e conduzido a leitos de secagem. Após a desidratação, esse material pode ser destinado ao uso agrícola como adubo orgânico ou, alternativamente, descartado de forma segura em aterros sanitários licenciados.

Além do lodo, outro produto importante gerado durante o tratamento anaeróbio é o biogás, rico em metano. Conforme descrito no Manual de Operação da Sanepar (2005), os gases provenientes do separador trifásico são conduzidos para um gasômetro instalado na parte superior do reator. A partir dali o biogás pode ser queimado antes do lançamento à atmosfera, como medida de controle de emissões, ou ser captado para aproveitamento energético,

contribuindo para a autossuficiência energética da estação. A estrutura fechada do reator permite o acúmulo controlado do biogás, favorecendo seu uso como fonte renovável de energia.

2.2.4.2 Lagoas Anaeróbias

As lagoas de estabilização são consideradas uma das formas mais simples e economicamente viáveis de tratamento de águas residuárias. Podem ser classificadas em diferentes tipos, como lagoas facultativas, anaeróbias, aeradas facultativas, sistemas de mistura completa seguidos por lagoas de decantação e lagoas de maturação. Entre essas, as lagoas anaeróbias se destacam como unidades eficazes para a remoção de carga orgânica, especialmente em regiões de clima quente (von SPERLING, 2005).

Segundo Burbarelli (2004), essas lagoas operam sob condições estritamente anaeróbias, viabilizadas pela aplicação de elevadas cargas orgânicas (DBO) por unidade de volume. Isso resulta em uma taxa de consumo de oxigênio superior à sua taxa de produção, garantindo a manutenção das condições redutoras essenciais para o processo.

A estabilização da matéria orgânica ocorre por meio de consórcios microbianos que, na ausência de oxigênio molecular, degradam compostos complexos — como proteínas, carboidratos e lipídios — em produtos mais simples, principalmente metano e dióxido de carbono (BURBARELLI, 2004). De acordo com Campos *et al.* (1999), o processo envolve quatro etapas microbianas sequenciais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo cada etapa conduzida por grupos específicos de bactérias heterotróficas.

A eficiência das lagoas anaeróbias na remoção da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) varia entre 50% e 60%, sendo, portanto, recomendadas como unidades de tratamento preliminar ou em associação com outras etapas de polimento. Em contrapartida, a remoção de patógenos é limitada, o que requer o uso complementar de lagoas de maturação ou desinfecção final.

Von Sperling (2002) destaca que esse tipo de tecnologia é particularmente adequado às condições climáticas do Brasil, onde as temperaturas elevadas favorecem a atividade biológica dos microrganismos anaeróbios. Contudo, um dos principais desafios para sua implantação é a grande área necessária para construção, o que pode limitar sua aplicação em regiões densamente urbanizadas. Ainda assim, trata-se de uma solução amplamente utilizada no país devido à sua simplicidade operacional, robustez e baixo custo, conforme ilustrado na Figura 9.



Figura 9- Vista do sistema de lagoas da ETE-Brazlândia, com lagoas anaeróbias na porção inferior

Fonte: Caesb (2025)

Para esse tipo de tratamento, verifica-se que a CAESB adotou essa tecnologia de tratamento, verifica-se que das 15 unidades de tratamento de esgoto da CAESB, situadas no Distrito Federal, apenas a ETE-Brazlândia opera com essa tecnologia.

2.2.5 Tratamento terciário: polimento final químico e flotação por ar dissolvido nas ETEs do Distrito Federal

O tratamento terciário constitui uma etapa complementar ao tratamento biológico, destinada à remoção adicional de sólidos suspensos, matéria orgânica residual e nutrientes, especialmente o fósforo, com o objetivo de aprimorar a qualidade do efluente final e atender a padrões ambientais mais restritivos. Essa etapa assume particular relevância em sistemas que lançam efluentes em corpos hídricos sensíveis ou sujeitos a processos de eutrofização, nos quais a remoção avançada de fósforo e frações particuladas torna-se essencial (METCALF; EDDY, 2016).

Entre as tecnologias empregadas no tratamento terciário destaca-se a flotação por ar dissolvido (FAD), processo de separação sólido-líquido baseado na adesão de microbolhas de ar às partículas suspensas, promovendo sua ascensão à superfície e posterior remoção. A FAD apresenta vantagens em relação à sedimentação convencional, como maior rapidez de separação, melhor qualidade do efluente clarificado, menor área requerida e produção de lodo mais concentrado (PALANIANDY *et al.*, 2017). Sua eficiência é significativamente ampliada

quando associada às etapas de coagulação e floculação, responsáveis pela desestabilização coloidal e formação de flocos com maior afinidade pelas bolhas de ar.

Penetra (2003), ao investigar a aplicação da coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido como pós-tratamento físico-químico de efluentes provenientes de reator anaeróbio de leito expandido, demonstrou elevadas eficiências na remoção de turbidez, demanda química de oxigênio e fósforo total. O autor evidenciou que parâmetros como dosagem de cloreto férrico, pH de coagulação, tempo de floculação, fração de recirculação e quantidade de ar dissolvido exercem influência direta sobre o desempenho do sistema, destacando ainda que a associação entre sais férricos e polímeros sintéticos favorece a formação de flocos mais estáveis e melhora a remoção de fósforo, consolidando a FAD como alternativa robusta para o tratamento terciário de esgotos sanitários.

No contexto do Distrito Federal, a CAESB adota diferentes arranjos de tratamento terciário, combinando polimento químico e flotação por ar dissolvido ou precipitação química isolada, conforme as características de cada estação. As ETEs Alagado, Santa Maria e Samambaia, que possuem sistemas de lagoas, utilizam polimento final químico com cloreto férrico seguido de flotação por ar dissolvido, configurando um tratamento terciário voltado à remoção complementar de sólidos suspensos e fósforo após os processos biológicos e naturais.

A dissertação de Paula (2013), ao propor uma metodologia de avaliação do desempenho operacional de ETEs do DF, descreve a incorporação do polimento final químico associado à FAD em unidades da CAESB, ressaltando sua importância para a melhoria da qualidade do efluente tratado. Segundo o autor, essa etapa complementar é fundamental para reduzir a fração particulada remanescente e contribuir para o atendimento às exigências ambientais, sobretudo em relação aos sólidos suspensos e ao fósforo.

De forma mais específica, Beltrão (2023) avaliou a remoção de fósforo no efluente da ETE Brasília Norte por meio de precipitação química com cloreto férrico, evidenciando o papel decisivo do tratamento terciário na obtenção de concentrações reduzidas desse nutriente. O estudo demonstra que parcela significativa do fósforo residual encontra-se associada a partículas finas ou formas coloidais pouco removidas em processos biológicos convencionais, tornando necessária a aplicação de coagulantes para sua conversão em formas precipitáveis e posterior remoção física.

Além da associação entre polimento químico e FAD, algumas ETEs do DF adotam o tratamento terciário exclusivamente por precipitação química. Na ETE Gama, ocorre precipitação química ao final do tratamento, enquanto na ETE Riacho Fundo é aplicada

coagulação com sulfato de alumínio diretamente no efluente, caracterizando estratégias de polimento final voltadas principalmente à remoção de fósforo e sólidos residuais.

A aplicação da flotação por ar dissolvido em sistemas naturais de pós-tratamento também foi investigada por Ide *et al.* (2016), que avaliaram o uso da FAD precedida de coagulação com cloreto férrico para remoção de microalgas presentes em efluentes de lagoas de polimento. Os autores observaram eficiências de separação superiores a 96%, evidenciando o potencial da FAD como etapa terciária em sistemas baseados em lagoas, com significativa redução da biomassa algal e dos sólidos suspensos.

As ETEs Brasília Sul e Brasília Norte também dispõem de etapa de tratamento terciário (polimento final) em seus fluxogramas operacionais, integrando o conjunto de unidades do Distrito Federal que adotam processos complementares ao tratamento biológico visando ao aprimoramento da qualidade do efluente final.

De forma integrada, os estudos analisados demonstram que o tratamento terciário baseado em polimento químico, com ou sem flotação por ar dissolvido, representa uma solução técnica consolidada para o aprimoramento da qualidade dos efluentes tratados no Distrito Federal, especialmente no que se refere à remoção de fósforo, sólidos suspensos e matéria orgânica residual. A adoção dessas tecnologias nas ETEs da CAESB configura uma barreira adicional de proteção ambiental, contribuindo para a redução dos impactos sobre os corpos receptores e para o aumento da confiabilidade dos sistemas de tratamento de esgotos.

2.3 Importância das Variáveis de Qualidade: DBO, DQO, SST e PT

A caracterização da qualidade de esgotos sanitários e a ETEs fundamentam-se na análise de variáveis físico-químicas capazes de representar, de forma integrada, a carga orgânica, a fração particulada e os nutrientes potencialmente impactantes aos corpos hídricos receptores. Entre essas variáveis, destacam-se a DBO, DQO, os SST e o PT, amplamente reconhecidos na literatura técnica e científica como indicadores centrais da qualidade do esgoto bruto e do efluente tratado (MORETTI; IVAN; SKVARIL, 2024; AIB *et al.*, 2024). A escolha dessas variáveis não se justifica apenas por sua presença recorrente em regulamentações ambientais, mas também por sua capacidade de sintetizar os principais mecanismos de poluição associados à matéria orgânica e aos nutrientes, fornecendo base consistente para a avaliação da eficiência e da confiabilidade operacional dos sistemas de tratamento.

A DBO constitui um indicador clássico da fração biodegradável da matéria orgânica presente no esgoto. Seu significado ambiental está diretamente relacionado ao potencial de

consumo de oxigênio dissolvido nos corpos receptores, podendo provocar condições de hipóxia e comprometer a biota aquática quando lançada em concentrações elevadas. A literatura ressalta que a DBO representa a carga orgânica passível de degradação biológica, sendo parâmetro essencial para dimensionamento, controle e avaliação da eficiência de processos biológicos (von SPERLING, 2005; METCALF; EDDY, 2014). Em revisão recente, Moretti, Ivan e Skvaril (2024) destacam que a DBO permanece como parâmetro obrigatório em diversas regulamentações internacionais, consolidando-se como importante medida de desempenho do tratamento secundário. Estudos analisados indicam ainda que a DBO tende a apresentar comportamento relativamente estável quando o processo biológico encontra-se adequadamente ajustado, reforçando sua relevância como indicador de eficiência operacional (AIB *et al.*, 2024).

A DQO, por sua vez, representa a carga orgânica total oxidável presente no esgoto, incluindo tanto frações biodegradáveis quanto não biodegradáveis. Sua importância ambiental decorre da capacidade de quantificar o conjunto de substâncias orgânicas presentes no esgoto, oferecendo uma visão mais abrangente da poluição orgânica (von SPERLING, 2005; METCALF; EDDY, 2014). Quando analisada em conjunto com a DBO, permite inferir o grau de biodegradabilidade da carga afluente, aspecto relevante para a compreensão do comportamento dos sistemas biológicos. Moretti, Ivan e Skvaril (2024) ressaltam que a DQO permanece amplamente utilizada para monitoramento e controle operacional, especialmente em razão da maior rapidez de sua determinação analítica. Evidências indicam ainda que a DQO pode apresentar menor variabilidade relativa quando comparada à DBO, favorecendo sua utilização em análises estatísticas de desempenho (AGHDAM *et al.*, 2023). Dessa forma, a análise conjunta de DBO e DQO permite avaliar de maneira integrada a carga orgânica biodegradável e total, contribuindo para interpretações mais robustas da eficiência dos sistemas de tratamento.

Os SST representam a fração particulada do esgoto, composta por material orgânico e inorgânico passível de retenção por processos físicos, como sedimentação ou filtração. Do ponto de vista ambiental, concentrações elevadas de SST podem comprometer a transparência da água, favorecer a deposição de material no leito dos corpos receptores e atuar como meio de transporte para matéria orgânica e nutrientes adsorvidos. Sob a perspectiva operacional, os SST estão diretamente relacionados ao desempenho das unidades de decantação e à eficiência global dos sistemas biológicos, uma vez que parcela significativa da matéria orgânica encontra-se associada à fração sólida (METCALF; EDDY, 2014). Estudos demonstram ainda a existência de correlação entre SST e parâmetros de carga orgânica, indicando que variações na fração particulada podem influenciar diretamente os valores de DBO e DQO (AGHDAM *et al.*, 2023).

Assim, a análise dos SST contribui para compreender a interação entre processos físicos e biológicos e para interpretar oscilações na eficiência de remoção, especialmente em contextos de variabilidade nas características do esgoto afluente.

O PT assume papel estratégico na avaliação ambiental de efluentes sanitários por estar diretamente associado aos processos de eutrofização em ambientes aquáticos. Enquanto a matéria orgânica afeta predominantemente o balanço de oxigênio dissolvido nos corpos receptores, o fósforo atua como nutriente limitante em muitos ecossistemas, podendo desencadear a proliferação excessiva de algas mesmo em concentrações relativamente baixas. Moretti, Ivan e Skvaril (2024) destacam que o fósforo integra o conjunto de parâmetros mandatórios em regulamentações internacionais, refletindo sua relevância na proteção de corpos hídricos sensíveis. Quevedo (2015) demonstra que o fósforo encontra-se distribuído entre frações orgânicas e inorgânicas, parte das quais associada à matéria particulada, o que reforça a necessidade de sua análise integrada com os sólidos suspensos. Estudos empíricos indicam ainda que a remoção de fósforo tende a apresentar maior variabilidade quando comparada à remoção de matéria orgânica. Aib *et al.* (2024) observaram amplitudes consideráveis nas eficiências de remoção de fósforo total entre ETEs avaliadas, enquanto os parâmetros DBO e DQO apresentaram comportamento mais consistente.

Sob a perspectiva metodológica, a inclusão do PT amplia a avaliação para além da dimensão orgânica, incorporando a análise da carga de nutrientes e de seu potencial impacto ecológico. Enquanto DBO e DQO refletem predominantemente o desempenho do tratamento biológico secundário, o fósforo permite avaliar a eficácia de etapas complementares de tratamento e o grau de controle sobre processos específicos de remoção de nutrientes. Dessa forma, a análise conjunta de DBO, DQO, SST e PT permite abranger as principais dimensões da poluição associada aos esgotos sanitários: carga orgânica biodegradável, carga orgânica total, fração particulada e nutriente limitante dos processos de eutrofização.

A literatura analisada demonstra que esses parâmetros são amplamente empregados em avaliações internacionais de desempenho e conformidade (AIB *et al.*, 2024; MORETTI; IVAN; SKVARIL, 2024), constituindo indicadores consolidados da eficiência dos sistemas de tratamento. Além disso, evidências apontam que matéria orgânica e sólidos tendem a apresentar comportamento mais estável quando comparados aos nutrientes (AGHDAM *et al.*, 2023), aspecto relevante para análises de variabilidade e confiabilidade operacional. A integração dessas variáveis permite compreender o desempenho do tratamento sob múltiplas perspectivas — orgânica, física e nutricional — fornecendo base consistente para análises estatísticas que

considerem não apenas médias de remoção, mas também padrões de estabilidade e consistência ao longo do tempo.

Dessa forma, a seleção das variáveis DBO, DQO, SST e PT revela-se tecnicamente fundamentada e coerente com a literatura científica contemporânea. Essas variáveis sintetizam os principais impactos ambientais associados ao lançamento de efluentes sanitários e oferecem suporte analítico para avaliações de eficiência e confiabilidade das ETEs justificando sua escolha como variáveis centrais de análise.

2.4 Desempenho, confiabilidade e concentrações afluentes do esgoto em estações de tratamento de esgoto

A análise de desempenho de sistemas de tratamento de esgoto tem sido historicamente baseada na eficiência de remoção de poluentes e na comparação dos valores de concentrações efluentes com padrões estabelecidos em legislações ambientais. Entretanto, a simples avaliação de eficiências médias de remoção pode ocultar aspectos operacionais importantes, como a variabilidade dos dados e a frequência com que os sistemas conseguem, de fato, atender aos limites normativos Niku *et al.* (1979).

Nesse contexto, diversos autores propuseram abordagens estatísticas para qualificar o desempenho das ETEs. Os estudos pioneiros de Dean & Forsythe (1976a, 1976b), Berthouex e Hunter (1981, 1983) demonstraram que dados de concentração de efluentes tendem a seguir distribuição lognormal, o que exige análises mais sofisticadas que as descrições por médias aritméticas.

O trabalho seminal de Niku *et al.* (1979) desenvolveu um modelo probabilístico para estimar a confiabilidade de sistemas de tratamento, definido como a probabilidade de que uma ETE atenda a um dado padrão de lançamento em um determinado período. A partir desse modelo, é possível calcular o Coeficiente de Confiabilidade (CDC), que relaciona a concentração efluente admissível ao desempenho real da unidade, considerando variabilidade dos dados e nível de risco assumido. Essa abordagem tem sido explorada em diversas pesquisas.

Oliveira (2006), em sua tese de doutorado, aplicou a metodologia de Niku a um conjunto representativo de ETEs brasileiras, evidenciando a inadequação de análises baseadas exclusivamente em médias de eficiência. A autora demonstrou que estações com desempenhos médios aceitáveis muitas vezes apresentavam baixa confiabilidade, isto é, não mantinham o desempenho ao longo do tempo. De forma semelhante, Reges (2009) estudou ETEs da Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará, cujos resultados revelaram o mesmo padrão de

variabilidade, sugerindo que a confiabilidade estatística deveria ser incorporada à avaliação de sistemas em órgãos de controle.

Complementando essas abordagens, o trabalho de Silva *et al.* (2022) aplicou a metodologia de Niku a ETEs com reatores *UASB*, identificando que, mesmo com eficiências médias próximas aos padrões legais, os sistemas apresentavam baixos índices de confiabilidade, evidenciando sobrecargas orgânicas e hidráulicas. Em outro estudo, os mesmos autores exploraram a relação entre parâmetros operacionais, cargas afluentes e consistência de atendimento à legislação ambiental, destacando que a confiabilidade deve ser considerada uma ferramenta complementar para diagnóstico e gestão.

Além da confiabilidade, a eficiência de remoção de poluentes é amplamente abordada na literatura. Os estudos de Oliveira (2006) e Silva *et al.* (2022) indicam que as ETEs brasileiras, em geral, apresentam boa eficiência para DBO e SST, mas dificuldades persistentes na remoção de nutrientes, como o Fósforo Total. Essa dificuldade está relacionada à ausência de sistemas biológicos ou químicos voltados à remoção específica desse parâmetro.

O desempenho das ETEs também pode variar em função do tipo de tecnologia adotada. Sistemas baseados em lodos ativados, lagoas de estabilização, reatores anaeróbios e combinações híbridas são recorrentes no Brasil. Silva *et al.* (2021) demonstraram que sistemas com lagoas apresentam maior variabilidade de desempenho, principalmente em condições de carga elevada e baixa temperatura. Por outro lado, reatores *UASB*, mesmo com boa estabilidade térmica, apresentam limitações na remoção de nutrientes, exigindo pós-tratamentos.

Outro ponto relevante refere-se à caracterização estatística das concentrações afluentes. A literatura técnica (METCALF; EDDY, 2014; von SPERLING, 2005) apresenta faixas típicas de concentração para DBO, DQO e SST em esgotos domésticos. Contudo, diversos estudos mostram que as ETEs brasileiras frequentemente recebem concentrações superiores a essas faixas, o que compromete o atendimento aos padrões de lançamento. A diferença entre as condições reais e os parâmetros de projeto tem impactos significativos sobre o desempenho operacional e, consequentemente, sobre a confiabilidade.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 Levantamento e seleção de dados

O presente estudo baseou-se na análise de dados secundários fornecidos pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), abrangendo o período de agosto de 2017 a maio de 2023. A base de dados contempla resultados analíticos provenientes do monitoramento operacional das ETEs do Distrito Federal, incluindo 15 unidades em operação no período analisado. As variáveis consideradas no estudo foram Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos Totais (SST) e Fósforo Total (PT), avaliadas tanto nas concentrações afluentes quanto efluentes dos sistemas de tratamento.

Os dados utilizados correspondem a resultados laboratoriais consolidados pela própria Companhia, provenientes das rotinas de monitoramento e controle operacional das ETEs. Cada registro representa a média mensal das análises realizadas para cada variável em cada estação de tratamento. Ao todo, foram analisados 5.588 registros mensais, correspondentes ao conjunto das análises disponíveis para as quatro variáveis investigadas nas 15 ETEs consideradas no estudo.

A adoção da escala temporal mensal permite uma visão integrada do desempenho dos sistemas ao longo do tempo, favorecendo a identificação de tendências operacionais e padrões de comportamento. Ressalta-se, contudo, que dados em escala diária tendem a apresentar maior variabilidade, refletindo eventos operacionais pontuais, como variações abruptas de carga afluente, intervenções de manutenção e eventos pluviométricos intensos. Conforme destacado por Metcalf e Eddy (2016), sistemas de tratamento de esgotos estão sujeitos a flutuações operacionais significativas em curtos intervalos de tempo, as quais podem ser parcialmente suavizadas quando analisadas por meio de dados agregados. Dessa forma, a utilização de médias mensais pode atenuar extremos e reduzir a visibilidade de picos operacionais, devendo essa característica ser considerada na interpretação dos resultados.

A obtenção dessas informações foi realizada mediante solicitação formal à CAESB, assegurando o caráter institucional, a confiabilidade e a rastreabilidade dos dados utilizados. Os dados foram disponibilizados em junho de 2023 por meio do sistema GDOC CAESB (Sistema Informatizado de Gestão Arquivística de Documentos), após o preenchimento dos formulários institucionais e a assinatura do Termo de Responsabilidade para uso de dados operacionais, conforme previsto na Norma Regulamentadora Interna NR 17/2023 da Companhia. O período

analisado corresponde ao intervalo temporal disponibilizado pela empresa no momento da solicitação dos dados, abrangendo as séries históricas disponíveis entre agosto de 2017 e maio de 2023.

Após a obtenção, os dados foram organizados em planilhas eletrônicas, estruturadas por ETE para viabilizar o tratamento estatístico e a comparação entre as unidades. Cada planilha contém as concentrações afluentes e efluentes das variáveis analisadas, bem como os respectivos cálculos de eficiência de remoção. A Tabela 2 apresenta o quantitativo de dados secundários analisados.

Tabela 2- Quantidade de dados secundários utilizados na análise de desempenho de ETEs do Distrito Federal, segundo variáveis de Unidade de Tratamento.

Unidade de Tratamento	DBO afluente	DBO efluente	DQO afluente	DQO efluente	Fósforo afluente	Fósforo efluente	SST afluente	SST efluente	Total por ETE
ETE Alagado	70	70	70	70	70	70	–	–	420
ETE Brasília Norte	70	69	70	70	70	70	–	–	419
ETE Brasília Sul	68	68	70	70	70	70	–	–	416
ETE Brazlândia	29	29	56	56	–	–	56	56	282
ETE Gama	56	54	56	56	68	68	–	–	358
ETE Melchior	56	56	56	56	–	–	56	56	336
ETE Paranoá	70	30	70	70	–	–	70	70	380
ETE Planaltina	70	29	70	70	–	–	70	70	379
ETE Recanto das Emas	70	29	70	70	–	–	70	70	379
ETE Riacho Fundo	69	70	70	70	70	70	–	–	419
ETE Samambaia	50	30	55	55	67	67	–	–	324
ETE Santa Maria	70	29	70	29	70	29	–	–	297
ETE São Sebastião	70	29	70	70	–	–	70	70	379
ETE Sobradinho	69	70	70	70	–	–	70	70	419
ETE Vale do Amanhecer	70	31	70	70	–	–	70	70	381
Total de dados secundários									5588

Fonte: Autor

Essa organização possibilitou a construção de séries temporais contínuas para cada estação e variável analisada, permitindo a realização das diferentes etapas analíticas propostas no estudo. O conjunto de dados serviu de base para três frentes de análise complementares: (i) a avaliação da eficiência de remoção das variáveis estudadas, considerando o comportamento dos sistemas em diferentes períodos sazonais; (ii) a estimativa da confiabilidade estatística do desempenho das ETEs, com base na metodologia proposta por Niku *et al.* (1979); e (iii) a análise das concentrações afluentes às estações de tratamento, com posterior representação gráfica por meio de *heatmaps*.

3.2 Tratamento estatístico dos dados

A etapa de tratamento estatístico dos dados consistiu em um processo metodológico estruturado para dar suporte às análises de desempenho das ETEs, com base em indicadores quantitativos. Visando assegurar a consistência técnica e a validade inferencial dos resultados, foram aplicadas técnicas de estatística descritiva e inferencial adaptadas aos objetivos do estudo. Essa abordagem permitiu a mensuração da variabilidade dos dados, a detecção de padrões sazonais e a estimativa da confiabilidade dos sistemas frente aos parâmetros legais de lançamento, respeitando a natureza dos dados operacionais e suas limitações.

Antes da aplicação das metodologias analíticas, os dados passaram por um processo de análise descritiva. Foram calculadas medidas de tendência central (média e mediana) e de dispersão (desvio-padrão e coeficiente de variação). Essa etapa foi fundamental para compreender a amplitude das variações operacionais de cada estação e subsidiar tanto os cálculos de eficiência quanto a aplicação dos modelos probabilísticos de confiabilidade propostos.

Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas no software Microsoft Excel®, ambiente no qual foram aplicadas fórmulas automatizadas para cálculo de média, desvio-padrão, mediana, tamanho da amostra, valores extremos e Coeficiente de Variação (CV), tanto para os dados afluentes quanto efluentes de cada ETE. Esses indicadores forneceram a base para as análises subsequentes, preservando a integridade e a estrutura original dos dados recebidos.

Para avaliar a adequação dos dados a distribuições estatísticas, foram aplicados testes de normalidade (*Shapiro–Wilk*, *Kolmogorov–Smirnov* e Qui-Quadrado) no ambiente Google Colab®, utilizando bibliotecas estatísticas da linguagem Python (Google LLC, EUA). A

verificação de que os dados apresentaram comportamento compatível com uma distribuição lognormal constituiu etapa fundamental para a aplicação da análise de confiabilidade empregada no estudo.

A análise sazonal do desempenho das ETEs foi conduzida a partir da separação dos dados em dois grupos: período seco (maio a setembro) e período chuvoso (outubro a abril), com base nos padrões climáticos definidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a região do Distrito Federal (INMET, 2022). Essa divisão permitiu a comparação do comportamento operacional das unidades sob diferentes regimes hidrológicos, sendo a distribuição dos resultados representada graficamente por meio de gráficos do tipo *boxplot*.

Para garantir a fidedignidade das análises, não foram realizados procedimentos de interpolação, substituição ou exclusão de valores extremos. Os registros foram mantidos em sua forma original, assumindo que eventuais variações refletem as condições reais de operação das unidades de tratamento.

Com essa abordagem integrada, o tratamento estatístico adotado conferiu robustez às etapas analíticas subsequentes e assegurou a consistência dos resultados apresentados neste estudo.

3.3 Separação Sazonal e Cálculo das Eficiências por Períodos (chuva e seca)

A fim de avaliar o impacto da sazonalidade sobre o desempenho das 15 ETEs do Distrito Federal, os dados foram organizados de acordo com dois períodos climáticos distintos: o período seco, compreendido entre os meses de maio a setembro, e o período chuvoso, entre outubro e abril. Essa divisão seguiu a climatologia oficial da região Centro-Oeste do Brasil, conforme definida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022), e visa refletir de forma representativa as variações hidrológicas que afetam a operação dos sistemas de tratamento.

Para o cálculo da eficiência de remoção, foi empregada a fórmula:

$$\text{Eficiência} = \left(\frac{C_{\text{afluente}} - C_{\text{efluente}}}{C_{\text{afluente}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

em que:

C_{afluente} e C_{efluente} representam, respectivamente, as concentrações médias mensais da variável afluente e efluente.

A aplicação da fórmula foi realizada no Microsoft Excel®, com uso das funções nativas da plataforma, o que permitiu o processamento automatizado de centenas de dados por estação. Cada ETE teve sua própria planilha de cálculo, estruturada com colunas distintas para os dados afluentes, efluentes e para a eficiência de remoção da variável considerada.

Para fins de visualização comparativa, foram elaborados gráficos do tipo *boxplot*, construídos em ambiente Google Colab®. Os *boxplots* foram agrupados por parâmetro, apresentando lado a lado os valores de eficiência dos períodos seco e chuvoso. Para facilitar a interpretação, os gráficos destacaram o período chuvoso com uma leve tonalidade azul clara e utilizaram uma linha tracejada para separação visual entre os períodos, o que possibilitou maior intuitividade na identificação de tendências, variações e *outliers*.

O uso de *boxplots* se mostrou particularmente eficaz na representação gráfica da eficiência, pois possibilita a visualização simultânea da mediana, dispersão, limites interquartis e presença de valores discrepantes. Conforme destacado na literatura, essa técnica tem sido amplamente utilizada em estudos de desempenho de ETEs por sua capacidade de sintetizar e comparar grandes volumes de dados em diferentes condições operacionais e ambientais (SOUSA *et al.*, 2021).

De forma complementar, aplicou-se o teste estatístico não paramétrico de *Kolmogorov-Smirnov* (K-S), com a finalidade de comparar as distribuições das séries de dados correspondentes aos períodos seco e chuvoso e verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre elas, de modo a corroborar os resultados observados nos *boxplots*. Para essa etapa, os dados previamente organizados em planilhas eletrônicas no Microsoft Excel® foram processados em ambiente Python, por meio da plataforma Google Colab®, o que permitiu a execução automatizada do teste para as variáveis analisadas.

3.4 Diagnóstico das Concentrações Afluentes

A análise das concentrações afluentes nas ETEs constitui uma etapa metodológica fundamental no diagnóstico da performance dos sistemas de tratamento, pois permite identificar potenciais desequilíbrios entre o que foi projetado para tratar e o que de fato é recebido pelas unidades. A ocorrência de concentrações significativamente superiores às faixas típicas pode comprometer tanto a eficiência de remoção dos poluentes quanto a confiabilidade do sistema em atender continuamente aos padrões normativos de qualidade do efluente. De acordo com von Sperling (2005), concentrações afluentes elevadas de DBO, DQO, SST e Fósforo Total podem gerar sobrecargas orgânicas e hidráulicas, reduzindo o tempo de detenção e

sobrecarregando os processos biológicos e físicos de tratamento, com impacto direto sobre a qualidade final do efluente e a estabilidade operacional da estação.

As concentrações afluentes foram tratadas como um componente diagnóstico essencial para avaliar a coerência entre os parâmetros de projeto das ETEs e as condições reais de operação observadas ao longo dos anos. Essa análise permitiu verificar se as cargas de entrada se mantêm dentro das faixas típicas descritas na literatura técnica e se a variabilidade entre as estações reflete diferenças estruturais, tecnológicas ou sazonais. A comparação entre os valores medidos e as faixas de referência, como as propostas por von Sperling (2005), possibilitou identificar unidades que recebem esgoto com concentrações mais elevadas, sugerindo a necessidade de reavaliação da capacidade de projeto ou de estratégias de equalização de carga.

As informações foram sistematizadas em planilhas eletrônicas, contendo valores médios mensais de concentração afluente para DBO, DQO, SST e PT, sem detalhamento sobre o número de amostras consideradas por mês. Essa base de dados, devidamente validada e padronizada, permitiu a aplicação de análises estatísticas e comparativas, integrando os resultados às demais vertentes deste estudo — eficiência de remoção e confiabilidade estatística — com o objetivo de construir um diagnóstico operacional abrangente e consistente das 15 ETEs avaliadas.

O diagnóstico metodológico consistiu em duas abordagens complementares. A primeira envolveu a comparação dos dados afluentes com as faixas de concentração usuais de esgoto doméstico descritas por von Sperling (2005), a saber: DBO (200–500 mg/L), DQO (400–800 mg/L), SST (200–450 mg/L) e PT (4–15 mg/L). A segunda abordagem foi a comparação com as concentrações típicas pontuais propostas pelo mesmo autor: DBO (350 mg/L), DQO (700 mg/L), SST (400 mg/L) e PT (7 mg/L).

Para cada ETE e para cada parâmetro analisado, foram definidas faixas observadas de concentração afluente por meio da aplicação de percentis estatísticos, delimitando os limites inferiores e superiores dos dados disponíveis. Essa abordagem interpercentil permitiu obter intervalos realistas de variação, refletindo de maneira mais precisa as condições operacionais efetivas observadas.

Além disso, avaliou-se a frequência com que os valores mensais de concentração ultrapassaram os limites típicos descritos na literatura, tomando como referência os valores indicados por von Sperling (2005). Essa quantificação percentual dos casos de excedência possibilitou verificar de forma objetiva o grau de afastamento dos dados reais em relação aos parâmetros usualmente considerados no dimensionamento de sistemas de tratamento de esgotos.

Esse procedimento metodológico reforçou a robustez do diagnóstico, permitindo identificar padrões de sobrecarga ou desvios persistentes nas concentrações afluentes e fornecendo subsídios essenciais para interpretar, em etapas posteriores, tanto a eficiência de remoção quanto a confiabilidade operacional das ETEs analisadas.

Os resultados foram organizados em tabelas de calor (*heatmaps*) desenvolvidas em Excel®, permitindo visualização rápida da intensidade e frequência com que os valores mensais de concentração afluente ultrapassaram os níveis esperados. As tabelas utilizam escalas cromáticas em tons de vermelho para indicar maior excedência e tons de verde para valores compatíveis com o padrão típico. Essa ferramenta visual foi especialmente útil para detectar padrões sistemáticos de sobrecarga afluente ao longo dos anos e entre diferentes ETEs.

Ressalta-se que concentrações afluentes dentro dos intervalos de normalidade são essenciais para o bom desempenho das ETEs. Segundo Libânio (2010), o funcionamento eficiente dos processos biológicos depende fortemente da compatibilidade entre carga orgânica afluente e capacidade instalada de tratamento, e desvios significativos entre projeto e operação real podem gerar falhas recorrentes e instabilidade nos sistemas. Assim, a caracterização das concentrações afluentes se constitui em base indispensável para análises de eficiência e de confiabilidade, complementando de forma estratégica o diagnóstico técnico-operacional do conjunto de estações avaliadas.

3.5 Análise de Confiabilidade pelo Método de Niku *et al.* (1979)

A análise de confiabilidade adotada neste estudo baseou-se na metodologia desenvolvida por Niku *et al.* (1979), amplamente reconhecida por sua aplicabilidade na avaliação do desempenho de ETEs quanto à manutenção dos padrões de qualidade dos efluentes tratados. Tal abordagem fornece uma estimativa probabilística da capacidade de uma ETE atender, de forma consistente, aos limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente, incorporando a variabilidade natural dos dados operacionais.

De posse dos 5.588 registros secundários fornecidos pela CAESB, foram avaliadas as seguintes variáveis de controle: DBO, DQO, SST e PT, este último incluído para as ETEs projetadas para remoção de nutrientes, a fim de possibilitar o cálculo da confiabilidade.

A aplicação da metodologia seguiu o roteiro proposto originalmente por Niku *et al.* (1979), descrito de forma esquemática na Figura 10, a qual ilustra as etapas sequenciais do cálculo do Coeficiente de Confiabilidade (CDC) e da concentração ajustada ao risco. O fluxograma detalha o processo a partir da série temporal da variável de interesse, passando pelos

cálculos do desvio padrão, média, Coeficiente de Variação (CV), valor crítico da distribuição normal ($Z_{1-\alpha}$), até a obtenção do CDC e da concentração projetada.

Inicialmente, determinaram-se a média aritmética e o desvio padrão da série temporal da variável X, possibilitando o cálculo do coeficiente de variação, conforme apresentado na

Equação 2:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

Onde:

CV – Coeficiente de variação;

σ – Desvio padrão;

μ – Média aritmética.

Em seguida, procedeu-se ao cálculo do Coeficiente de Confiabilidade (CDC), conforme apresentado na Equação (3):

$$CDC = (C_V^2 + 1)^{1/2} \times e^{\{-Z_{1-\alpha} \times [\ln(C_V^2 + 1)]^{1/2}\}} \quad (3)$$

Onde:

CDC – Coeficiente de confiabilidade;

CV – Coeficiente de variação;

$Z_{1-\alpha}$ – Valor padronizado da distribuição normal.

Para este estudo adotou-se nível de confiabilidade de 95% considerando abordagem unilateral, correspondente ao valor crítico $Z_{1-\alpha} = 1,645$.

Por fim, calculou-se o valor de projeto (valor médio ajustado ao risco), conforme a Equação (4):

$$M_X = CDC \times X_S \quad (4)$$

Onde:

Mx – Valor da concentração de projeto ou média;

CDC – Coeficiente de Confiabilidade;

Xs – Valor da concentração padrão ou meta.

Adicionalmente, avaliou-se a distribuição estatística dos dados, considerando a premissa de que variáveis operacionais relacionadas ao desempenho de ETEs tendem a apresentar comportamento lognormal.

Cada variável do efluente das 15 ETEs operadas pela CAESB foi submetida, individualmente, à sequência de cálculos apresentada nas Equações (3) e (4), conforme ilustrado no fluxograma da Figura 10.

Para fins de apoio à interpretação comparativa dos resultados, adotou-se neste estudo uma classificação interna dos coeficientes de confiabilidade (CDC), sem pretensão de estabelecer faixas universais na literatura. Assim, valores de $CDC \geq 0,7$ foram interpretados como indicativos de maior confiabilidade relativa, valores entre 0,5 e 0,7 como confiabilidade intermediária, e valores inferiores a 0,5 como indicativos de menor confiabilidade relativa. Essa categorização foi utilizada apenas como recurso analítico para facilitar a comparação entre unidades e subsidiar a identificação de sistemas com maior variabilidade operacional. Ressalta-se, contudo, que a interpretação do CDC deve ser realizada em conjunto com os valores médios do efluente, o coeficiente de variação e os limites de referência adotados, uma vez que coeficientes semelhantes podem estar associados a contextos operacionais distintos.

Ao incorporar a variabilidade estatística e o risco de não conformidade, a metodologia permitiu um diagnóstico mais realista do desempenho das ETEs do Distrito Federal, complementando as análises de eficiência média de remoção de poluentes e contribuindo para uma gestão mais estratégica dos sistemas de esgotamento sanitário.

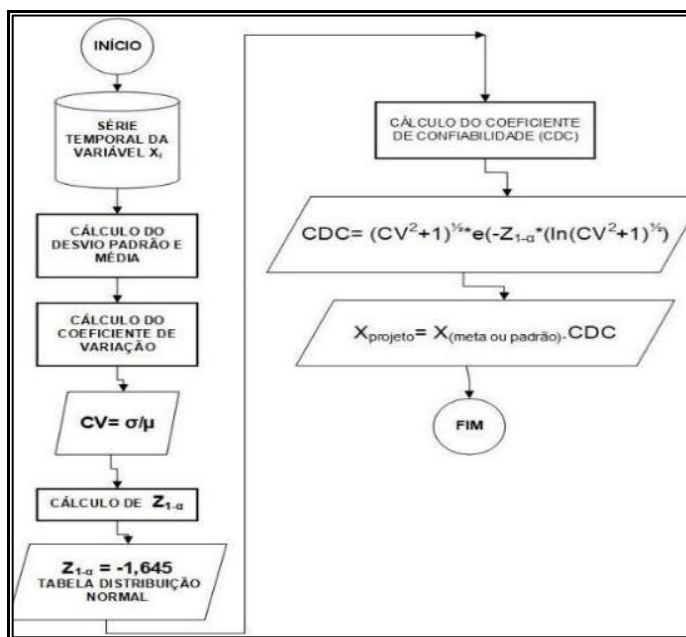


Figura 10– Fluxograma da metodologia de cálculo do Coeficiente de Confiabilidade (CDC) segundo Niku et al (1979)

Fonte: Carneiro *et al* (2025)

3.6 Critérios legais adotados para fins comparativos

A avaliação da conformidade legal dos efluentes tratados nas ETEs requer a adoção de parâmetros de referência estabelecidos por normativas ambientais vigentes. No contexto desta dissertação, foi utilizado como marco regulatório principal a Resolução CONAMA nº 430/2011, que dispõe sobre as condições, parâmetros, padrões e diretrizes para o lançamento de efluentes em corpos receptores (BRASIL, 2011). Especificamente, o Artigo 21, inciso III dessa resolução estabelece um limite de 120 mg/L para a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em lançamentos diretos de esgoto tratado em estações de tratamento de esgoto sanitários em corpos hídricos, o que confere respaldo técnico e normativo para a análise da conformidade das unidades estudadas em relação a esse parâmetro.

Entretanto, a referida norma federal não estabelece limites quantitativos específicos para outras variáveis relevantes, como DQO, SST e PT, os quais são amplamente utilizados como indicadores de eficiência de tratamento e qualidade do efluente. Em virtude dessa lacuna, recorreu-se, neste estudo, à adoção de normativas estaduais como critérios legais complementares, exclusivamente para fins comparativos e didáticos.

Os instrumentos normativos selecionados foram:

Para DQO, foi adotado o valor de referência de 200 mg/L, conforme estabelecido pela Resolução CEMA nº 70/2009 do estado do Paraná, que regulamenta padrões de lançamento de efluentes líquidos industriais e sanitários.

Para SST, utilizou-se o limite de 100 mg/L, com base na Resolução CONSEMA nº 355/2017 do estado do Rio Grande do Sul, que fixa padrões de emissão para efluentes líquidos.

Para PT, foi considerado o valor de 1,0 mg/L, fundamentado na Resolução COEMA nº 02/2017 do estado do Ceará. Cabe destacar que essa resolução trata de compostos organofosforados devido à sua toxicidade, sendo o valor adotado nesta pesquisa extraído de diretrizes complementares constantes no Relatório Final do Grupo de Monitoramento de Fósforo da Resolução CONAMA nº 357/2005.

A seleção dessas normas estaduais foi orientada pela necessidade de se estabelecerem referenciais numéricos consistentes para os parâmetros não contemplados pela legislação federal. Ainda que não se apliquem diretamente à realidade institucional do Distrito Federal, tais valores foram incorporados à análise como ferramentas auxiliares para o diagnóstico técnico-comparativo, permitindo identificar tendências de desempenho das unidades frente a diferentes padrões de exigência ambiental.

Os resultados da comparação entre os valores médios dos parâmetros DBO, DQO, SST e PT e os limites das normativas citadas encontram-se sintetizados na Tabela 6, a qual oferece uma visão panorâmica do grau de adequação das 15 ETEs do Distrito Federal frente aos critérios estabelecidos.

A utilização de diferentes marcos legais, ainda que de forma didática, enriquece a análise, uma vez que permite refletir sobre a heterogeneidade dos padrões normativos vigentes no país, bem como sobre a necessidade de uma padronização nacional mais abrangente, especialmente no que se refere ao controle de nutrientes e à proteção de corpos d'água em regiões com sensibilidade ambiental elevada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Concentrações afluentes de poluentes nas ETEs

A caracterização das concentrações afluentes de poluentes é uma etapa fundamental para o diagnóstico do desempenho de ETEs. A concentração que chega às unidades influencia diretamente na eficiência de remoção, no dimensionamento de processos e, sobretudo, na confiabilidade operacional dos sistemas. Valores afluentes significativamente superiores aos parâmetros de projeto ou às faixas esperadas na literatura técnica podem comprometer a eficiência, gerar sobrecargas hidráulicas ou orgânicas e reduzir a expectativa de atendimento contínuo aos padrões legais de lançamento (METCALF e EDDY, 2016).

A análise foi conduzida em duas frentes complementares: (i) verificação da faixa de variação das concentrações afluentes observadas em relação às faixas típicas da literatura (von SPERLING, 2005), com base nos percentis 10% e 90% de cada parâmetro; e (ii) quantificação do percentual de amostras que excederam os valores típicos de referência adotados como limites indicativos.

A Figura 11 apresenta o percentual de amostras que ultrapassaram os seguintes limiares: DBO > 350 mg/L, DQO > 700 mg/L, SST > 400 mg/L e PT > 7 mg/L. Os resultados demonstram que, em diversas unidades, a grande maioria das amostras apresenta concentrações acima desses valores, evidenciando afluentes mais concentrados que os usualmente esperados para esgotos domésticos típicos. Esse padrão foi particularmente evidente para os parâmetros DBO e DQO. Unidades como ETE-Brazlândia, ETE-Planaltina, ETE-Santa Maria e ETE-Paranoá apresentaram excedência superior a 95% para DBO, enquanto a ETE-Planaltina também se destacou com 100% das amostras acima para DQO. Em contrapartida, ETE-Gama, ETE-Sul e ETE-Norte registraram percentuais mais modestos, com menos da metade das amostras superando os valores típicos.

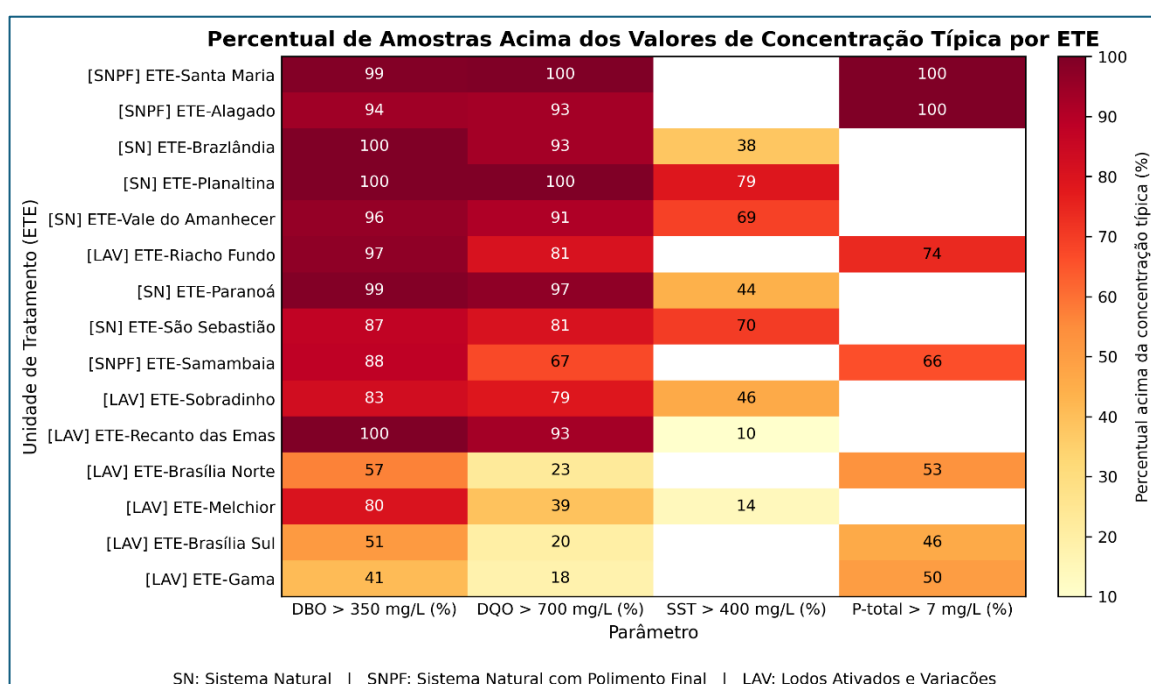


Figura 11– Percentual de amostras com concentrações afluentes acima dos valores típicos de referência para DBO, DQO, SST e fósforo total em afluentes de 15 ETEs do Distrito Federal.

Fonte: Elaboração própria.

Já em relação aos SST e ao PT, observa-se maior variabilidade entre as unidades. ETE-Santa Maria e ETE-Alagado, apresentaram 100% de amostras com fósforo acima de 7 mg/L, enquanto outras, como ETE-Planaltina e ETE-São Sebastião, evidenciaram níveis elevados de

SST, com excedências acima de 70%. Esses resultados indicam potenciais fontes de lançamento com altas concentrações de nutrientes ou sólidos, o que pode estar relacionado ao tipo de contribuição sanitária, ausência de interceptação de águas pluviais ou condições precárias de rede coletora.

A Figura 12 complementa a análise anterior ao apresentar as faixas interpercentis (10%-90%) observadas para cada parâmetro por ETE, comparando visualmente essas faixas com os intervalos típicos de referência estabelecidos na literatura: DBO entre 200 e 500 mg/L, DQO entre 400 e 800 mg/L, SST entre 200 e 450 mg/L e PT entre 4 e 15 mg/L (von SPERLING, 2005). Essa abordagem permite não apenas identificar a ocorrência de valores extremos, mas também avaliar a tendência geral dos dados.

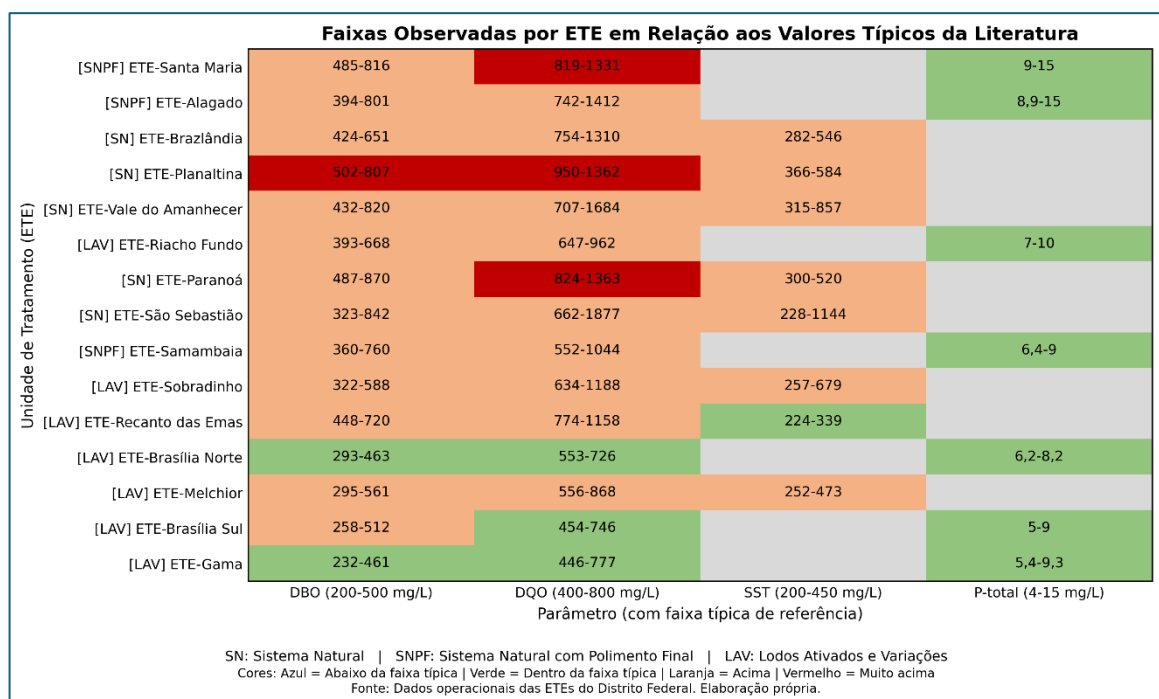


Figura 12– Faixas interpercentis (P10–P90) de concentrações afluentes por variáveis (DBO, DQO, SST e fósforo total) em 15 ETEs do Distrito Federal com destaque para a comparação com faixas típicas da literatura (von Sperling 2005)

Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que, para DBO, 13 das 15 ETEs apresentaram faixas com valores superiores à típica, evidenciando condições afluentes mais severas. Para DQO, o cenário é ainda mais crítico: onze ETEs ultrapassaram consideravelmente a faixa superior de 800 mg/L, com destaque para ETE-Paranoá, que alcançou valor de 1363 mg/L. O comportamento dos sólidos suspensos foi mais heterogêneo, embora algumas unidades, como ETE-Vale do Amanhecer, ETE-Sobradinho e ETE-São Sebastião tenham registrado faixas máximas superiores a 600 mg/L.

No caso do PT, todas as ETEs com dados disponíveis mantiveram-se dentro da faixa esperada de 4 a 15 mg/L, com exceção da ETE-Santa Maria e ETE-Alagado, que apresentaram valores máximos limítrofes (15 mg/L), mas ainda em conformidade com a literatura. Esse resultado é importante, pois reforça que, embora existam desafios para a remoção do fósforo no tratamento, a concentração afluenta ainda é compatível com padrões esperados, ao menos em parte das unidades.

Em síntese, os resultados revelam uma realidade operacional marcada por concentrações afluentes elevadas em boa parte das ETEs do Distrito Federal, especialmente no que diz respeito à matéria orgânica (DBO e DQO). Essa condição compromete não apenas a eficiência, mas também a confiabilidade dos sistemas, ao exigir maior resiliência das etapas de tratamento e maior robustez na operação. Tais achados indicam a necessidade de aprimorar as estratégias de gestão operacional dos sistemas de esgotamento sanitário, intensificar as ações de controle na rede coletora e adotar medidas que contribuam para a mitigação das variações observadas nas concentrações afluentes. Nesse contexto, destacam-se tanto o monitoramento de contribuições indevidas e de efluentes não domésticos quanto o desenvolvimento de ações de educação ambiental e sanitária voltadas ao uso adequado da rede de esgoto, de modo a reduzir pressões adicionais sobre as unidades de tratamento e contribuir para a proteção da qualidade dos recursos hídricos (FUNASA, 2015; ANA, 2017).

4.2 Eficiência de Remoção por Sazonalidade Climática

A avaliação da eficiência de remoção de poluentes constitui um dos principais indicadores de desempenho de ETEs, especialmente quando se busca compreender o comportamento dos sistemas frente a diferentes condições operacionais. Neste estudo, a análise foi conduzida com foco nos efeitos da sazonalidade climática, comparando-se os resultados obtidos nos períodos de seca (maio a setembro) e de chuvas (outubro a abril), conforme caracterização climática do Distrito Federal segundo o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2022).

As variáveis analisadas incluíram DBO, DQO, SST e PT, conforme a disponibilidade de dados para cada uma das 15 unidades estudadas. Para cada ETE, os dados médios mensais foram organizados e tratados estatisticamente, possibilitando o cálculo das eficiências de remoção por variável e por período sazonal.

Nos gráficos apresentados nesta seção, foram representadas as eficiências de remoção de DBO, DQO, SST e PT em cada uma das 15 ETEs avaliadas. A diferenciação cromática das

variáveis e a separação visual entre os períodos seco e chuvoso foram adotadas com o objetivo de facilitar a interpretação técnica e comparativa dos resultados. A mediana, por exemplo, constitui um indicador robusto do desempenho central das estações, ao passo que a amplitude interquartil revela a estabilidade ou variação do processo. A presença de *outliers*, por sua vez, aponta para episódios pontuais de falha operacional, sobrecarga hidráulica ou interferências externas, devendo ser analisada à luz das condições específicas de cada estação.

Além da capacidade de síntese visual proporcionada pelo *boxplot*, sua aplicação neste trabalho confere rigor metodológico à análise, permitindo a observação de padrões de comportamento que não seriam identificados apenas por médias aritméticas. Cabe destacar que as diferentes configurações tecnológicas das ETEs — como reatores anaeróbios de fluxo ascendente (*UASB*), lagoas facultativas, Reatores Batelada Sequencial (RBS) e lodos ativados com variações do processo *Phoredox* — implicam respostas distintas frente às oscilações climáticas. Assim, a apresentação individual dos resultados por unidade não só respeita as especificidades técnicas de cada sistema, como também contribui para uma avaliação mais precisa de sua resiliência e desempenho operacional ao longo do tempo.

A seguir, são apresentados os gráficos e respectivas análises para cada uma das quinze ETEs avaliadas, com ênfase nas diferenças de desempenho associadas à sazonalidade climática. Para cada unidade, são discutidos os padrões observados nos períodos seco e chuvoso, considerando a distribuição dos dados, a variabilidade das eficiências de remoção e a ocorrência de valores discrepantes. A análise busca evidenciar não apenas o comportamento médio das estações, mas também sua estabilidade operacional frente às oscilações hidrológicas. Adicionalmente, são exploradas possíveis relações entre o desempenho observado e as características tecnológicas de cada sistema de tratamento, permitindo uma interpretação mais aprofundada das respostas operacionais às condições sazonais. Essa abordagem contribui para a identificação de tendências, fragilidades e potencialidades específicas de cada ETE, subsidiando uma avaliação comparativa mais consistente entre as unidades estudadas.

4.2.1 ETE-Alagado

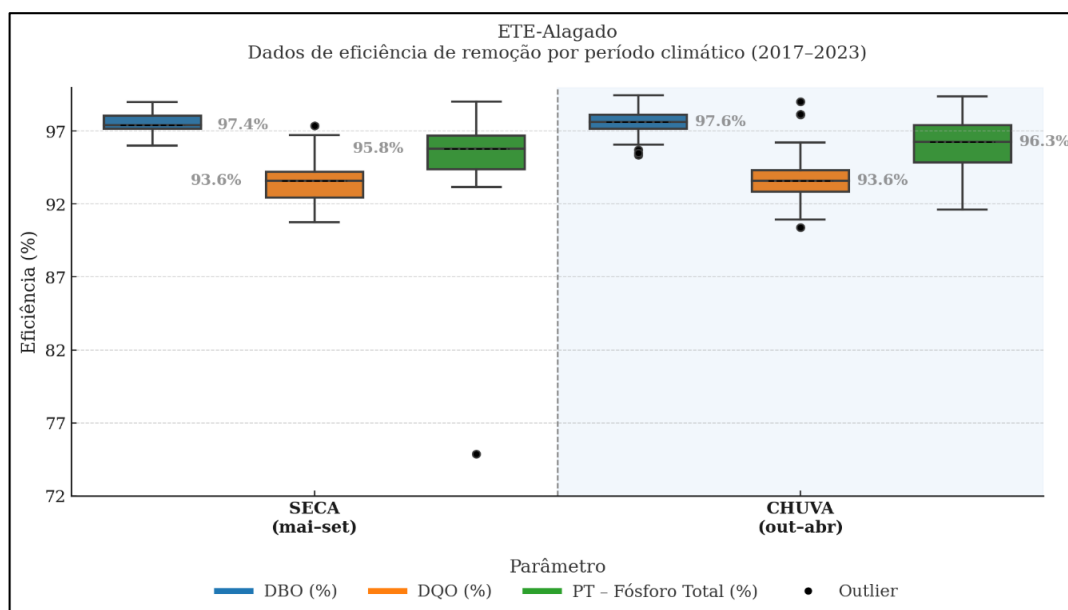


Figura 13- Eficiência de remoção de DBO, DQO e fósforo total na ETE-Alagado por período climático (2017-2023)

Fonte: Elaboração própria.

A ETE-Alagado apresentou desempenho satisfatório na remoção das três variáveis avaliadas (DBO, DQO e fósforo total) ao longo dos períodos climáticos analisados, mantendo índices elevados de eficiência tanto na estação seca quanto na chuvosa, conforme mostrado na Figura 13. Os resultados gráficos evidenciam valores medianos acima de 93% para todas as variáveis, demonstrando um funcionamento estável da unidade.

Durante o período seco (maio a setembro), a eficiência de remoção da DBO alcançou 97,4%, enquanto no período chuvoso (outubro a abril), o valor subiu discretamente para 97,6%, indicando uma variação positiva praticamente insignificante. O comportamento da DQO foi semelhante, com eficiência média de 93,6% na seca e manutenção exata do mesmo valor durante as chuvas (93,6%). Esse padrão sugere que a unidade é pouco sensível à variação de carga hidráulica entre os períodos, um indicativo de robustez do sistema.

Para o PT, os resultados também apontam elevado desempenho: 95,8% de eficiência na seca e 96,3% na estação chuvosa. A proximidade entre os valores de mediana e a pequena amplitude interquartil indica baixo grau de variabilidade nas remoções, o que contribui para a confiabilidade geral da unidade.

Do ponto de vista visual, o gráfico *boxplot* revela estabilidade no processo de tratamento, com poucas ocorrências de valores discrepantes (*outliers*), restritos à remoção de PT no período seco.

Os resultados obtidos apontam que a ETE-Alagado apresentou elevada eficiência de remoção e baixa variabilidade nas variáveis analisadas, mantendo desempenho consistente tanto no período seco quanto no chuvoso. Esse comportamento evidencia estabilidade operacional da unidade frente às variações sazonais observadas na região do Distrito Federal, caracterizada por marcadas diferenças pluviométricas ao longo do ano. Além disso, o elevado desempenho observado nas três variáveis analisadas reforça a consistência dos resultados obtidos para a unidade.

4.2.2 ETE-Sul

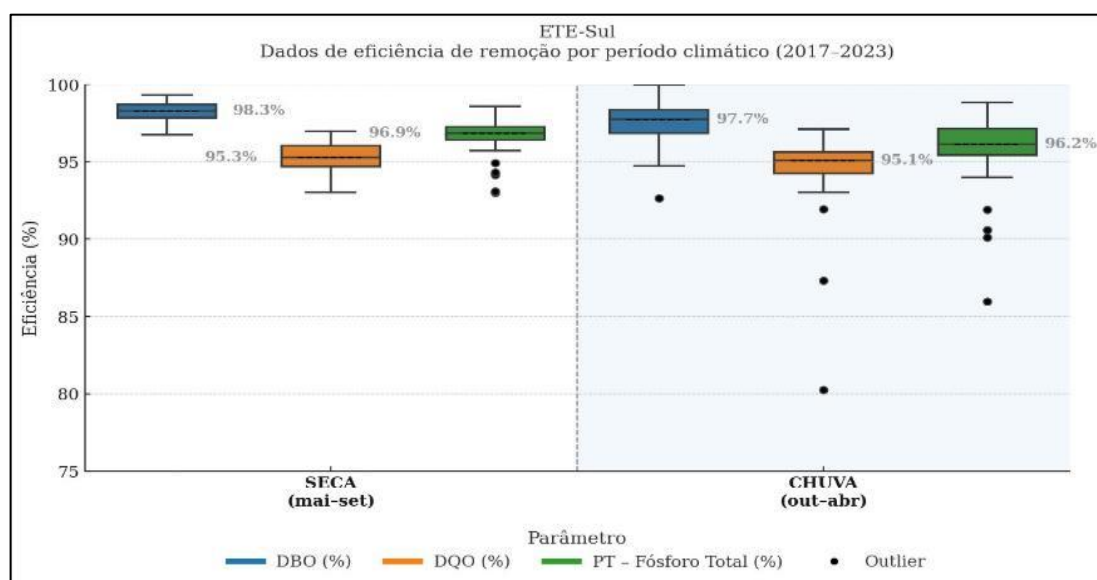


Figura 14– Eficiência de remoção de DBO, DQO e PT na ETE-Sul nos períodos seco e chuvoso (2017 – 2023)

Fonte: Elaboração própria

A ETE-Sul, que opera com sistema de lodos ativados em configuração *Phoredox* (Bardenpho modificado) de três estágios, associada a polimento final químico, apresentou desempenho elevado e estável ao longo dos dois períodos sazonais avaliados, conforme visto na Figura 14. A eficiência média de remoção de DBO foi de 98,3% no período seco e 97,7% no período chuvoso, com pouca variação entre os regimes hidrológicos, o que indica a robustez do processo biológico aeróbio.

Para a DQO, as eficiências médias foram de 95,3% (seca) e 95,1% (chuva), também com baixa variação. Já para o PT, o sistema alcançou 96,9% de remoção no período seco e 96,2% no período chuvoso, mantendo-se acima de 96% em ambos os casos. Esse resultado pode

ser atribuído à presença do processo *Phoredox* e ao polimento químico, que favorecem a remoção de fósforo por vias biológicas e químicas.

Visualmente, os gráficos *boxplot* da Figura 14 apontam uma distribuição concentrada dos dados e poucos *outliers*, predominantemente na chuva, reforçando a estabilidade do sistema mesmo sob condições climáticas distintas. A performance consistente da ETE-Sul evidencia a eficiência do tratamento avançado adotado e sua resiliência frente às oscilações típicas dos períodos de seca e chuva no Distrito Federal.

4.2.3 ETE-Norte

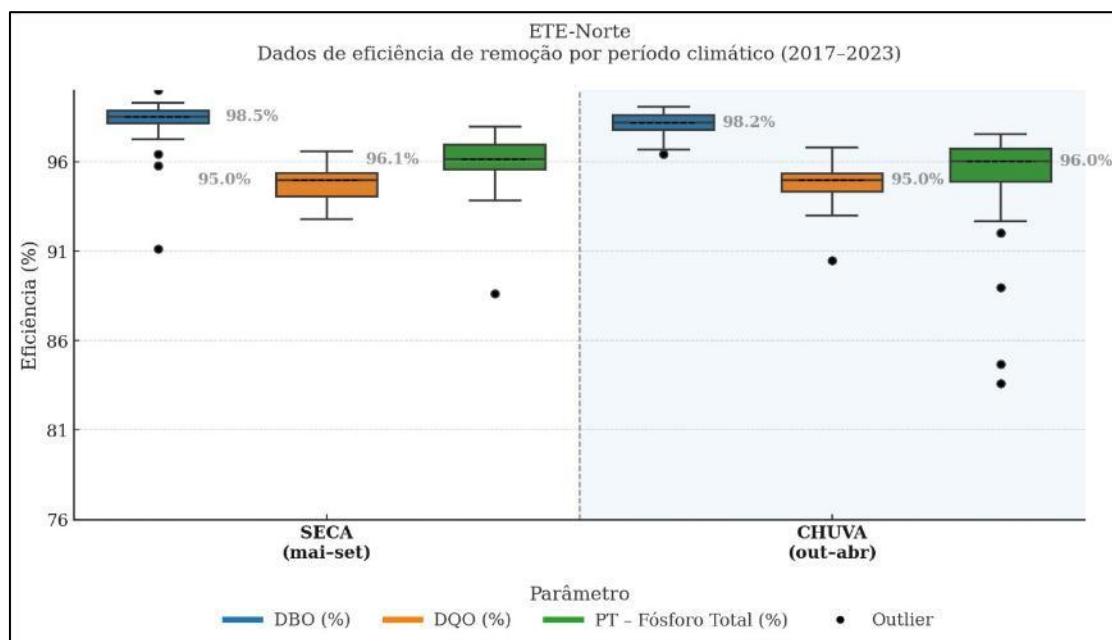


Figura 15– Eficiência de remoção de DBO, DQO e fósforo total na ETE-Norte nos períodos seco e chuvoso (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria.

Conforme apresentado na Figura 15, a ETE-Norte apresentou desempenho estável na remoção de DBO, DQO e PT nos dois períodos sazonais analisados. A mediana das eficiências variou pouco entre seca e chuva, com destaque para a remoção de DBO, que se manteve superior a 98% em ambos os períodos. A DQO teve desempenho igualmente elevado, com medianas de 95,0% na seca e na chuva. O PT apresentou leve redução, passando de 96,1% para 96,0%, o que ainda indica bom desempenho. A presença de *outliers* nos dados de fósforo durante o período chuvoso sugere variações pontuais, possivelmente associadas a sobrecargas ou instabilidades operacionais. O sistema de tratamento da unidade é composto por lodos

ativados com variação *Phoredox* (Bardenpho modificado) em três estágios e polimento final químico, o que pode justificar a alta remoção de nutrientes mesmo sob variações climáticas.

4.2.4 ETE-Brazlândia

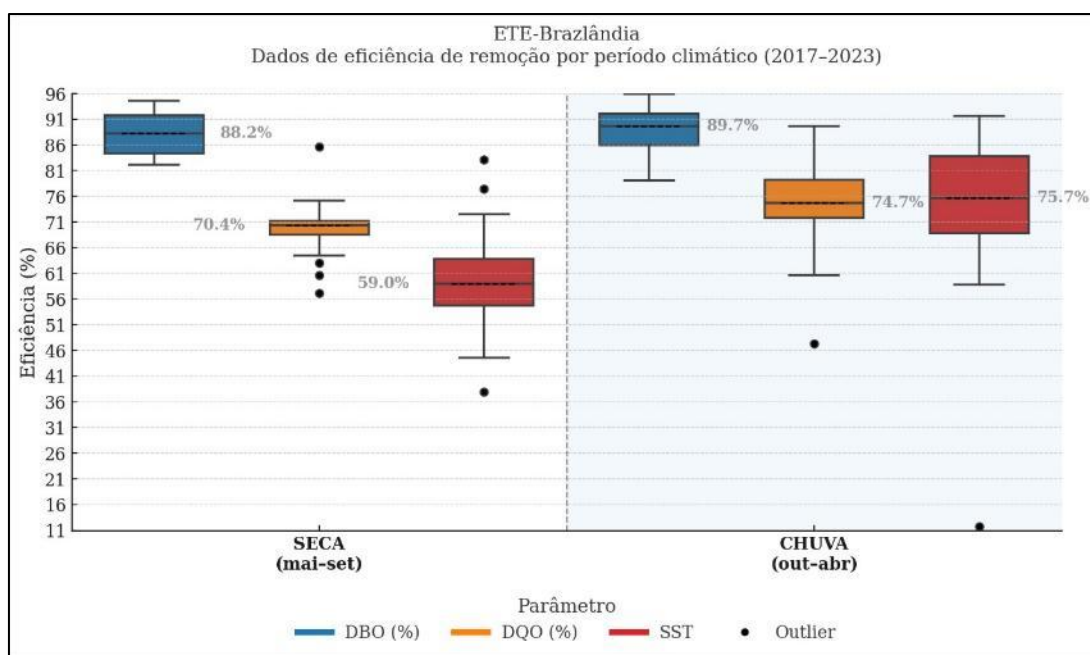


Figura 16– Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE-Brazlândia (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria.

A ETE-Brazlândia apresentou desempenho inferior em comparação às demais unidades analisadas, com eficiências medianas de remoção mais baixas para todas as variáveis, conforme apresentado na Figura 16. Durante o período seco, a eficiência de remoção de DBO foi de 88,2%, subindo ligeiramente para 89,7% na estação chuvosa. Já os resultados para DQO e SST indicam fragilidades mais acentuadas: a eficiência de DQO variou de 70,4% (seca) para 74,7% (chuva), enquanto a remoção de SST aumentou de 59,0% para 75,7%, revelando um ganho no desempenho no período úmido.

Apesar da melhora, os dados apontam alta variabilidade e presença de diversos *outliers*, especialmente na variável SST, o que pode estar associado à instabilidade do sistema de lagoas utilizado. A unidade opera com lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa, um arranjo de tratamento de baixa complexidade técnica que pode não oferecer desempenho robusto frente a cargas afluentes elevadas ou variações climáticas acentuadas.

4.2.5 ETE-Gama

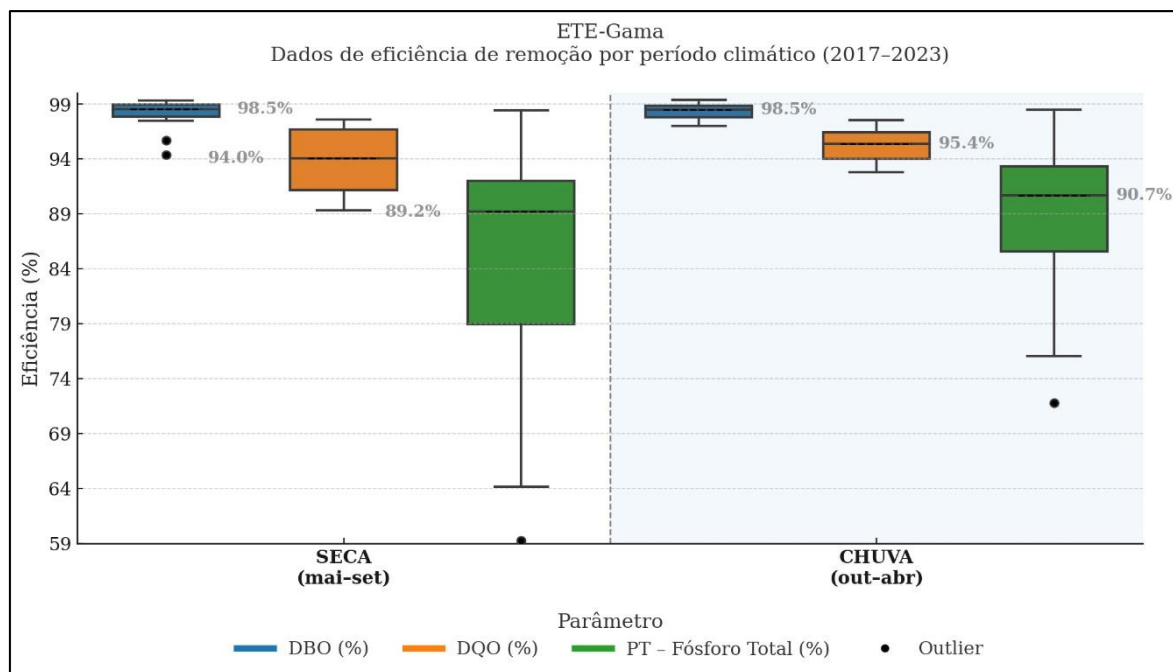


Figura 17– Eficiência de remoção de DBO, DQO e fósforo total por período climático na ETE-Gama (2017–2023)

Fonte: Elaboração própria.

A ETE-Gama apresentou elevado desempenho na remoção de poluentes, com destaque para as variáveis DBO e DQO. A eficiência de remoção da DBO manteve-se constante em ambos os períodos, com valor mediano de 98,5%, refletindo excelente estabilidade operacional, conforme apresentado na Figura 17. A DQO apresentou ligeira variação entre os períodos seco (94,0%) e chuvoso (95,4%), mantendo-se acima de 94% em ambos os casos.

Quanto ao PT, a mediana de eficiência subiu de 89,2% (seca) para 90,7% (chuva), revelando bom desempenho mesmo diante da maior variabilidade observada. A dispersão dos dados dessa variável, evidenciada pela amplitude elevada e pela ocorrência de *outliers*, é compatível com a complexidade envolvida na remoção biológica de fósforo, apesar da unidade operar com sistema de lodos ativados com variação *Phoredox* (Bardenpho modificado) de 5 estágios, com co-precipitação — tecnologia avançada que favorece tal remoção.

Para a ETE-Gama, os resultados apontam desempenho consistente nos parâmetros avaliados, mantendo padrões semelhantes entre os períodos seco e chuvoso. Esse comportamento está relacionado ao arranjo tecnológico adotado na unidade, que combina processos de remoção biológica e química de nutrientes.

4.2.6 ETE-Melchior

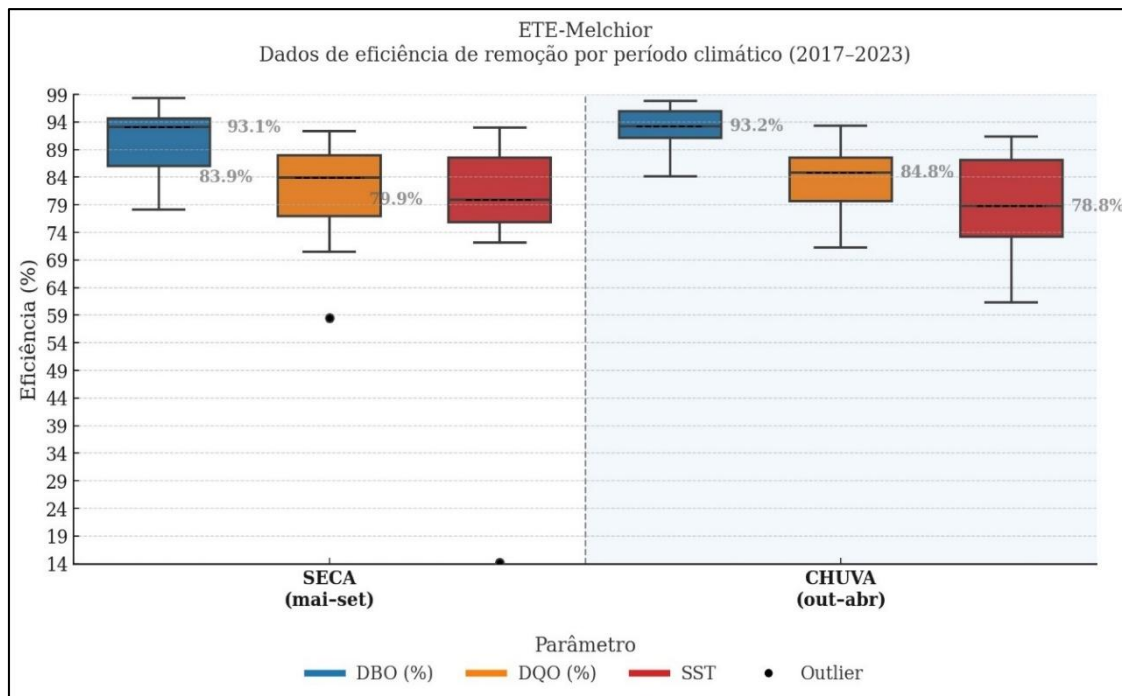


Figura 18-Eficiência de remoção DBO, DQO e SST por período climático na ETE-Melchior (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria.

A ETE-Melchior apresentou bom desempenho na remoção de DBO, com médias de 93,1% no período seco e 93,2% no período chuvoso, indicando estabilidade e eficiência do processo biológico sob diferentes condições climáticas, conforme visto na Figura 18. Os valores mantiveram-se consistentes, com baixa dispersão e ausência de quedas significativas entre os períodos.

Para a DQO, a eficiência mediana foi de 83,9% na seca e 84,8% na chuva, revelando um desempenho sólido, porém com ligeira variabilidade nos dados, conforme indicado pela amplitude interquartil observada nos *boxplots*.

A variável SST apresentou maior oscilação e maior presença de valores atípicos, sobretudo no período seco, quando a mediana ficou em 79,9%, com queda para 78,8% no período chuvoso. Apesar da leve redução, os valores continuam dentro de um intervalo considerado satisfatório, mas a dispersão mais ampla e os *outliers* apontam instabilidades pontuais no tratamento físico-químico ou hidráulico.

A unidade opera com sistema de reatores *UASB* associado a fluxo alternado controlado (Unitank®), o que pode explicar a performance consistente da remoção de matéria orgânica,

ainda que a gestão de sólidos suspensos demande atenção específica para evitar oscilações em períodos de maior pluviosidade.

4.2.7 ETE-Paranoá

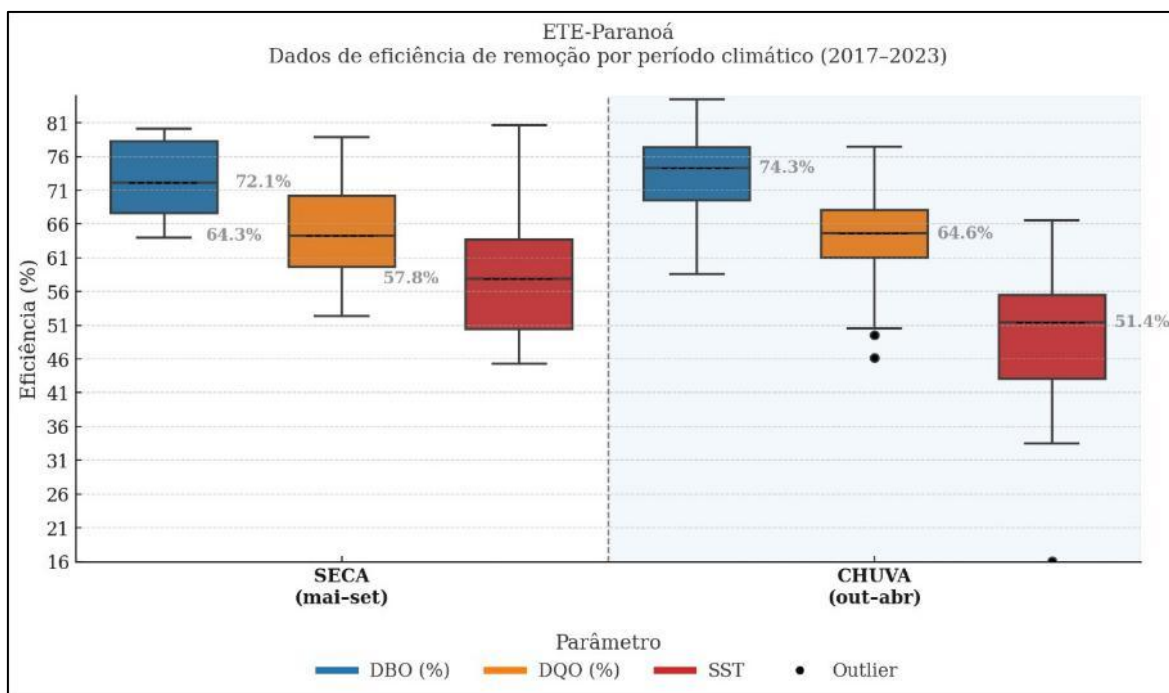


Figura 19– Eficiência remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE-Paranoá (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria.

A ETE-Paranoá apresentou desempenho de moderado a baixo nas três variáveis avaliadas, com eficiências médias inferiores a 75%, sobretudo na variável SST, conforme apresentado na Figura 19. No período seco, a eficiência de remoção de DBO foi de 72,1%, enquanto no chuvoso foi levemente superior, atingindo 74,3%. Embora não tenha havido grande variação entre os períodos, os resultados indicam a necessidade de melhorias na remoção de carga orgânica.

Para a DQO, observou-se leve aumento na eficiência média de 64,3% no período seco para 64,6% no período chuvoso, mantendo comportamento praticamente estável entre os períodos analisados, o que reflete as condições operacionais observadas na unidade ao longo da série de dados.

A variável mais crítica foi o de Sólidos Suspensos Totais (SST), com queda na eficiência de 57,8% no período seco para 51,4% no chuvoso. A dispersão mais acentuada e a presença de valores extremos apontam instabilidades operacionais e sensibilidade a eventos climáticos,

possivelmente associadas ao tipo de tratamento adotado, que inclui *UASBs* seguidos de lagoas de estabilização/aeração.

Para a ETE-Paranoá, os resultados obtidos evidenciam comportamento relativamente estável nas variáveis avaliadas (DBO e DQO). Em contraste, os dados referentes aos SST apresentaram maior variabilidade e menores eficiências de remoção.

4.2.8 ETE-Planaltina

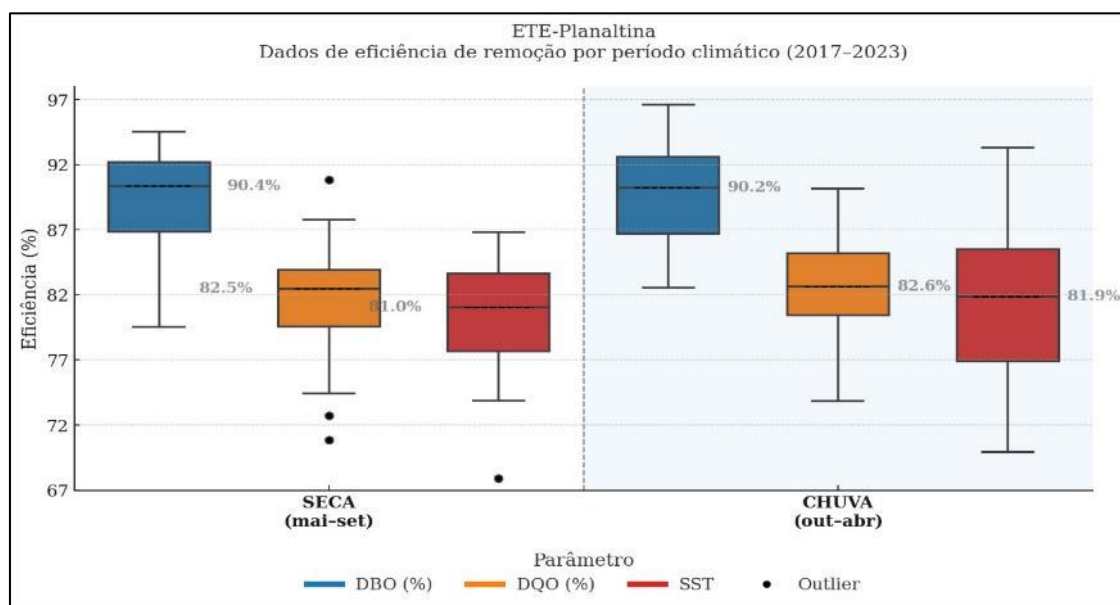


Figura 20– Eficiência remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE-Planaltina (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria.

A ETE-Planaltina apresentou desempenho estável entre os períodos seco e chuvoso, com pouca variação nas eficiências médias das variáveis analisadas, conforme apresentado na Figura 20. A remoção de DBO manteve-se elevada, com médias de 90,4% na seca e 90,2% na chuva, indicando bom desempenho do sistema quanto à carga orgânica biodegradável, independentemente da sazonalidade.

Para a DQO, os resultados também demonstraram estabilidade, com 82,5% de eficiência média na seca e 82,6% na chuva. Esse comportamento sugere que o sistema é capaz de remover matéria orgânica total com eficiência moderada, sem grandes oscilações sazonais.

No que se refere a variável SST, os valores médios também foram muito próximos entre os dois períodos: 81,0% na seca e 81,9% na chuva. Apesar da estabilidade geral, observa-se maior dispersão nos dados durante o período chuvoso, o que sinaliza alguma sensibilidade a variações operacionais provocadas por aumento de vazão ou diluição do afluente.

Para a ETE-Planaltina, os resultados obtidos indicam comportamento consistente nas três variáveis avaliadas, com eficiências médias de remoção relativamente semelhantes ao longo do período analisado. Os dados também evidenciam baixa variação entre os anos avaliados, sugerindo padrão de desempenho relativamente estável para a unidade.

4.2.9 ETE-Recanto das Emas

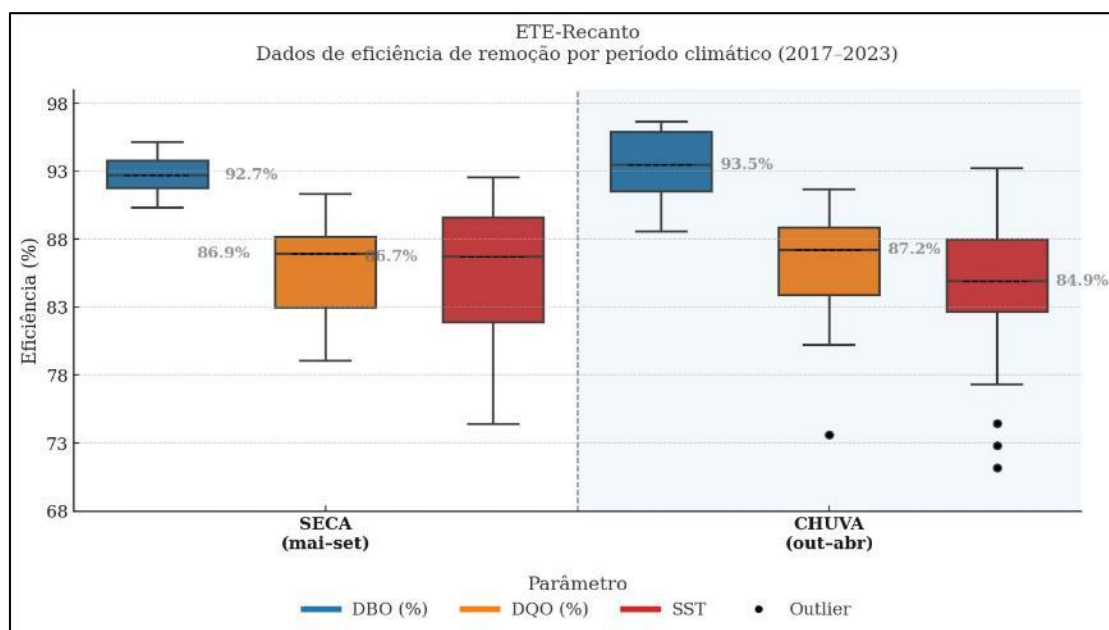


Figura 21– Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE-Recanto das Emas (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria

A ETE-Recanto das Emas apresentou resultados consistentes entre os dois períodos climáticos analisados, com eficiências médias relativamente altas nas três variáveis, conforme apresentado na Figura 21. A remoção de DBO variou de 92,7% na seca para 93,5% na chuva, mantendo-se em patamar elevado e estável, o que evidencia a robustez do sistema quanto à degradação de matéria orgânica biodegradável.

Quanto à DQO, a eficiência média foi de 86,9% no período seco e 87,2% no período chuvoso, revelando um comportamento igualmente estável e satisfatório na remoção de matéria orgânica total.

Para a variável SST, os valores médios de eficiência foram de 86,7% na seca e 84,9% na chuva. Embora se observe uma leve queda no período chuvoso, o desempenho permanece satisfatório. Entretanto, a maior dispersão dos dados e presença de *outliers* no período de chuvas

pode estar associada ao impacto do aumento de vazões afluentes ou a oscilações no desempenho do sistema de tratamento.

Os resultados obtidos mostram manutenção de eficiências de remoção semelhantes entre os períodos seco e chuvoso, com variações relativamente moderadas nos dados ao longo do tempo.

4.2.10 ETE Riacho Fundo

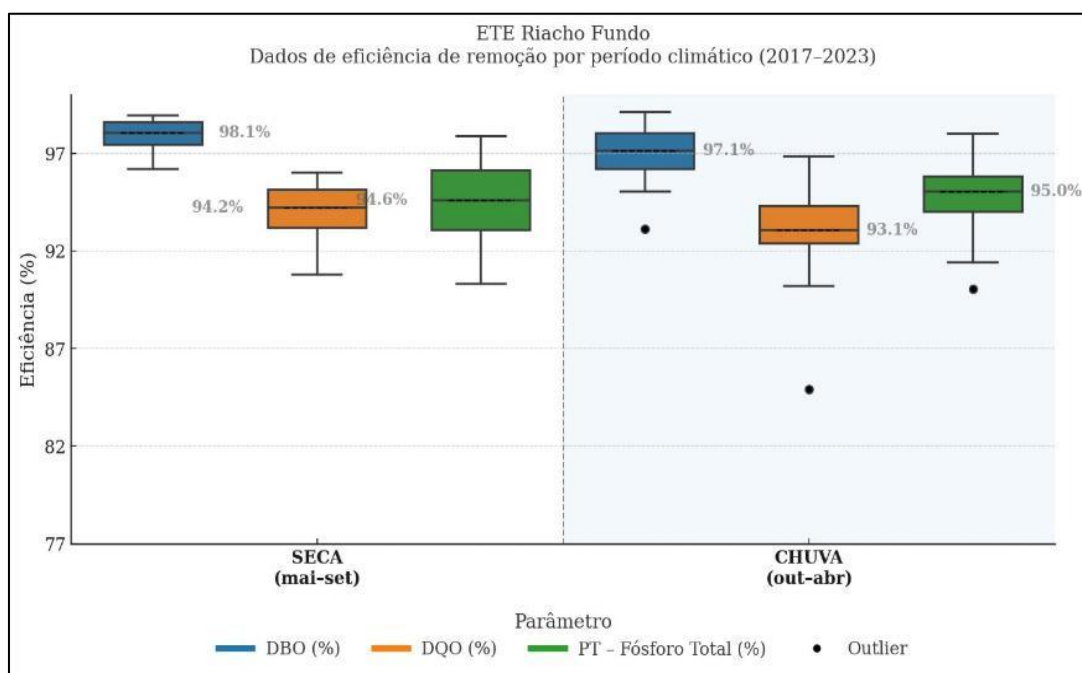


Figura 22– Eficiência de remoção de DBO, DQO e PT por período climático na ETE Riacho Fundo (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria.

A ETE Riacho Fundo apresentou alta eficiência de remoção para todas as variáveis analisadas ao longo dos dois períodos climáticos conforme apresentado na Figura 22. As eficiências médias mantiveram-se acima de 90%, com variações pouco significativas entre seca e chuva, indicando estabilidade no desempenho do sistema.

Para a DBO, observou-se eficiência média de 98,1% no período seco e 97,1% no período chuvoso, com pouca dispersão, o que reforça o controle operacional da unidade na remoção de matéria orgânica biodegradável.

A DQO apresentou médias de 94,2% na seca e 93,1% na chuva, também com estabilidade entre os períodos, embora com ligeira queda na chuva, possivelmente associada ao aumento das cargas afluentes diluídas.

Quanto ao PT, foram observadas eficiências médias de remoção de 94,6% no período seco e 95,0% no período chuvoso, indicando manutenção de valores elevados e semelhantes entre as estações do ano. Esse comportamento está associado à presença de etapa química de polimento na unidade, com adição de sulfato de alumínio, conforme descrito na tipologia do sistema de tratamento.

4.2.11 ETE Samambaia

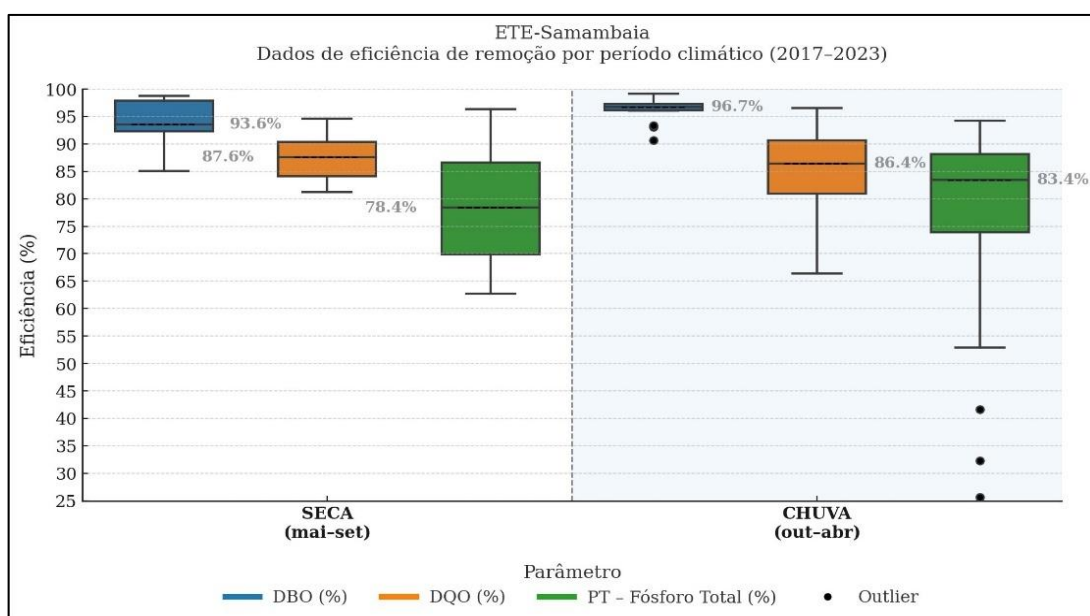


Figura 23– Eficiência de remoção de DBO, DQO e PT por período climático na ETE Samambaia (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria

A ETE Samambaia demonstrou bom desempenho na remoção das variáveis analisadas, com médias superiores a 85% para DBO e DQO nos dois períodos climáticos, conforme apresentado na Figura 23. A eficiência na remoção de PT, embora mais variável, também apresentou resultados consistentes.

Durante o período seco, as eficiências médias observadas foram de 93,6% para DBO, 87,6% para DQO e 78,4% para PT. Já no período chuvoso, os valores foram de 96,7% para DBO, 86,4% para DQO e 83,4% para fósforo, indicando ligeira melhoria geral na estação chuvosa, especialmente para o Fósforo Total, contudo uma maior variabilidade das eficiências de remoção do fósforo.

Observa-se maior dispersão nos dados de fósforo total em ambos os períodos analisados, com presença de outliers no período chuvoso. Esse comportamento pode estar relacionado à

complexidade operacional do sistema adotado na ETE-Samambaia, composto por reatores *UASB*, lagoas facultativas, lagoas de alta taxa, lagoas de maturação e etapa de polimento químico. Em relação as variáveis avaliadas, os resultados apontam eficiências mais elevadas para a DBO, enquanto as demais variáveis apresentaram variações moderadas entre os períodos seco e chuvoso.

4.2.12 ETE-Santa Maria

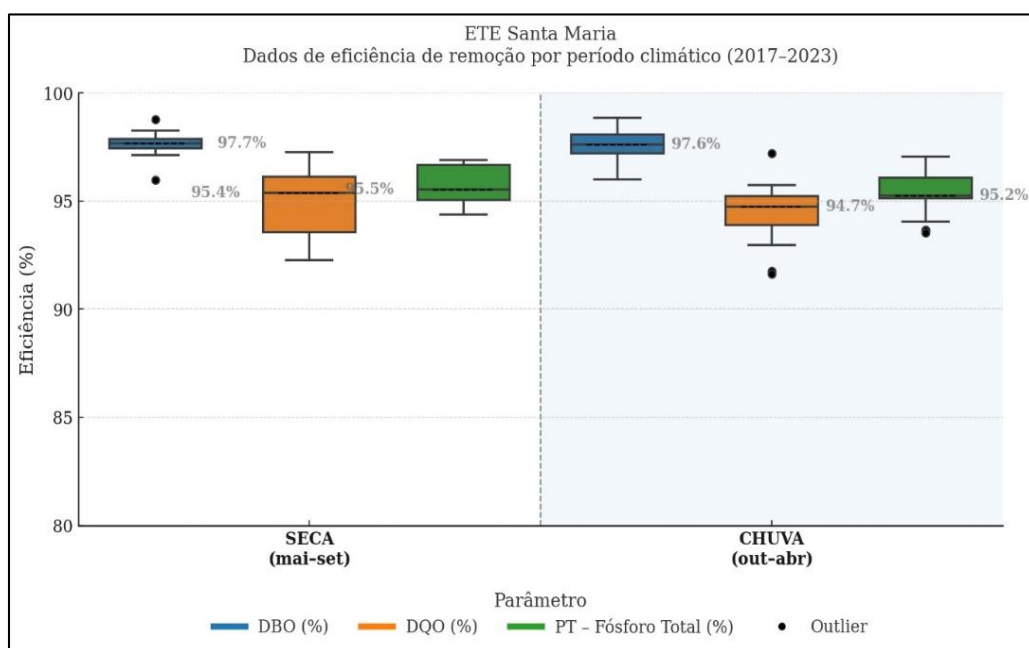


Figura 24– Eficiência de remoção de DBO, DQO e PT por período climático na ETE Santa Maria (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria.

A ETE-Santa Maria apresentou desempenho elevado e consistente na remoção das três variáveis analisadas ao longo dos dois períodos climáticos, conforme apresentado na Figura 24. Durante o período seco, as eficiências médias foram de 97,7% para DBO, 95,4% para DQO e 95,5% para PT. Já na estação chuvosa, as médias se mantiveram estáveis: 97,6% para DBO, 94,7% para DQO e 95,2% para PT.

Os dados revelam baixa variabilidade e ausência de oscilações expressivas entre os períodos, o que aponta a uma estabilidade operacional da unidade, mesmo em cenários com maior carga hidráulica. A consistência nos resultados pode ser atribuída à adoção de um sistema com reatores *UASB*, seguido de lagoas de alta taxa e polimento químico.

Os resultados observados para a ETE-Santa Maria apontaram elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica e PT. Os valores obtidos mantiveram padrões semelhantes entre os períodos analisados, mesmo diante das variações climáticas observadas.

4.2.13 ETE-São Sebastião

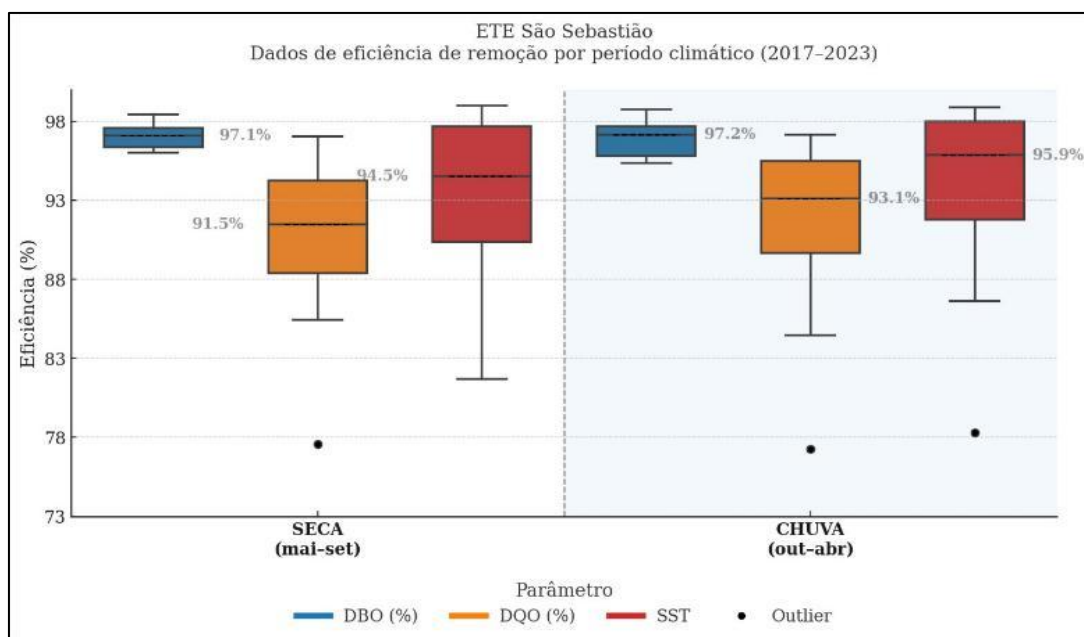


Figura 25– Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE São Sebastião

Fonte: Elaboração própria.

A ETE-São Sebastião apresentou elevado desempenho na remoção de poluentes, com estabilidade entre os períodos sazonais, conforme apresentado na Figura 25. Durante o período seco, as eficiências médias foram de 97,1% para DBO, 91,5% para DQO e 94,5% para SST. Na estação chuvosa, os valores se mantiveram semelhantes, com 97,2% (DBO), 93,1% (DQO) e 95,9% (SST).

A unidade apresentou baixos níveis de variabilidade nos parâmetros avaliados, mesmo com o acréscimo de carga hidráulica observado durante o período chuvoso. Para a ETE-São Sebastião, os resultados também indicam elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica e sólidos, com valores médios ligeiramente superiores no período chuvoso.

4.2.14 ETE-Sobradinho

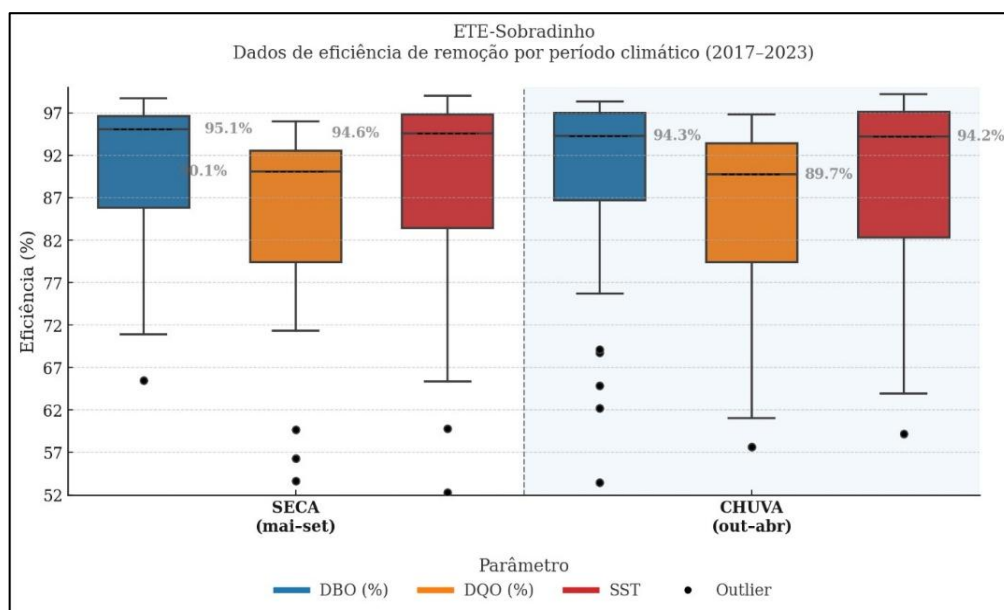


Figura 26– Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE Sobradinho (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria

A ETE-Sobradinho apresentou elevadas eficiências na remoção das três variáveis analisadas, com médias sazonais próximas entre os períodos avaliados, conforme apresentado na Figura 26. Durante o período seco, as eficiências médias foram de 95,1% para DBO, 90,1% para DQO e 94,6% para SST. No período chuvoso, os valores permaneceram em patamares semelhantes, registrando 94,3% para DBO, 89,7% para DQO e 94,2% para SST. Esses resultados indicam manutenção de valores elevados de remoção para as variáveis avaliadas ao longo dos dois períodos analisados.

Em relação à distribuição dos dados, observa-se maior dispersão nas amostras durante o período chuvoso, especialmente para o parâmetro DQO. Essa característica é evidenciada pela presença de maior número de *outliers* nesse período, o que aponta maior variabilidade nas concentrações efluentes. Apesar disso, as medianas apresentaram valores próximos entre os períodos seco e chuvoso, sugerindo comportamento semelhante das eficiências centrais ao longo das séries analisadas.

Quanto à configuração do sistema de tratamento, a ETE-Sobradinho utiliza processo baseado em lodos ativados convencionais, conforme descrito na tipologia da unidade. Esse arranjo tecnológico está associado à remoção biológica da matéria orgânica e de sólidos suspensos, sendo amplamente utilizado em estações de tratamento de esgoto. No contexto dos

resultados observados, os dados apontam manutenção de eficiências elevadas para os parâmetros avaliados ao longo das variações sazonais consideradas.

4.2.15 ETE-Vale do Amanhecer

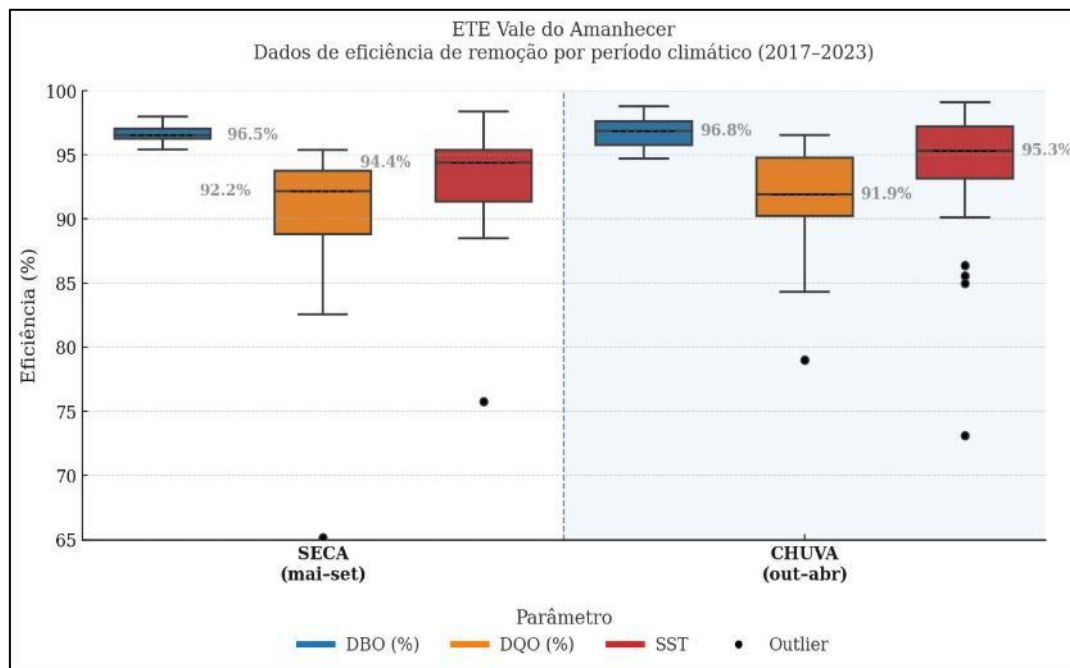


Figura 27– Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático na ETE Vale do Amanhecer (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria.

A ETE-Vale do Amanhecer apresentou elevadas eficiências na remoção de DBO, DQO e SST nos dois períodos climáticos analisados, conforme apresentado na Figura 27. Durante o período de estiagem, as eficiências médias foram de 96,5% para DBO, 92,2% para DQO e 94,4% para SST. No período chuvoso, os valores permaneceram em patamares semelhantes, registrando 96,8% para DBO, 91,9% para DQO e 95,3% para SST. Em relação à distribuição dos dados, observa-se a presença de *outliers*, especialmente para SST durante o período chuvoso.

Apesar dessa ocorrência, a mediana e o intervalo interquartil apresentaram valores próximos entre os períodos analisados. Quanto à configuração do sistema de tratamento, a ETE-Vale do Amanhecer é composta por reatores *UASB* seguidos por lagoa aerada e lagoa de maturação, conforme descrito na tipologia da unidade, associada aos processos biológicos e físico-químicos envolvidos no tratamento do esgoto doméstico.

4.3 Análise Comparativa da Eficiência de Remoção por Tecnologia de Tratamento Frente à Sazonalidade Climática

A fim de aprofundar a análise dos resultados de eficiência sazonal, optou-se por agrupar as 15 ETEs avaliadas de acordo com as principais tecnologias empregadas em seus sistemas de tratamento. Essa organização permite uma leitura comparativa mais clara, facilitando a identificação de padrões de desempenho entre arranjos tecnológicos distintos e suas respostas frente às variações climáticas sazonais.

A primeira categoria reúne as ETEs que adotam processos de lodos ativados e variações, caracterizadas pelo uso de sistemas mecanizados, etapas biológicas intensivas e, em muitos casos, fases de polimento final com adição de reagentes químicos. Compõem esse grupo as ETE-Sul, ETE-Norte e ETE-Gama, que operam com variações do processo *Phoredox* (Bardenpho modificado), com múltiplos estágios e etapas químicas complementares; ETE-Melchior, que utiliza o sistema Unitank® com controle automatizado; ETE-Riacho Fundo, com Reator Batelada Sequencial (RBS); ETE-Sobradinho, que opera com lodo ativado convencional; e ETE-Recanto das Emas, com arranjo que inclui reator anaeróbico seguido de lagoa aerada facultativa.

A segunda categoria, denominada Sistemas Naturais com Polimento Final, é composta pelas ETE-Samambaia, ETE-Santa Maria e ETE-Alagado. Nesses sistemas, há predominância de lagoas — como lagoas facultativas ou de alta taxa — seguidas por etapas de polimento químico, o que confere um grau intermediário de complexidade ao tratamento. Esse grupo representa uma transição entre os sistemas inteiramente naturais e os mecanizados, com potencial de bons resultados quando bem operados.

Por fim, a terceira categoria inclui os Sistemas Naturais, com tecnologia baseada majoritariamente em reatores anaeróbicos tipo *UASB* combinados com lagoas (anaeróbicas, facultativas, aeradas ou de maturação). Estão incluídas nessa categoria as ETE-Brazlândia, ETE-Paranoá, ETE-Vale do Amanhecer, ETE-Planaltina e ETE-São Sebastião. Em geral, são sistemas de menor complexidade, com baixa demanda energética, mas maior sensibilidade a variações hidráulicas e climáticas, especialmente no período chuvoso.

A classificação adotada respeita as especificidades técnicas de cada unidade e serve como base para a discussão dos resultados agregados por grupo, permitindo observar tendências de eficiência, estabilidade e vulnerabilidade operacional associadas a cada tipo de arranjo tecnológico

4.3.1 Eficiência nos sistemas de Lodos Ativados e Variações

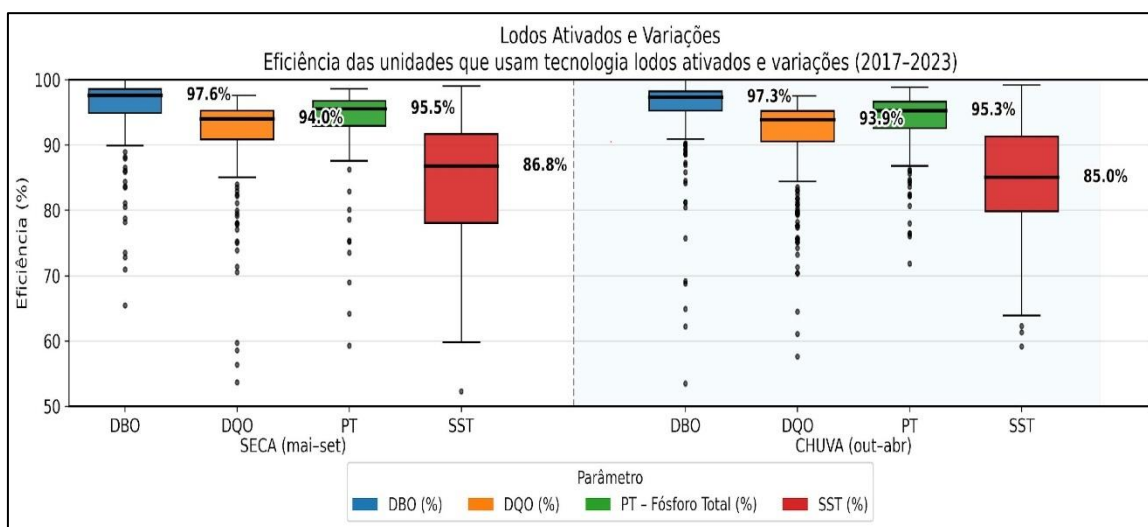


Figura 28– Eficiência de remoção de DBO, DQO, PT e SST por período climático das 7 estações cuja tecnologia é do tipo lodos ativados e variações

Fonte: Elaboração própria.

As unidades que operam com tecnologias de lodos ativados e suas variações apresentaram os melhores desempenhos entre os três grupos analisados, tanto em termos de eficiência média quanto de estabilidade frente às variações climáticas sazonais, conforme apresentado na Figura 28. Os gráficos *boxplot* da Figura 28 revelam que, nos dois períodos avaliados (seca e chuva), as variáveis DBO e DQO apresentaram percentuais de remoção elevados e com baixa dispersão dos dados, indicando alto controle operacional e robustez dos processos biológicos.

Na estação seca, as medianas de remoção foram de 97,6% para DQO e 94,0% para DBO, durante o período chuvoso, esses valores se mantiveram praticamente estáveis, com medianas de 97,3% DQO e 93,9% DBO, demonstrando a resiliência desses sistemas mesmo sob condições hidráulicas adversas.

No entanto, as variáveis SST e PT mostraram maior sensibilidade à sazonalidade. A remoção de SST, que teve mediana de 86,8% no período seco, apresentou redução para 85,0% no período chuvoso. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento de vazão afluente, típico da estação chuvosa, que reduz o tempo de detenção hidráulica e favorece a arraste de sólidos no processo (METCALF e EDDY,2016). A mesma tendência, embora menos pronunciada, foi observada na variável PT, cuja mediana caiu de 95,5% para 95,3%, mantendo-se ainda assim dentro de um patamar elevado.

Essa performance pode ser explicada pelas características tecnológicas presentes nas ETEs que compõem esse grupo, como ETE-Sul, ETE-Norte, ETE-Gama, ETE-Riacho Fundo, ETE-Sobradinho, ETE-Recanto das Emas e ETE-Melchior. Esses sistemas utilizam configurações avançadas como os processos *Phoredox* (modificado de Bardenpho), Reatores Batelada Sequencial (RBS) e polimento final químico, que conferem maior capacidade de remoção de carga orgânica e nutrientes. Além disso, o controle automatizado por fases, como o sistema Unitank® empregado na ETE-Melchior, permite ajustes operacionais dinâmicos frente às flutuações de carga, contribuindo para a estabilidade do desempenho. Esses resultados confirmam a superioridade dos sistemas mecanizados frente às oscilações climáticas, sendo recomendados para contextos urbanos com alta variação hidrológica.

4.3.2 Eficiência nos sistemas Naturais com Polimento Final

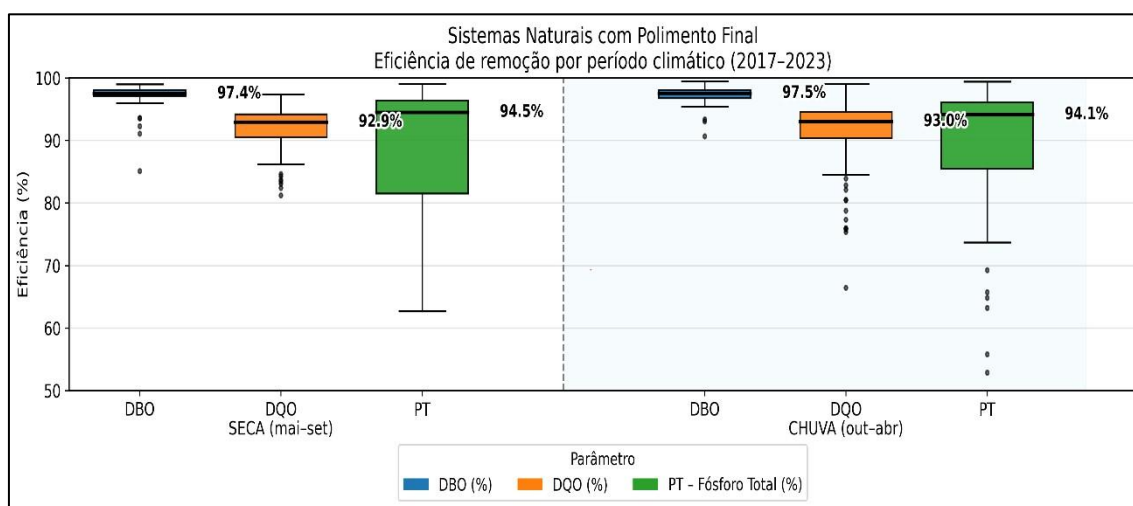


Figura 29– Eficiência de remoção de DBO, DQO e PT por período climático das 3 estações cuja tecnologia é do tipo Sistemas Naturais com polimento final (2017–2023).

Fonte: Elaboração própria.

As ETEs agrupadas como Sistemas Naturais com Polimento Final (ETE-Samambaia, ETE-Santa Maria e ETE-Alagado) apresentaram bons resultados gerais de eficiência ao longo do período analisado (2017–2023), conforme visto na Figura 29, com elevadas remoções nos dois regimes climáticos, especialmente para DQO e PT. De modo geral, observa-se que as medianas dos *boxplots* permaneceram em níveis elevados, indicando desempenho consistente e reforçando o papel do tratamento complementar no aprimoramento da qualidade do efluente final.

Ao comparar os períodos seco e chuvoso, nota-se que não houve queda expressiva na eficiência média, embora o período chuvoso apresente maior dispersão em algumas variáveis, especialmente nas variáveis associadas à remoção de nutrientes. Esse comportamento sugere que oscilações operacionais e variações de carga e vazão típicas da estação chuvosa podem introduzir instabilidades pontuais, ainda que sem comprometer o desempenho global do grupo.

Nesse contexto, destaca-se a importância do polimento final químico como etapa de reforço, atuando como um mecanismo adicional de controle da variabilidade e de aumento da robustez do sistema, sobretudo em cenários em que o tratamento biológico e os sistemas naturais podem apresentar limitações diante de mudanças hidráulicas e ambientais. Assim, o agrupamento evidencia que a associação entre processos naturais e polimento final tende a proporcionar maior segurança operacional, contribuindo para elevar a confiabilidade da remoção em períodos com maior instabilidade climática.

4.3.3 Eficiência nos Sistemas Naturais

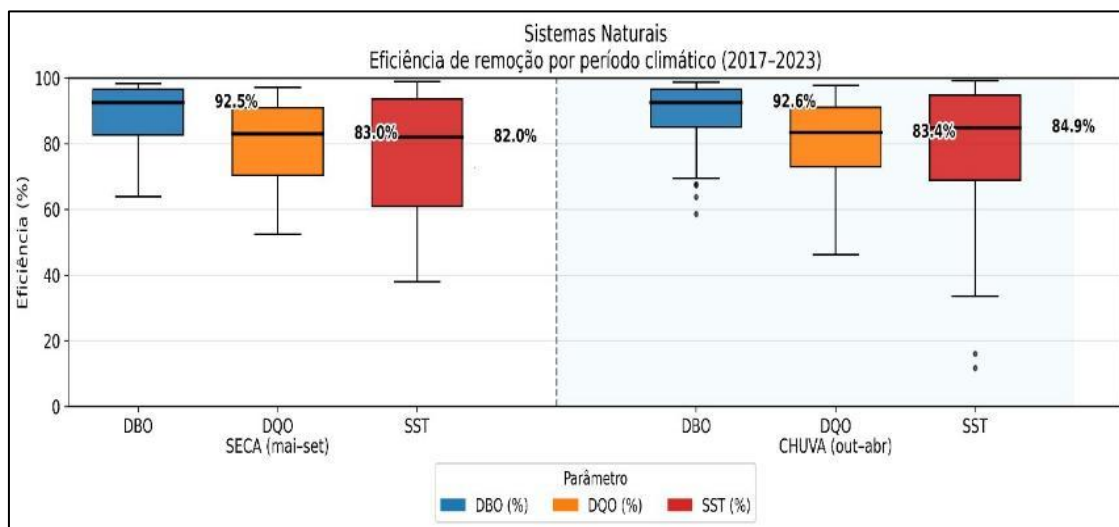


Figura 30– Eficiência de remoção de DBO, DQO e SST por período climático das 5 estações cuja tecnologia é do tipo Sistemas Naturais (2017-2023)

Fonte: Elaboração própria.

As ETEs classificadas como Sistemas Naturais apresentaram desempenho inferior em comparação aos outros dois grupos tecnológicos analisados, evidenciando maior sensibilidade às variações sazonais. De modo geral, as medianas de remoção de DBO, DQO e SST permaneceram acima de 80%, mas os gráficos apontam ampla dispersão dos dados e presença significativa de valores atípicos, sobretudo no período chuvoso.

A análise das eficiências médias nos sistemas naturais indica comportamento relativamente estável entre os períodos seco e chuvoso. Para a DBO, os valores médios permaneceram praticamente constantes, passando de 92,5% na seca para 92,6% no período chuvoso. Para a DQO e o SST, observaram-se leves aumentos nas eficiências médias, com valores passando de 83,0% para 83,4% e de 82,0% para 84,9%, respectivamente. Esses resultados indicam que, em termos médios, o desempenho dos sistemas naturais manteve-se semelhante entre os períodos climáticos analisados.

Entretanto, a análise gráfica evidencia diferenças na dispersão dos dados, especialmente no período chuvoso, apontando maior variabilidade operacional ao longo da série histórica. Esse comportamento pode estar associado às variações hidráulicas decorrentes de eventos pluviométricos, que alteram as condições de operação dos sistemas de tratamento, como o tempo de detenção hidráulica e a dinâmica de sedimentação dos sólidos (von Sperling, 2014).

Nesse contexto, a comparação com sistemas que incluem processos adicionais de tratamento evidencia diferenças no comportamento operacional das unidades avaliadas, particularmente em condições de variações hidrológicas sazonais. Os resultados apontam que as estações compostas exclusivamente por sistemas naturais tendem a apresentar maior dispersão nos dados ao longo do período analisado.

4.3.4 Análise Comparativa entre Grupos Tecnológicos

Com base na análise comparativa entre os três grupos tecnológicos de ETEs — Lodos Ativados e Variações, Sistemas Naturais com Polimento Final e Sistemas Naturais — foi possível observar distintas respostas operacionais frente à sazonalidade climática. As unidades com tecnologia de lodos ativados, sobretudo aquelas com processos avançados como *Phoredox* e RBS, demonstraram maior estabilidade entre os períodos seco e chuvoso. Isso ficou evidente nos elevados percentuais de remoção de DBO e DQO, com variações mínimas entre as estações e manutenção de patamares médios próximos ou superiores a 97% para DBO e superiores a 93% para DQO. Já a variável SST, embora também com bons resultados, apresentou leve queda no período chuvoso, possivelmente relacionada ao aumento da carga hidráulica e à maior presença de sólidos em suspensão devido ao arraste superficial.

Nos sistemas naturais com polimento final, também se observou desempenho consistente, principalmente para DQO e PT, com eficiências medianas próximas ou superiores a 93%, reforçando o papel do polimento químico como reforço no tratamento, mesmo sob condições sazonais adversas.

Por fim, os sistemas naturais — compostos majoritariamente por reatores anaeróbios seguidos de lagoas facultativas ou aeradas — apresentaram comportamento distinto dos sistemas mecanizados, caracterizado principalmente por maior dispersão dos resultados observados. A análise das eficiências médias indica que não houve reduções expressivas entre os períodos seco e chuvoso, mantendo-se valores próximos para DBO, DQO e SST. Todavia, os *boxplots* evidenciam maior variabilidade nos resultados, especialmente na variável SST, com presença de valores mais baixos em determinadas observações. Esse comportamento aponta maior sensibilidade desses sistemas às variações hidráulicas e às flutuações de carga afluente ao longo do tempo.

Tais características podem estar relacionadas às próprias particularidades operacionais dos sistemas naturais, que dependem fortemente das condições ambientais e apresentam menor grau de controle operacional quando comparados aos sistemas mecanizados (von SPERLING, 2014). Nessas configurações, alterações no regime de vazão e nas condições hidrodinâmicas podem influenciar a estabilidade do processo de tratamento, refletindo-se em maior variabilidade nos resultados observados.

De forma geral, a análise conjunta dos três grupos tecnológicos evidenciou diferenças no comportamento das eficiências de remoção frente à sazonalidade climática. As ETEs baseadas em lodos ativados apresentaram menores variações entre os períodos seco e chuvoso, mantendo percentuais de remoção elevados ao longo do período analisado. Nos sistemas naturais com polimento final, observaram-se padrões intermediários de variação, com manutenção de eficiências elevadas em variáveis associadas às etapas adicionais de tratamento. Já nos sistemas naturais, embora as médias de eficiência tenham permanecido relativamente estáveis entre os períodos, observou-se maior dispersão dos resultados e maior amplitude nos valores registrados, especialmente para a variável DQO. Nas tecnologias em que a análise de SST esteve disponível, também foram observadas amplitudes mais elevadas e presença de valores extremos quando comparadas às unidades mecanizadas.

4.3.5 Avaliação estatística da influência da sazonalidade por meio do teste de Kolmogorov–Smirnov

Com o objetivo de complementar a análise gráfica apresentada nos itens 4.3.1 a 4.3.3 e verificar estatisticamente a influência da sazonalidade climática sobre a eficiência de remoção, aplicou-se o teste não paramétrico de *Kolmogorov–Smirnov* (K–S), comparando-se as

distribuições dos dados dos períodos seco e chuvoso para cada tecnologia de tratamento e para cada variável (DBO, DQO, SST e PT).

Os dados foram previamente organizados e estruturados em planilhas eletrônicas (Excel®), sendo posteriormente processados em ambiente Python por meio da plataforma Google Colab®, permitindo a aplicação automatizada do teste K–S para amostras independentes. O teste de *Kolmogorov–Smirnov* baseia-se na comparação das funções de distribuição acumulada empíricas de dois conjuntos de dados, avaliando a maior distância vertical entre essas distribuições. Seu princípio fundamental consiste em testar a hipótese nula de que ambas as amostras provêm da mesma distribuição estatística, sendo particularmente adequado para dados assimétricos e sem pressuposto de normalidade (CONOVER, 1999; GIBBONS; CHAKRABORTI, 2011).

Na área ambiental, o teste K–S tem sido amplamente empregado para comparação de séries hidrológicas, qualidade da água e desempenho de sistemas de tratamento, especialmente em análises sazonais, devido à sua robustez frente à não normalidade dos dados (von SPERLING, 2007; GIBBONS; CHAKRABORTI, 2011).

A utilização de testes não paramétricos em estudos de saneamento é amplamente recomendada devido à natureza assimétrica, à presença de *outliers* e à elevada variabilidade dos dados operacionais de ETEs, especialmente em análises sazonais (HELSEL; HIRSCH, 2002). Von Sperling (2007) ressalta que a associação entre ferramentas gráficas e métodos estatísticos inferenciais é essencial para diferenciar variações aleatórias de alterações sistemáticas no desempenho dos sistemas de tratamento. Nesse sentido, o teste de *Kolmogorov–Smirnov* destaca-se por avaliar diferenças ao longo de toda a distribuição dos dados, e não apenas em medidas centrais, sendo particularmente adequado para investigações ambientais comparativas entre períodos climáticos distintos (GIBBONS; CHAKRABORTI, 2011).

Nesse contexto, a aplicação do teste K–S permitiu avaliar se as diferenças visualmente observadas nas representações gráficas correspondem, de fato, a alterações estatisticamente significativas na distribuição das eficiências de remoção entre os períodos seco e chuvoso. A análise foi conduzida separadamente para cada tecnologia de tratamento e para cada variável de qualidade do efluente, considerando-se as amostras independentes associadas aos diferentes períodos climáticos. Dessa forma, buscou-se verificar se as variações identificadas nos *boxplots* — tais como mudanças na dispersão dos dados, na amplitude dos valores e na presença de outliers — refletiam diferenças estruturais nas distribuições estatísticas ou se poderiam ser atribuídas apenas à variabilidade natural dos dados operacionais das ETEs. Essa abordagem permitiu integrar a interpretação visual das distribuições com evidências quantitativas

fornecidas pelo teste inferencial, contribuindo para uma avaliação mais robusta da influência da sazonalidade sobre o desempenho dos sistemas de tratamento analisados.

Tabela 3–Resultados do teste Kolmogorov–Smirnov por tecnologia e parâmetro

Tecnologia	Variável	n (seca)	n (chuva)	Estatística K–S	p-valor
Lodos ativados e variações	DBO	192	223	0,130	0,051
Lodos ativados e variações	DQO	217	245	0,109	0,118
Lodos ativados e variações	PT	103	105	0,125	0,346
Lodos ativados e variações	SST	126	140	0,073	0,840
Sistemas naturais	DBO	52	95	0,109	0,767
Sistemas naturais	DQO	161	175	0,093	0,426
Sistemas naturais	SST	161	175	0,151	0,038
Sistemas naturais com polimento final	DBO	55	72	0,161	0,344
Sistemas naturais com polimento final	DQO	66	88	0,102	0,792
Sistemas naturais com polimento final	PT	78	88	0,135	0,385

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos indicaram diferenças estatisticamente significativas apenas para a variável SST nos sistemas naturais, com $p = 0,038$, ao nível de significância de 5%, evidenciando alteração na distribuição das eficiências entre os períodos seco ($n = 161$) e chuvoso ($n = 175$). Para as demais variáveis e tecnologias, os valores de p permaneceram superiores a 0,05, não permitindo rejeitar a hipótese nula de igualdade das distribuições.

Esses resultados quantitativos corroboram diretamente os padrões previamente observados nos *boxplots* apresentados nos itens 4.3.1 a 4.3.3, nos quais se evidenciou maior dispersão do SST nos sistemas naturais durante o período chuvoso, bem como elevada estabilidade da DBO em todas as tecnologias avaliadas.

Nos sistemas naturais, o *boxplot* do SST apresentou aumento do intervalo interquartil e ampliação expressiva da faixa de variação no período chuvoso, com eficiência mediana passando de aproximadamente 82,0% na seca para 84,9% na chuva, acompanhada de mínimos que atingiram cerca de 38% na seca e aproximadamente 12% na chuva. Tal comportamento explica a significância estatística detectada pelo teste K–S, indicando maior sensibilidade dessa

tecnologia frente ao aumento da vazão afluyente e ao carreamento de sólidos durante eventos pluviométricos.

Por outro lado, nos sistemas de lodos ativados e variações, apesar de o SST apresentar visualmente maior dispersão nos *boxplots*, o teste K–S resultou em $p = 0,840$ indicando que, estatisticamente, as distribuições de seca e chuva não diferem de forma significativa. Situação semelhante foi observada para DBO ($p = 0,052$), DQO ($p = 0,118$) e PT ($p = 0,346$), refletindo maior estabilidade operacional desses sistemas frente à sazonalidade.

De modo consistente, a DBO apresentou os maiores níveis de estabilidade em todas as tecnologias, com medianas superiores a 92% e baixos valores de dispersão nos *boxplots*, aspecto reforçado pelos resultados do teste K–S, cujos valores de p permaneceram elevados tanto para lodos ativados ($p = 0,052$), quanto para sistemas naturais ($p = 0,768$) e sistemas naturais com polimento final ($p = 0,345$). Tal comportamento indica elevada robustez dos processos biológicos na remoção de matéria orgânica, mesmo sob variações climáticas.

A aplicação do teste de *Kolmogorov–Smirnov* possibilitou avaliar estatisticamente os padrões observados nas representações gráficas, indicando que a variável SST apresentou maior sensibilidade às variações sazonais nos sistemas naturais, enquanto a DBO apresentou comportamento mais estável entre as tecnologias analisadas. Esses resultados evidenciam a contribuição da integração entre análise gráfica e inferência estatística para a interpretação do desempenho das ETEs frente às variações hidrológicas, especialmente em contextos de intensificação de eventos extremos.

Em alguns casos, diferenças visuais entre os períodos seco e chuvoso nos *boxplots* não foram confirmadas pelo teste de *Kolmogorov–Smirnov*, o que pode ser atribuído à sua menor sensibilidade para detectar variações pontuais em dados com elevada variabilidade (MONTGOMERY; RUNGER, 2016). Assim, destaca-se a importância da interpretação conjunta entre análise gráfica e estatística.

4.4 Análise comparativa das eficiências médias por estação e variáveis em função da sazonalidade – visão holística

Para ampliar a compreensão dos resultados apresentados individualmente nas subseções anteriores, foram elaborados dois mapas de calor (*heatmaps*) com o objetivo de sintetizar e comparar as eficiências médias de remoção de DBO, DQO, SST e PT nas 15 ETEs estudadas, considerando os períodos seco e chuvoso. Essas representações gráficas possibilitam uma

análise integrada do desempenho das unidades operacionais, permitindo identificar padrões, destaques positivos e fragilidades sazonais de forma visual e objetiva.

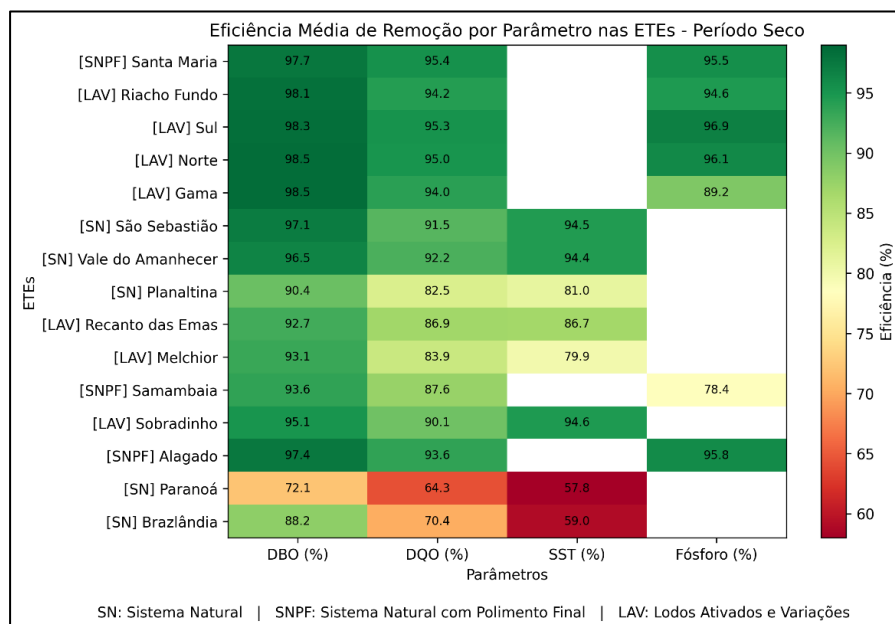


Figura 31– Eficiência média de remoção por variáveis nas ETes do Distrito Federal durante o período seco (maio a setembro), no intervalo de 2017 a 2023, conforme disponibilidade de dados por unidade. Os tons de verde indicam maior eficiência, enquanto tons amarelados e avermelhados indicam menor desempenho

Fonte: Autor (2025)

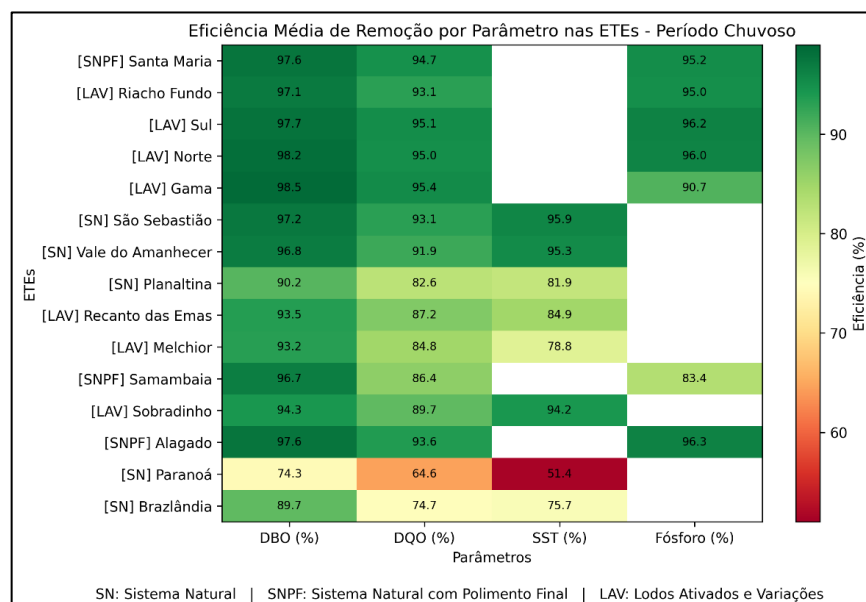


Figura 32– Eficiência média de remoção por variável nas ETes do Distrito Federal durante o período chuvoso (outubro a abril), no intervalo de 2017 a 2023. A figura permite comparar o desempenho da mediana sazonal entre os diferentes variáveis e unidades. As variações de cor ajudam a identificar tendências de redução ou manutenção da eficiência no período chuvoso.

Fonte: Autor (2025)

De maneira geral, observa-se que as ETEs baseadas em processos de lodos ativados — ETE-Sul, ETE-Norte e ETE-Gama — apresentam elevados níveis de eficiência em ambos os períodos e para maioria as variáveis avaliadas. As eficiências médias de remoção de DBO e DQO nessas estações situam-se predominantemente acima de 94%, indicando bom desempenho do sistema biológico aeróbio, mesmo sob possíveis variações sazonais da concentração afluente. Essas estações também apresentam resultados expressivos na remoção de PT, possivelmente em função da adoção de variantes do processo *Phoredox* ou da presença de etapas de polimento químico com co-precipitação.

No extremo oposto, destacam-se as ETE-Paranoá e ETE-Brazlândia, cujos valores médios de eficiência, especialmente para SST e DQO, revelam desempenho mais limitado, sobretudo no período chuvoso. A ETE-Paranoá, por exemplo, apresentou médias de 72,1% (DBO), 64,3% (DQO) e 57,8% (SST) no período seco, e 74,3%, 64,6% e 51,4%, respectivamente, no período chuvoso. Tais valores refletem a vulnerabilidade das tecnologias baseadas em lagoas e reatores *UASB* diante de picos de carga hidráulica e possíveis diluições que ocorrem com maior frequência no período chuvoso. Esse comportamento sazonal também foi evidenciado em outros estudos que apontam a sensibilidade de sistemas de tratamento com etapas anaeróbias seguidas de lagoas facultativas ou de maturação frente à variação climática (MEDEIROS et al., 2017; TONETTO et al., 2021).

A visualização por meio de *heatmaps* também permite identificar o equilíbrio entre as variáveis. Nota-se que, em diversas ETEs, as eficiências de remoção de SST tendem a ser mais variáveis entre os períodos. Um exemplo disso é a ETE Melchior, que obteve 79,9% de média de remoção de SST no período seco e 78,8% no chuvoso, enquanto manteve valores superiores a 83% para DQO em ambas as estações. A variabilidade na eficiência de remoção de sólidos pode estar relacionada à capacidade de sedimentação dos sistemas empregados, à eficiência dos decantadores e à estabilidade operacional durante eventos de alta pluviosidade, conforme destacado por von Sperling (2014).

A comparação entre os períodos seco e chuvoso (Figuras 31 e 32) indica que, na maior parte das unidades, as eficiências médias de remoção de DBO e DQO permaneceram relativamente próximas entre as duas estações, sugerindo certa estabilidade operacional dessas variáveis. Em contrapartida, diferenças mais perceptíveis entre os períodos podem ser observadas em algumas unidades para as variáveis PT e SST, refletindo particularidades operacionais e características das tecnologias empregadas em cada sistema.

De modo geral, os *heatmaps* permitem visualizar de forma integrada o comportamento das diferentes ETEs, evidenciando tanto unidades com desempenho mais consistente entre os

períodos analisados quanto aquelas que apresentam maior variação nas eficiências de remoção. Essa representação gráfica facilita a identificação de padrões operacionais e contribui para uma interpretação mais abrangente do desempenho das estações frente às variações sazonais observadas nos dados analisados.

4.5 Importância do monitoramento da eficiência de ETEs frente à sazonalidade e aos impactos climáticos

A variação climática, especialmente entre os períodos de seca e chuva, exerce influência direta sobre o desempenho operacional das ETEs, uma vez que as alterações no regime pluviométrico modificam tanto as condições hidráulicas quanto as características da carga afluente aos sistemas. Nos dados analisados neste estudo, observou-se que a eficiência de remoção de determinadas variáveis apresentou diferenças entre os períodos sazonais, indicando a influência das variações climáticas sobre o funcionamento das unidades. A representação gráfica por meio de *boxplot* e *heatmaps* permitiu visualizar essas diferenças de forma integrada, evidenciando padrões distintos de dispersão, estabilidade e variação das eficiências de remoção ao longo dos períodos seco e chuvoso.

A análise comparativa entre os períodos sazonais mostrou que as oscilações observadas nas variáveis de qualidade do efluente estão associadas, em parte, às alterações nas condições hidrológicas que ocorrem durante eventos de chuva. O aumento da vazão afluente pode provocar diluição da carga orgânica e redução do tempo de detenção hidráulica, influenciando processos de sedimentação e degradação biológica da matéria orgânica. Esse comportamento tem sido amplamente descrito na literatura de engenharia sanitária, que aponta a influência das variações hidráulicas sobre o desempenho dos sistemas de tratamento, especialmente em unidades com menor controle operacional ou maior exposição a contribuições indevidas na rede coletora (von SPERLING, 2014).

No contexto das Mudanças Climáticas Globais (MCGs), projeta-se o aumento da ocorrência de eventos extremos de chuva e seca (IPCC, 2023). De fato, dados climáticos observados em longas sequências, bem como aqueles projetados com o uso de diferentes modelos, para diferentes regiões brasileiras, têm apontado para o aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos de chuva, com a possibilidade de incrementos ainda maiores num futuro com MCGs (BALLARIN *et al.*, 2023; COSTA *et al.*, 2025). Em escala regional, estudos baseados em séries pluviométricas históricas conduzidos em unidade hidrográfica situada no Distrito Federal indicam tendência de aumento da concentração das precipitações em

períodos mais curtos, resultando em maior severidade dos processos erosivos associados às chuvas (LIMA *et al.*, 2025). Esse padrão de maior concentração dos eventos pluviométricos tende a intensificar as variações hidrológicas observadas nos sistemas urbanos, podendo afetar diretamente a dinâmica de operação das infraestruturas de saneamento.

No contexto regional, estudos sobre mudanças climáticas indicam que a região Centro-Oeste do Brasil, onde se localiza o Distrito Federal, apresenta tendência de aumento da frequência de eventos extremos, caracterizados por períodos secos prolongados alternados com episódios de chuvas intensas e concentradas. Essas alterações no regime hidrológico podem afetar diretamente a infraestrutura urbana e os sistemas de saneamento, aumentando a probabilidade de sobrecargas hidráulicas, extravasamentos e variações no desempenho das estações de tratamento (PBMC, 2016). No Distrito Federal, análises climáticas regionais também apontam para maior irregularidade na distribuição das chuvas e intensificação de eventos pluviométricos extremos, fatores que influenciam tanto os sistemas de drenagem urbana quanto as condições operacionais das ETEs (SEMA, 2022).

Além dos fatores climáticos, aspectos relacionados ao processo de urbanização também interferem nas condições hidráulicas dos sistemas de esgotamento sanitário. No caso do Distrito Federal, estudos apontam que a expansão urbana associada ao aumento das áreas impermeabilizadas tem contribuído para a intensificação do escoamento superficial durante eventos de chuva. Esse processo aumenta o volume de água que chega aos sistemas de drenagem e pode influenciar o comportamento hidráulico das redes coletoras e das estações de tratamento, especialmente em situações de contribuição indevida ou infiltração nas redes (IPEDF, 2024). Nesses cenários, variações no regime de vazão afluente podem repercutir nas condições de operação das ETEs, refletindo-se nas oscilações observadas nos parâmetros de qualidade do efluente.

A categorização das ETEs do Distrito Federal em três grupos tecnológicos — Lodos Ativados e variações, Sistemas Naturais com Polimento Final e Sistemas Naturais — permitiu observar diferenças no comportamento das eficiências de remoção frente às condições sazonais analisadas. As ETEs baseadas em processos de lodos ativados, que incluem unidades com maior grau de mecanização e controle operacional, apresentaram menores variações nas eficiências de remoção entre os períodos seco e chuvoso, mantendo percentuais elevados para as principais variáveis avaliadas. Nos sistemas naturais com polimento final, os resultados indicaram comportamento intermediário, com manutenção de eficiências elevadas em determinadas variáveis, especialmente naqueles associados às etapas adicionais de tratamento químico ou físico-químico.

Por outro lado, as unidades classificadas como sistemas naturais apresentaram maior dispersão nos dados e variações mais acentuadas nos percentuais de remoção entre os períodos analisados, particularmente no SST. Nesses sistemas, compostos predominantemente por reatores anaeróbios seguidos por lagoas facultativas ou aeradas, as variações nas condições hidráulicas e nas características da carga afluyente podem influenciar diretamente os processos biológicos e físicos envolvidos no tratamento. A análise conjunta dos resultados indica que as diferenças entre os grupos tecnológicos estão associadas às características operacionais de cada arranjo de tratamento e à forma como cada sistema responde às oscilações hidrológicas observadas ao longo dos períodos sazonais.

A utilização de representações gráficas como *boxplot* e *heatmaps* contribuiu para a visualização dessas diferenças, permitindo identificar unidades com maior estabilidade nas eficiências de remoção e outras que apresentaram maior variação ao longo da série temporal analisada. Esses padrões observados refletem a interação entre fatores operacionais, características das tecnologias adotadas e condições hidrológicas associadas ao regime climático da região. A análise das eficiências médias observadas nos períodos seco e chuvoso também evidenciou padrões distintos entre os grupos tecnológicos, indicando maior estabilidade operacional nas ETEs baseadas em processos mecanizados de lodos ativados e maior variabilidade nas unidades classificadas como sistemas naturais, especialmente em parâmetros associados à remoção de sólidos e matéria orgânica.

Nesse contexto, o monitoramento contínuo da eficiência das estações de tratamento de esgoto torna-se fundamental para identificar variações operacionais associadas às condições sazonais e aos impactos climáticos. No presente estudo, além das ferramentas gráficas, análises estatísticas indicaram diferenças na distribuição das eficiências de remoção entre os períodos seco e chuvoso nos sistemas de tratamento natural para variável SST, evidenciando a influência da sazonalidade sobre o desempenho operacional das unidades. A análise sistemática dos indicadores de desempenho permite, portanto, avaliar a estabilidade dos processos de tratamento, antecipar possíveis comprometimentos operacionais, ocasionados por chuvas, e subsidiar estratégias de adaptação e gestão mais eficientes diante da crescente variação hidrológica.

4.6 Resultados da Confiabilidade

Após a análise detalhada das eficiências de remoção nos períodos seco e chuvoso, observou-se que diversas ETEs apresentaram variações significativas no desempenho em função da sazonalidade climática, muito pelo tipo de tratamento adotado. Embora os gráficos *boxplot* tenham evidenciado, de forma visual e comparativa, as flutuações na performance entre os diferentes regimes hidrológicos, faz-se necessário aprofundar a avaliação do funcionamento das ETEs a partir de uma abordagem mais robusta e estatisticamente fundamentada.

Nesse sentido, a próxima etapa deste estudo concentra-se na análise da confiabilidade operacional, conforme metodologia proposta por Niku *et al.* (1979), a qual considera a variabilidade dos dados ao longo do tempo e permite estimar a probabilidade (a 95% adotado) de uma ETE manter-se dentro dos limites legais de lançamento.

Para subsidiar essa análise, é apresentada a estatística descritiva das variáveis efluentes (DBO, DQO, SST e PT) das 15 ETEs estudadas, com base no conjunto de dados disponibilizado pela CAESB para o período analisado (2017 a 2023). Os resultados incluem valores médios (X projeto), desvios-padrão, medianas, máximos e mínimos, bem como os coeficientes de variação (CV), os quais fornecem uma visão preliminar sobre a consistência, a magnitude e a dispersão dos dados analisados, essas informações são fundamentais para o cálculo do coeficiente de conformidade (CDC), medida central da análise de confiabilidade.

A Tabela 4 apresenta a estatística descritiva referente às concentrações de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) efluente das quinze Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) analisadas. São exibidos o número total de amostras, a média, o desvio padrão, a mediana, os valores mínimos e máximos observados, bem como o coeficiente de variação (CV) e o coeficiente de confiabilidade (CDC) calculados para cada unidade operacional. Esses indicadores permitem avaliar a variabilidade dos dados e a estabilidade do desempenho das estações, servindo como base para a análise de confiabilidade segundo a metodologia proposta por Niku *et al.* (1979).

Tabela 4– Estatística descritiva da concentração de DBO (mg/L⁻¹) afluyente nas 15 Estações de Tratamento de Esgoto do Distrito Federal

Unidade de Tratamento	Número de Amostras	Média ($\bar{x}$) X projeto	Desvio Padrão (σ)	Mediana	Valor Mínimo	Valor Máximo	Coefficiente de Variação (CV)	Coefficiente de Confiabilidade (CDC)
ETE-Sul	68	8	5	7	3	28	0,63	0,46
ETE-Norte	69	7	5	6	3	45	0,71	0,41
ETE-Gama	54	6	4	5	3	26	0,67	0,44
ETE-Santa Maria	29	15	4	14	10	26	0,27	0,67
ETE-Riacho Fundo	70	13	6	12	4	30	0,46	0,53
ETE-Melchior	56	34	24	28	6	99	0,71	0,43
ETE-Samambaia	30	19	14	14	4	63	0,72	0,43
ETE-Brazlândia	29	61	20	57	28	100	0,33	0,63
ETE-Alagado	67	14	3	13	8	29	0,21	0,72
ETE-Paranoá	30	141	32	139	49	203	0,23	0,71
ETE-Sobradinho	70	44	38	25	7	164	0,86	0,39
ETE-Planaltina	29	62	23	54	28	130	0,37	0,59
ETE-Vale do Amanhecer	31	22	7	23	9	36	0,32	0,63
ETE-São Sebastião	29	21	5	20	11	33	0,24	0,70
ETE-Recanto das Emas	29	36	12	38	14	52	0,33	0,62

Fonte: Autor (2025).

A Tabela 5 apresenta as estatísticas descritivas da Demanda Química de Oxigênio (DQO) efluente nas quinze ETEs. Essa variável expressa a quantidade total de matéria orgânica oxidável presente no esgoto tratado, constituindo um importante indicador da carga poluidora e da eficiência potencial do tratamento. Os parâmetros estatísticos — média, mediana, desvio padrão, valores mínimo e máximo, coeficiente de variação (CV) e coeficiente de confiabilidade (CDC) — foram calculados com base na metodologia proposta por Niku *et al.* (1979). A análise desses valores permite avaliar a representatividade e a dispersão dos dados, fornecendo suporte

para a interpretação da consistência das séries históricas e para as comparações entre as unidades estudadas.

Tabela 5– Estatísticas descritivas da DQO (mg/L⁻¹) afluyente nas 15 ETEs do Distrito Federal

Unidade de Tratamento	Número de Amostras	Média ($\bar{x}$)	Desvio Padrão (σ)	Mediana (Md)	Valor Mínimo	Valor Máximo	Coefficiente de Variação (CV)	Coefficiente de Confiabilidade (CDC)
		projeto						
ETE-Sul	70	30	14	27	14	116	0,47	0,53
ETE-Norte	70	34	7	33	22	65	0,21	0,72
ETE-Gama	56	31	11	26	18	63	0,35	0,60
ETE-Santa Maria	29	57	11	52	42	80	0,19	0,74
ETE-Riacho Fundo	70	13	6	12	4	30	0,33	0,62
ETE-Melchior	56	116	43	106	47	219	0,37	0,59
ETE-Samambaia	44	38	35	30	4	182	0,92	0,37
ETE-Brazlândia	56	261	55	258	145	380	0,21	0,73
ETE-Alagado	70	62	13	59	42	99	0,21	0,73
ETE-Paranoá	70	382	70	381	248	533	0,18	0,75
ETE-Sobradinho	70	117	72	81	45	351	0,61	0,46
ETE-Planaltina	70	201	38	197	124	312	0,19	0,75
ETE-Vale do Amanhecer	70	91	27	86	52	184	0,30	0,65
ETE- São Sebastião	70	82	23	78	48	185	0,28	0,66
Recanto das Emas	70	127	28	118	84	213	0,22	0,72

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 6 apresenta as estatísticas descritivas dos Sólidos Suspensos Totais (SST) efluentes nas ETEs operadas pela CAESB no Distrito Federal. Essa variável representa a fração de partículas sólidas presentes na amostra de esgoto e está diretamente associado à turbidez e à carga orgânica em suspensão, sendo determinante para a eficiência dos processos de

sedimentação e filtração. Os indicadores estatísticos — média, mediana, desvio padrão, valores mínimo e máximo, coeficiente de variação (CV) e coeficiente de confiabilidade (CDC) — foram calculados segundo a metodologia proposta por Niku *et al.* (1979).

Tabela 6– Estatísticas descritivas dos SST (mg/L⁻¹) afluentes nas 15 ETEs do Distrito Federal

Unidade de Tratamento	Número de Amostras	Média ($\bar{x}$) X projeto	Desvio Padrão (σ)	Mediana (Md)	Valor Mínimo	Valor Máximo	Coeficiente de Variação (CV)	Coeficiente de Confiabilidade (CDC)
ETE-Sul	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Norte	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Gama	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Santa Maria	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Riacho Fundo	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Melchior	56	65	29	61	22	161	0,45	0,54
ETE-Samambaia	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Brazlândia	56	116	40	115	26	193	0,34	0,61
ETE-Alagado	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Paranoá	70	184	44	381	248	533	0,24	0,70
ETE-Sobradinho	70	38	31	22	10	136	0,81	0,40
ETE-Planaltina	70	87	18	86	44	144	0,21	0,73
ETE-Vale do Amanhecer	70	28	14	26	5	70	0,50	0,51
ETE-São Sebastião	70	27	13	23	9	92	0,50	0,51
Recanto das Emas	70	45	11	44	22	67	0,24	0,70

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 7 apresenta as estatísticas descritivas das concentrações de Fósforo Total efluentes nas quinze ETEs operadas pela CAESB no Distrito Federal. O Fósforo é um nutriente essencial, porém seu excesso em corpos hídricos promove a eutrofização, o que reforça a importância do monitoramento dessa variável em sistemas de tratamento. Foram calculados,

assim como anteriormente, os valores de média, mediana, desvio padrão, mínimo, máximo, coeficiente de variação (CV) e coeficiente de confiabilidade (CDC), conforme metodologia de Niku *et al.* (1979). A análise estatística desses dados possibilita avaliar a variabilidade das concentrações de fósforo e a análise da confiabilidade.

Tabela 7– Estatísticas descritivas do PT (mg/L⁻¹) afluyente nas 15 ETes do Distrito Federal

Unidade de Tratamento	Número de Amostras	Média ($\bar{x}$) X projeto	Desvio Padrão (σ)	Mediana (Md)	Valor Mínimo	Valor Máximo	Coeficiente de Variação (CV)	Coeficiente de Confiabilidade (CDC)
ETE-Sul	70	0,3	0,1	0,2	0,1	0,8	0,33	0,62
ETE-Norte	70	0,3	0,2	0,3	0,2	1,1	0,67	0,44
ETE-Gama	68	0,9	0,6	0,7	0,1	2,9	0,67	0,44
ETE-Santa Maria	29	0,5	0,1	0,5	0,3	0,8	0,20	0,74
ETE-Riacho Fundo	70	0,4	0,2	0,4	0,2	0,9	0,5	0,51
ETE-Melchior	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Samambaia	67	1,7	1,0	1,4	0,3	5,1	0,59	0,46
ETE-Brazlândia	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Alagado	70	0,5	0,4	0,4	0,2	3,7	0,8	0,4
ETE-Paranoá	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Sobradinho	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Planaltina	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE-Vale do Amanhecer	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE- São Sebastião	-	-	-	-	-	-	-	-
Recanto das Emas	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Dando continuidade à análise de confiabilidade, a tabela 8 apresenta os resultados do cálculo do X meta (ou padrão), a partir dos CDCs calculados, para as variáveis DBO, DQO, SST e PT, nas 15 ETes do Distrito Federal. Esses valores são essenciais para complementar a

avaliação do desempenho das ETEs com base na metodologia proposta por Niku *et al.* (1979), a qual incorpora elementos de variabilidade estatística para além da simples análise de médias.

O X projeto, também denominado média amostral, corresponde à média das concentrações efluentes observadas em determinado período para cada variável avaliada e estão na terceira coluna nas tabelas da estatística descritiva. Esse valor representa o desempenho efetivo da estação em termos de qualidade do efluente.

Já o X meta (ou valor-padrão projetado) é determinado a partir da divisão entre o valor do X projeto (média) e o coeficiente de confiabilidade (CDC) previamente calculado para a respectiva variável. O X meta representa, portanto, a concentração limite teórica que permitiria à ETE atender de forma confiável, a 95%, à legislação ambiental, considerando a variabilidade dos dados observados. A interpretação desse valor auxilia na identificação da margem de segurança existente (ou não) entre o desempenho real e os limites legais, sendo um importante subsídio para o planejamento operacional e regulatório.

Essa abordagem está alinhada à proposta original de Niku *et al.* (1979), que define a confiabilidade como a probabilidade de um sistema manter seu desempenho dentro dos padrões estabelecidos, mesmo diante de oscilações operacionais e ambientais. Trabalhos mais recentes, como os de Oliveira (2006) e Silva *et al.* (2022), reforçam o uso do X meta como instrumento de gestão e controle de risco em sistemas de tratamento de esgotos, especialmente em contextos com alta variabilidade de cargas afluentes.

Confirmada a adequação dos dados à distribuição lognormal, por meio de testes estatísticos aplicados na etapa metodológica, foram então calculadas as confiabilidades para as variáveis analisadas. A confiabilidade foi expressa como a probabilidade de que os indicadores de qualidade dos efluentes atendam, de forma contínua, aos limites estabelecidos pela legislação ambiental. Para tanto, os valores de X meta foram comparados com os limites de lançamento previstos em legislações estaduais selecionadas, utilizadas neste estudo para fins didáticos e comparativos.

Cada uma das 15 ETEs foi avaliada individualmente, considerando seu tipo de tratamento e as variações operacionais ao longo do período estudado. A comparação entre os valores de X meta e os limites normativos permite identificar a consistência operacional das unidades frente aos padrões legais, além de indicar possíveis fragilidades estruturais e necessidades de intervenções técnicas.

A análise comparativa entre confiabilidade estatística e limites legais reforça a importância de indicadores que expressem não apenas o atendimento pontual às normas, mas

também a estabilidade do desempenho ao longo do tempo, especialmente diante de oscilações de carga e variação climática.

Nesse contexto, a análise de confiabilidade complementa a avaliação baseada apenas em eficiências médias ou na comparação direta com limites legais. Estudos como o de Djedou *et al.* (2013) ressaltam que parâmetros legais avaliados exclusivamente por valores médios podem não refletir adequadamente o desempenho real dos sistemas, uma vez que elevadas variabilidades podem resultar em ocorrências recorrentes de concentrações efluentes acima dos limites estabelecidos.

Tabela 8– Valores de X meta (ou padrão projetado) das variáveis DBO, DQO, SST e PT nas 15 ETEs do Distrito Federal e respectivos limites de referência das legislações ambientais

Unidades de Tratamento	Variáveis				Legislação de Referência
	DBO	DQO	SST	PT	
ETE-Sul	17,39	56,60	-	0,48	Resolução CEMA n° 70/2009 – PR, DBO, até 60 mg/L⁻¹
ETE-Norte	17,07	47,22	-	0,68	
ETE-Gama	13,64	51,67	-	2,05	
ETE-Santa Maria	22,39	77,03	-	0,68	Resolução CONAMA n° 430/2011, DBO, até 120 mg/L⁻¹
ETE-Riacho Fundo	24,53	20,97	-	0,78	
ETE-Melchior	79,07	196,61	120,37	-	
ETE-Samambaia	44,19	102,70	-	3,70	Resolução CEMA n° 70/2009 – PR, DQO, até 200 mg/L⁻¹
ETE-Brazlândia	96,83	357,03	190,16	-	
ETE-Alagado	19,44	84,93	-	1,25	
ETE-Paranoá	198,59	509,33	262,86	-	Resolução CONSEMA n°355/2017-RS, SST, até 100 mg/L⁻¹
ETE-Sobradinho	112,82	254,35	95,00	-	
ETE-Planaltina	105,08	268,00	119,18	-	
ETE-Vale do Amanhecer	34,92	140,00	54,90	-	Resolução COEMA n°02/2017-CE, PT, até 1 mg/L⁻¹
ETE-São Sebastião	30,00	124,24	52,94	-	
ETE-Recanto das Emas	58,06	176,39	64,29	-	

Fonte: Elaboração própria

Neste sentido, a utilização do X meta — valor estimado com base no coeficiente de confiabilidade (CDC) e na variabilidade amostral — oferece uma alternativa mais robusta para a definição de metas de desempenho. Djedou *et al.* (2013) ressaltam que os limites legais devem ser tecnicamente viáveis e baseados em análises estatísticas realistas, sob pena de

comprometer a efetividade regulatória e penalizar sistemas que operam sob condições extremas ou com concentrações afluentes acima dos valores típicos de projeto.

Os resultados obtidos para as variáveis DBO e DQO, apresentados na Figura 33, evidenciam a relação entre os valores estimados de X meta (95%) para cada ETE e os limites legais utilizados como referência. A análise conjunta desses indicadores permite observar o grau de estabilidade operacional das unidades e a margem de segurança frente aos padrões normativos.

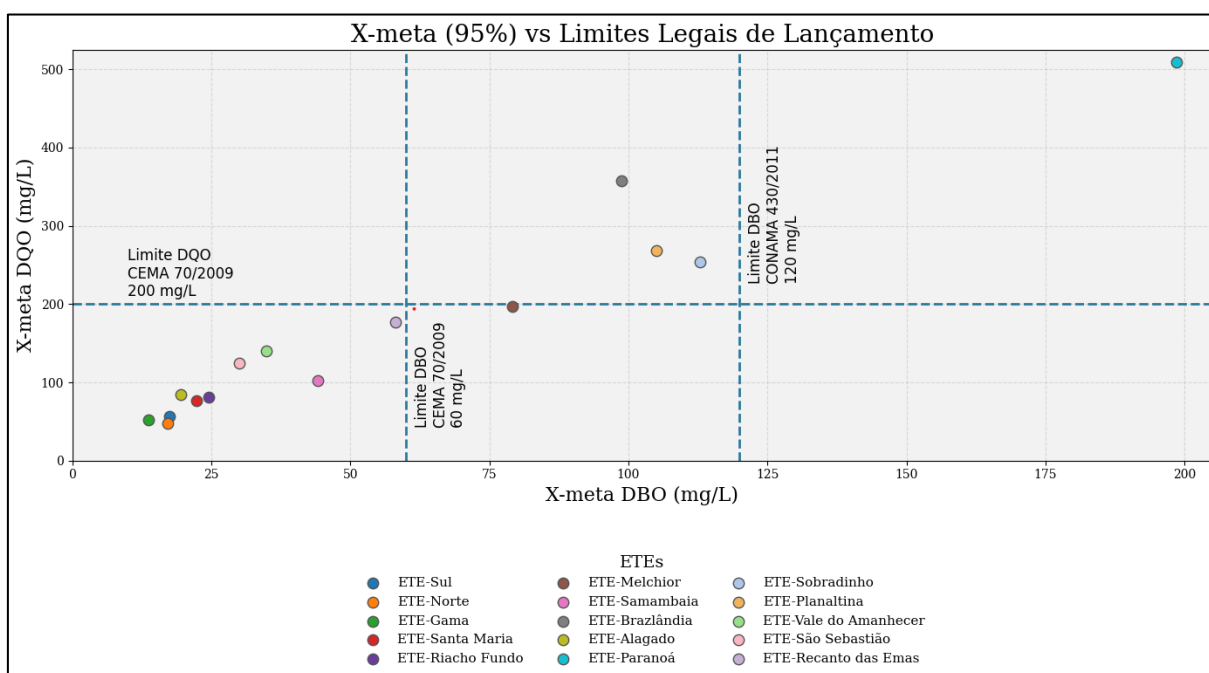


Figura 33- Relação entre os valores estimados de X-meta (95% de confiabilidade) para DBO e DQO nas 15 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do Distrito Federal e os limites legais de lançamento. As linhas tracejadas indicam os limites normativos de 200 mg/L para DQO (Resolução CEMA nº 70/2009 – PR), 120 mg/L para DBO (Resolução CONAMA nº 430/2011) e 60 mg/L para DBO (Resolução CEMA nº 70/2009 – PR).

Fonte: Autor

Da mesma forma, os resultados associados à variável SST, apresentados na Figura 34, permitem avaliar o comportamento da confiabilidade estatística em relação aos limites legais adotados. O X meta evidencia como a variabilidade dos dados influencia a probabilidade de atendimento contínuo aos padrões de lançamento.

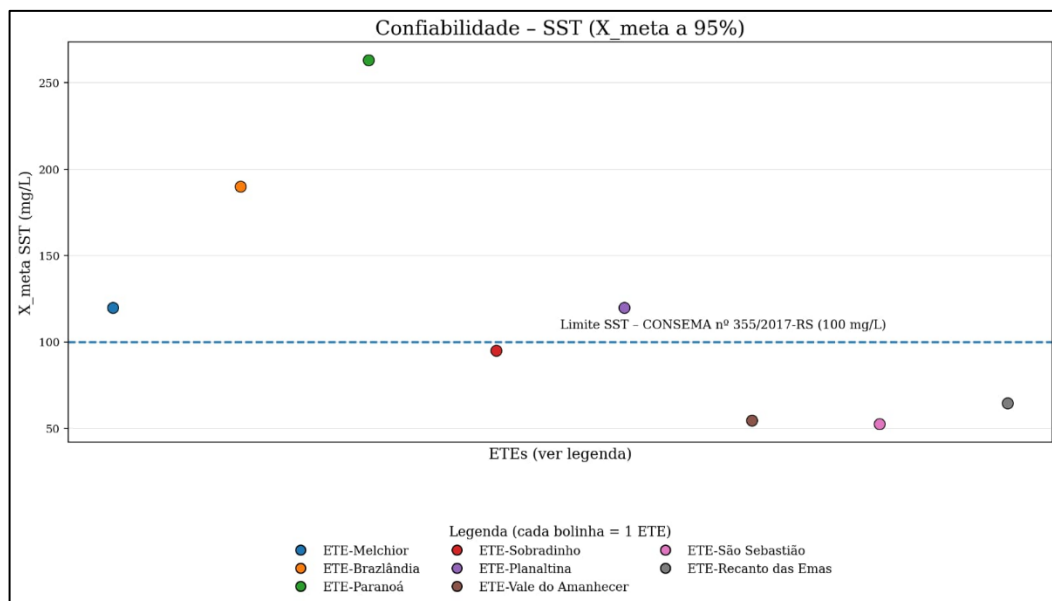


Figura 34 – Valores estimados de X meta (95% de confiabilidade) para Sólidos Suspensos Totais (SST) nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do Distrito Federal em comparação ao limite legal de lançamento.

Fonte: Autor

Para o fósforo total, os resultados de confiabilidade estão apresentados na Figura 35, permitindo visualizar o comportamento das diferentes ETEs frente ao limite normativo adotado para esse parâmetro. A análise conjunta desses resultados possibilita identificar diferenças entre os sistemas de tratamento quanto à estabilidade da remoção de nutrientes.

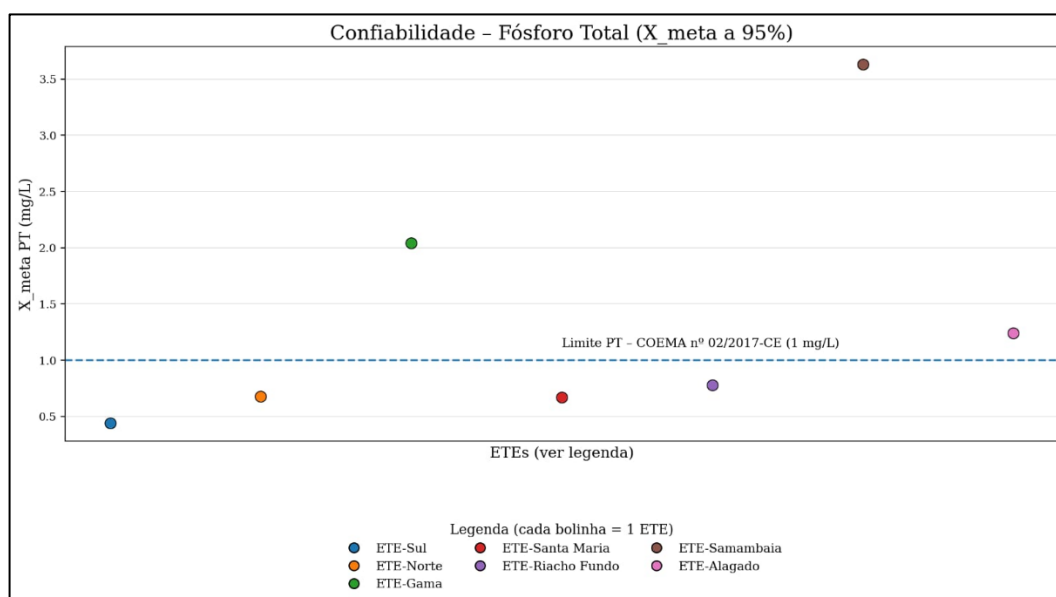


Figura 35 – Valores estimados de X meta (95% de confiabilidade) para Fósforo Total (PT) nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do Distrito Federal em comparação ao limite legal de lançamento.

Fonte: Autor

Cada uma das 15 ETEs foi avaliada individualmente, considerando seu tipo de tratamento e as variações operacionais ao longo do período estudado. A comparação entre os valores de X meta e os limites normativos permite identificar a consistência operacional das unidades frente aos padrões legais, além de indicar possíveis fragilidades estruturais ou necessidades de ajustes operacionais.

Os dados de confiabilidade associados aos tipos de tratamento empregados nas ETEs do Distrito Federal evidenciam a influência direta dos processos adotados sobre os coeficientes de variação (CV), os coeficientes de confiabilidade (CDC) e os valores projetados para atendimento aos padrões legais.

As ETE-Sul e ETE-Norte, por exemplo, que operam com sistemas de lodos ativados na configuração *Phoredox* (modificação do processo Bardenpho) de três estágios aliados ao polimento químico final, apresentaram desempenho consistente. Nessas unidades, os CDCs foram de 0,53 e 0,72 para DQO e 0,62 e 0,44 para PT, respectivamente, indicando estabilidade operacional e elevada conformidade com os padrões de lançamento.

Da mesma forma, a ETE-Riacho Fundo, que utiliza Reator em Batelada Sequencial (RBS) com adição de sulfato de alumínio, também apresentou resultados expressivos, com CDCs de 0,53 para DBO, 0,62 para DQO e 0,51 para PT, sugerindo que a combinação entre o processo biológico e a coagulação contribui para o controle da variabilidade e para o atendimento regular à legislação.

Em todas essas unidades supracitadas, os valores estimados de X meta, calculados com 95% de confiabilidade, permaneceram inferiores aos limites legais estaduais utilizados como referência: 60 mg/L para DBO e 200 mg/L para DQO (Resolução CEMA nº 70/2009 – PR) e 1 mg/L para fósforo total (Resolução COEMA nº 02/2017 – CE).

A ETE-Sobradinho, equipada com sistema de lodos ativados convencional, apresentou coeficientes de variabilidade elevados, principalmente para DBO (CV = 0,86) e SST (CV = 0,81). Essa condição refletiu-se em CDCs inferiores a 0,5 e, consequentemente, em valores de X meta para DBO e DQO superiores aos limites legais de referência. Para SST, entretanto, o valor estimado de X meta (95 mg/L) manteve-se dentro do limite de 100 mg/L estabelecido pela Resolução CONSEMA nº 355/2017 (RS).

As ETE-Brazlândia e ETE-Planaltina, que utilizam lagoas anaeróbias seguidas de lagoas facultativas, apresentaram baixa variabilidade ($CV \leq 0,37$) e CDCs superiores a 0,7 para DQO e SST, indicando relativa estabilidade do processo. Apesar disso, os valores de X meta excederam os limites legais para algumas variáveis, refletindo limitações associadas a sistemas naturais quando submetidos a cargas orgânicas mais elevadas.

Em contraste, ETE-Vale do Amanhecer, ETE-Melchior e ETE-Recanto das Emas apresentaram comportamentos distintos. A unidade do Vale do Amanhecer apresentou CDCs superiores a 0,5 em todas as variáveis, com X meta dentro dos limites legais mesmo com variabilidade moderada.

A ETE-Recanto das Emas apresentou desempenho semelhante, com baixos CVs, CDCs elevados e X metas compatíveis com os padrões legais, indicando controle operacional satisfatório da qualidade do efluente.

A ETE-Melchior, embora tenha apresentado maior variabilidade para DBO (CV = 0,71), manteve X projeto de 34 mg/L, valor inferior ao limite legal, e X meta de 79,07 mg/L, que excede levemente o padrão da Resolução CEMA, mas permanece dentro do limite da Resolução CONAMA nº 430/2011 (120 mg/L).

A ETE-Paranoá opera com afluentes de elevada carga orgânica, exigindo maior eficiência de tratamento. A ETE-Paranoá apresentou CVs baixos ($\leq 0,24$) e CDCs elevados ($\geq 0,70$), indicando elevada estabilidade do processo. Ainda assim, os valores estimados de X meta para DBO e DQO superaram os limites legais de referência.

A ETE-Santa Maria, por sua vez, apresentou baixo CV e CDCs superiores a 0,67 para todas as variáveis analisadas, mantendo os valores de X meta dentro dos limites legais mesmo diante de concentrações afluentes elevadas.

A ETE-Samambaia apresentou elevada variabilidade nos dados (CV = 0,92 para DQO), mas manteve X meta compatíveis com os limites legais para DBO e DQO. Para PT, entretanto, observou-se X meta de 3,70 mg/L, indicando necessidade de maior controle dessa variável.

A ETE-São Sebastião apresentou comportamento consistente em todas as variáveis analisadas, com CV $\leq 0,50$ e CDC superiores a 0,5, resultando em X meta inferiores aos limites legais adotados.

No caso da ETE-Gama, que opera com sistema *Phoredox* de cinco estágios com coprecipitação, observaram-se médias de 6 mg/L para DBO, 31 mg/L para DQO e 0,9 mg/L para PT. Embora os CVs tenham sido moderadamente elevados (0,67), os valores de X meta permaneceram dentro dos limites legais para DBO e DQO, enquanto o PT apresentou X meta de 2,05 mg/L, superior ao limite estadual adotado para comparação.

A ETE-Alagado apresentou baixos CVs para DBO e DQO (0,21), CDCs elevados (0,72 e 0,73) e X metas abaixo dos limites legais para esses parâmetros. Para PT, entretanto, observou-se CV de 0,80, CDC de 0,40 e X meta de 1,25 mg/L, valor superior ao limite de 1 mg/L.

A comparação entre os valores médios observados (X projeto) e os valores estimados com 95% de confiabilidade (X meta) para DBO, DQO, SST e PT, sintetizada nas Figuras 33,

34 e 35, evidencia diferentes níveis de estabilidade operacional entre as 15 ETEs analisadas. A metodologia proposta por Niku *et al.* (1979) permite incorporar a variabilidade estatística dos dados, fornecendo uma perspectiva mais abrangente sobre o atendimento aos padrões de lançamento.

Os resultados apresentados nas seções anteriores, referentes às concentrações afluentes, à eficiência de remoção de poluentes nos períodos seco e chuvoso e à análise de confiabilidade estatística dos processos de tratamento, permitem observar diferentes padrões de desempenho entre as 15 ETEs do Distrito Federal. A análise conjunta desses resultados possibilita examinar as variações operacionais e estruturais verificadas entre as unidades avaliadas.

No que se refere às concentrações afluentes, os dados indicaram que diversas ETEs recebem esgotos com características superiores às faixas frequentemente descritas na literatura técnica para esgotos domésticos típicos, particularmente para DBO, DQO e fósforo total. Concentrações afluentes mais elevadas estão associadas à necessidade de maior capacidade de degradação biológica e maior controle operacional para manutenção do desempenho esperado. Situações semelhantes são relatadas em estudos que descrevem discrepâncias entre as características reais dos esgotos afluentes e os valores frequentemente considerados em parâmetros de projeto ou referências técnicas (DJEEEDOU *et al.*, 2013; OLIVEIRA; von SPERLING, 2007).

A análise da eficiência de remoção de poluentes nos períodos seco e chuvoso evidenciou variações associadas às condições hidrológicas. Sistemas baseados em processos naturais, como lagoas anaeróbias e facultativas, apresentaram maior sensibilidade às alterações de vazão e carga orgânica observadas durante a estação chuvosa. Esse comportamento foi mais perceptível na variável SST, que responde de forma mais direta às alterações hidráulicas do sistema, como diluição e redução do tempo de detenção hidráulica.

Os gráficos *boxplot* apresentados anteriormente também apontaram variações entre os períodos seco e chuvoso em algumas unidades. A ETE-Brazlândia, por exemplo, apresentou redução na eficiência de remoção de SST durante o período chuvoso, com médias inferiores a 25%. Situação semelhante foi observada na ETE-Paranoá, que apresentou eficiência de remoção de SST no período chuvoso (com redução de 57,8% no período seco para 51,4% no período chuvoso). Essas variações são compatíveis com alterações hidráulicas e operacionais observadas em sistemas de tratamento durante períodos de maior precipitação.

Para avaliar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os períodos seco e chuvoso, foi aplicado o teste de *Kolmogorov-Smirnov* (K-S) às distribuições de eficiência de remoção. Os resultados indicaram diferença estatisticamente significativa apenas para a

variável SST nos sistemas naturais, com $p = 0,038$, ao nível de significância de 5%, indicando alteração na distribuição das eficiências entre os períodos seco ($n = 161$) e chuvoso ($n = 175$). Para as demais variáveis e tecnologias analisadas, os valores de p permaneceram superiores a 0,05, não permitindo rejeitar a hipótese nula de igualdade das distribuições.

Esse comportamento é compatível com o funcionamento hidráulico de sistemas naturais de tratamento, nos quais alterações na vazão influenciam diretamente processos de sedimentação e retenção de sólidos. Estudos sobre lagoas de estabilização indicam que variações no regime hidráulico podem afetar a eficiência de remoção de sólidos suspensos, especialmente em períodos de maior carga hidráulica (MARA, 2004; TCHOBANOGLIOUS et al., 2014).

Para examinar as diferenças observadas entre as ETEs, as unidades foram agrupadas em três categorias tecnológicas, considerando as características predominantes de seus processos de tratamento. O primeiro grupo corresponde aos sistemas mecanizados baseados em lodos ativados e suas variações, incluindo as ETE-Sul, ETE-Norte, ETE-Gama, ETE-Sobradinho, ETE-Riacho Fundo, ETE-Melchior e ETE-Recanto das Emas. O segundo grupo reúne sistemas naturais com polimento químico final, representados pelas ETE-Samambaia, ETE-Santa Maria e ETE-Alagado. Por fim, o terceiro grupo compreende sistemas naturais, nos quais se enquadram as ETE-Brazlândia, ETE-Paranoá, ETE-Planaltina, ETE-Vale do Amanhecer e ETE-São Sebastião.

A análise por grupo mostrou que as ETEs do primeiro grupo apresentaram, em geral, maiores percentuais de remoção de DBO e DQO, além de menor variação nos valores de SST e PT entre os períodos seco e chuvoso. Já os sistemas naturais apresentaram maior dispersão dos dados e maior variação de desempenho entre os períodos analisados.

A incorporação da análise de confiabilidade estatística, utilizando a metodologia proposta por Niku *et al.* (1979), acrescentou um componente adicional à interpretação dos resultados. A aplicação dos coeficientes de variação (CV), dos coeficientes de desempenho de conformidade (CDC) e dos indicadores X projeto e X meta permitiu examinar a relação entre os valores médios obtidos e a probabilidade de atendimento contínuo aos limites legais de lançamento. Em algumas situações, parâmetros com médias dentro dos padrões normativos apresentaram valores de X meta superiores aos limites legais, refletindo a influência da variabilidade nos dados operacionais.

Entre as unidades analisadas, as ETE-Norte, ETE-Sul, ETE-Santa Maria e ETE-Gama apresentaram valores de X projeto e X meta para DBO e DQO inferiores aos limites legais, considerando uma confiabilidade de 95%. Essas unidades utilizam sistemas mecanizados com

configurações mais complexas, incluindo variações do processo *Phoredox*, combinadas com etapas de polimento químico final, o que está associado a maior estabilidade operacional.

Em contraste, unidades baseadas em lagoas facultativas ou reatores anaeróbios seguidos de lagoas, como as ETE-Planaltina, ETE-Brazlândia e ETE-Paranoá, apresentaram valores de X meta superiores aos limites legais em algumas variáveis, refletindo maior variabilidade nos resultados obtidos.

Discussões semelhantes aparecem na literatura técnica sobre a adequação dos padrões de lançamento adotados em legislações ambientais. Oliveira e von Sperling (2007) descrevem que padrões fixos podem não representar adequadamente as condições operacionais de sistemas reais de tratamento. De forma semelhante, Djedou *et al.* (2013) observam que avaliações baseadas apenas em valores médios não consideram a variabilidade inerente aos processos biológicos e sugerem o uso de critérios baseados em confiabilidade estatística.

A aplicação da metodologia proposta por Niku *et al.* (1979) permite incorporar essa variabilidade na análise do desempenho das ETEs, considerando explicitamente a dispersão dos dados operacionais. Nesse contexto, o indicador X meta expressa a relação entre variabilidade estatística e probabilidade de atendimento aos padrões legais.

Essas observações também se relacionam com discussões sobre resiliência de sistemas de saneamento frente às mudanças climáticas, tema associado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, particularmente o ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

5 PRODUTO TÉCNICO

O produto técnico consiste na sistematização aplicada dos resultados obtidos nesta pesquisa, com o propósito de demonstrar como a análise integrada do desempenho de ETEs pode contribuir para o aprimoramento da gestão do saneamento e para o fortalecimento dos instrumentos de gestão de recursos hídricos. Nos programas de pós-graduação de natureza profissional, espera-se que os produtos técnicos apresentem caráter aplicado e potencial de utilização prática em contextos institucionais ou no setor público, constituindo instrumentos capazes de contribuir para a solução de problemas reais da área de atuação do pesquisador (UNB, 2023).

Com base na avaliação de quinze ETEs localizadas no Distrito Federal, foram analisadas variáveis representativas da qualidade do esgoto sanitário —DBO, DQO, SST e PT — considerando três dimensões de desempenho: eficiência de remoção de poluentes e influência da sazonalidade, confiabilidade operacional e concentrações afluentes dos processos de tratamento. Essa abordagem articula fundamentos teóricos e análise empírica, refletindo a expectativa de que os produtos técnicos resultem da integração entre conhecimento científico e prática profissional (UNB, 2023).

A abordagem adotada amplia a avaliação tradicional do desempenho das ETEs, frequentemente baseada apenas em médias de eficiência, ao incorporar aspectos relacionados à variabilidade operacional e à probabilidade de atendimento contínuo aos padrões ambientais, além de trazer ferramentas gráficas úteis para o monitoramento de ETEs. Dessa forma, o produto técnico busca contribuir para o aprimoramento das práticas profissionais e para a geração de informações capazes de subsidiar processos de monitoramento e tomada de decisão no setor de saneamento, em consonância com a expectativa de que os produtos técnicos gerem impactos concretos nas organizações e nas atividades profissionais em que são aplicados (UNB, 2023).

A partir dos resultados obtidos, destaca-se o potencial de consolidação dessas análises em formato de relatório técnico ou guia orientativo, com aplicação prática no contexto de operadores e gestores de sistemas de saneamento. Tal produto poderia sistematizar diretrizes para avaliação de desempenho de ETEs, interpretação de indicadores de eficiência e confiabilidade, bem como apoiar a definição de estratégias operacionais e regulatórias. Essa possibilidade reforça o caráter aplicado da pesquisa e sua aderência às diretrizes da pós-graduação profissional, ao evidenciar a capacidade de transformação dos resultados científicos

em instrumentos de apoio à gestão e à tomada de decisão no setor de saneamento (CAPES, 2019; UNB, 2023).

A consolidação dos resultados desta pesquisa foi acompanhada de sua difusão em eventos científicos da área de saneamento ambiental, contribuindo para a validação técnica e para a disseminação do conhecimento produzido. Nos programas de pós-graduação profissionais, espera-se que os produtos técnicos extrapolem o âmbito acadêmico e promovam a difusão do conhecimento gerado, ampliando seu alcance e potencial de aplicação no meio profissional e institucional (CAPES, 2019). Nesse contexto, a divulgação dos resultados em eventos técnicos da área de saneamento constituiu etapa importante para compartilhar as análises desenvolvidas e estimular o debate técnico-científico sobre o desempenho de estações de tratamento de esgotos.

Resultados parciais da pesquisa foram apresentados inicialmente no 7º Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis, realizado em Porto Alegre no ano de 2023, ocasião em que foi discutida a avaliação do desempenho e da confiabilidade operacional da ETE-Melchior. Posteriormente, com a ampliação da análise para um conjunto mais abrangente de estações de tratamento do Distrito Federal, os resultados foram apresentados no 33º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – FITABES 2025, promovido pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), por meio do trabalho intitulado Avaliação da Confiabilidade Operacional e Desempenho de Estações de Tratamento de Esgoto no Distrito Federal. A divulgação desses resultados contribui para a circulação do conhecimento técnico produzido e para o compartilhamento de metodologias aplicáveis à gestão e operação de sistemas de saneamento, aspecto valorizado na produção técnica e tecnológica da pós-graduação (CAPES, 2019).

Parte dos resultados relacionados à eficiência de remoção de poluentes e à influência da sazonalidade no desempenho das ETEs também foi apresentada no 53º Congresso Nacional de Saneamento Básico da ASSEMAE, realizado em 2025 no município de Caldas Novas, Goiás. A participação nesses eventos reforça o compromisso com a disseminação do conhecimento gerado pela pesquisa e amplia as possibilidades de discussão e aplicação dos resultados no contexto profissional do setor de saneamento.

O produto técnico desenvolvido nesta pesquisa atende às diretrizes estabelecidas para a pós-graduação profissional ao transformar os resultados da investigação científica em uma abordagem metodológica aplicável à avaliação do desempenho de estações de tratamento de esgotos. Conforme orientações da CAPES e da Universidade de Brasília, espera-se que os produtos técnicos apresentem aplicabilidade prática, integração entre conhecimento científico

e prática profissional, potencial de replicação e capacidade de gerar impacto no campo de atuação do pesquisador (CAPES, 2019; UNB, 2023).

Nesse sentido, a metodologia proposta sistematiza ferramentas analíticas que integram a avaliação da eficiência de remoção de poluentes, a análise da influência da sazonalidade e a aplicação de indicadores de confiabilidade estatística, oferecendo subsídios técnicos para o monitoramento e para a tomada de decisão na gestão de sistemas de saneamento.

Além de atender às expectativas institucionais da pós-graduação profissional, o produto técnico apresenta aderência direta à área de concentração do Programa ProfÁgua, voltada aos Instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos. A análise integrada do desempenho das estações de tratamento de esgotos pode gerar informações relevantes para instrumentos como o enquadramento de corpos hídricos, os planos de recursos hídricos e os sistemas de informação sobre recursos hídricos, ao permitir avaliar de forma mais consistente a qualidade dos efluentes lançados nos corpos receptores e sua relação com as metas de qualidade da água estabelecidas para as bacias hidrográficas.

Sob essa perspectiva, a abordagem metodológica proposta dialoga com a linha de pesquisa voltada ao desenvolvimento de ferramentas e metodologias aplicadas à gestão de recursos hídricos. A utilização de dados de monitoramento operacional das ETEs associada à aplicação de indicadores de variabilidade e confiabilidade estatística amplia a capacidade de interpretação dos dados operacionais e pode contribuir para apoiar gestores públicos e operadores de sistemas de saneamento na identificação de padrões de desempenho e na definição de estratégias de melhoria operacional.

Dessa forma, o produto técnico resultante desta pesquisa configura-se como uma ferramenta metodológica de apoio à avaliação do desempenho de estações de tratamento de esgotos e à gestão da qualidade da água em bacias hidrográficas, contribuindo para o aprimoramento das práticas de monitoramento, para o fortalecimento da integração entre saneamento e gestão de recursos hídricos e para a implementação dos instrumentos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação teve como objetivo avaliar o desempenho de 15 ETEs do Distrito Federal por meio de uma abordagem integrada, considerando as características das concentrações afluentes, a influência da sazonalidade sobre a eficiência de remoção de poluentes e a confiabilidade estatística no atendimento aos padrões legais de lançamento para DBO, DQO, SST e PT.

A análise das concentrações afluentes permitiu concluir que, em grande parte das ETEs avaliadas, os valores de DBO, DQO, SST e PT apresentam-se frequentemente superiores às faixas típicas reportadas para esgotos domésticos na literatura. De modo geral, verificou-se elevada frequência de amostras acima dos valores de referência, evidenciando que diversas unidades operam sob condições de carga orgânica e de sólidos superiores às tradicionalmente consideradas em parâmetros de projeto. Destacam-se, nesse contexto, unidades como a ETE-Santa Maria, que apresentou 99% das amostras de DBO e 100% de DQO acima das concentrações típicas, e a ETE-Planaltina, na qual se observaram percentuais de 100% de amostras acima das faixas de referência para ambos os parâmetros.

Esse comportamento também se confirma nas faixas de concentração observadas nas séries históricas analisadas, que em diversos casos ultrapassam os intervalos clássicos descritos para esgotos domésticos. Como exemplo, na ETE-Planaltina registraram-se concentrações afluentes de DBO entre 502 e 807 mg/L e de DQO entre 950 e 1362 mg/L, enquanto na ETE-Santa Maria a DQO variou entre 819 e 1331 mg/L, valores significativamente superiores às faixas de referência frequentemente citadas na literatura técnica. À luz desses resultados, conclui-se que parte das ETEs do Distrito Federal tem operado sob condições de afluência mais concentradas do que aquelas usualmente consideradas em parâmetros clássicos de projeto.

Observa-se, entretanto, que algumas dessas unidades mantêm elevados níveis de eficiência de remoção mesmo sob condições de maior carga orgânica, o que evidencia a robustez operacional dos sistemas de tratamento. Esse comportamento é particularmente observado em unidades com tecnologias mais estruturadas, como ETE-Sul, ETE-Norte, ETE-Gama e ETE-Santa Maria, que apresentaram eficiências de remoção de DBO e DQO superiores a 94%, demonstrando capacidade de manter desempenho elevado mesmo diante de afluentes mais concentrados. Esses resultados reforçam a importância do monitoramento sistemático das características do esgoto afluente e indicam que a análise de desempenho das ETEs deve considerar não apenas os valores de eficiência, mas também as condições reais de concentração afluente às quais os sistemas estão submetidos.

A análise da eficiência de remoção considerando os períodos seco e chuvoso permitiu concluir que o desempenho das ETEs do Distrito Federal apresenta comportamento distinto conforme o tipo de tecnologia empregada. De modo geral, as unidades baseadas em processos mecanizados de lodos ativados e variações demonstraram elevados níveis de eficiência e maior estabilidade operacional entre os períodos sazonais, com medianas de remoção de DBO e DQO próximas ou superiores a 94% em ambos os períodos e variações relativamente reduzidas entre seca e chuva. Esse comportamento indica maior resiliência desses sistemas frente às oscilações hidrológicas associadas à sazonalidade.

Nas unidades classificadas como sistemas naturais com polimento final, também se observaram elevados níveis de eficiência para DBO e DQO, com medianas superiores a 93% nos dois períodos analisados. As ETEs baseadas em sistemas naturais, quando estudadas agrupando as unidades de tratamento, apresentaram maior variabilidade nos resultados de eficiência, especialmente para os parâmetros DQO e SST. Nessas unidades, observou-se maior amplitude dos valores de eficiência e presença de resultados mais baixos em algumas situações, apontando maior sensibilidade dessas tecnologias às variações hidráulicas e de carga orgânica associadas aos períodos climáticos.

A análise estatística por meio do teste de *Kolmogorov-Smirnov* corroborou essas observações ao indicar que, entre todas as combinações avaliadas de tecnologia e parâmetro, apenas a variável SST nos sistemas naturais apresentou diferença estatisticamente significativa entre os períodos seco e chuvoso. Para as demais variáveis e tecnologias, os valores de p permaneceram superiores ao nível de significância adotado, indicando que as diferenças observadas entre os períodos não foram estatisticamente significativas.

Dessa forma, conclui-se que, embora a sazonalidade possa influenciar a dispersão dos resultados operacionais, especialmente em sistemas naturais, o efeito estatístico dessa variação foi limitado à remoção de SST nesse grupo tecnológico. Em contraste, os sistemas mecanizados baseados em lodos ativados e, em menor grau, os sistemas naturais com polimento final demonstraram maior estabilidade frente às variações sazonais, evidenciando maior robustez operacional dessas configurações de tratamento.

A análise de confiabilidade operacional permitiu concluir que a consideração da variabilidade dos dados é fundamental para avaliar de forma mais realista o desempenho das estações de tratamento de esgoto. De modo geral, verificou-se que, embora diversas ETEs apresentem médias de concentração efluente compatíveis com os limites legais, a análise probabilística baseada no indicador X-meta, considerando nível de confiabilidade de 95%,

revelou que nem todas as unidades apresentam a mesma probabilidade de atendimento contínuo aos padrões ambientais.

A comparação entre os valores de X-meta e os limites legais estabelecidos na Resolução CONAMA nº 430/2011, bem como nas normas estaduais utilizadas como referência comparativa — Resolução CEMA nº 70/2009 (PR), Resolução CONSEMA nº 355/2017 (RS) e Resolução COEMA nº 02/2017 (CE) — permitiu concluir que as ETEs com processos mecanizados, como ETE-Sul, ETE-Norte, ETE-Gama e ETE-Santa Maria, apresentam maior confiabilidade no atendimento aos padrões de lançamento, evidenciando maior estabilidade operacional.

Por outro lado, algumas unidades apresentaram valores de X-meta superiores aos limites normativos para determinadas variáveis, indicando menor confiabilidade estatística no atendimento contínuo aos padrões ambientais. Esse comportamento foi observado principalmente em estações baseadas em sistemas naturais, como ETE-Paranoá, ETE-Brazlândia e ETE-Planaltina.

Resultados semelhantes foram observados para SST e PT, nos quais determinadas ETEs apresentaram valores de X-meta superiores aos limites de referência utilizados na análise, evidenciando que a variabilidade operacional pode influenciar a probabilidade de atendimento contínuo aos padrões de lançamento.

Por fim, os resultados desta pesquisa indicam oportunidades para o desenvolvimento de estudos futuros relacionados ao reaproveitamento seguro de efluentes tratados no Distrito Federal.

Nesse contexto, os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que o diagnóstico do desempenho das ETEs também pode subsidiar discussões sobre o potencial de reuso não potável de efluentes tratados no Distrito Federal. A articulação entre os indicadores de desempenho observados e as oportunidades de reaproveitamento do efluente tratado constitui uma linha promissora para estudos futuros voltados ao uso seguro desse recurso, especialmente em aplicações agrícolas. A literatura destaca que o reuso de efluentes tratados pode contribuir para a mitigação da escassez hídrica e para o aproveitamento de nutrientes presentes no efluente, desde que observados critérios técnicos e sanitários adequados (WHO, 2006). No contexto regional, discussões recentes também apontam oportunidades e desafios para a implementação de práticas de reuso no Distrito Federal (CARNEIRO; WERNECK; FELIZATTO, 2025).

Ao mesmo tempo, os resultados obtidos nesta dissertação indicam que unidades baseadas em sistemas naturais podem representar campo relevante para investigações complementares relacionadas ao potencial de reuso agrícola de efluentes tratados. Nesse

contexto, a ETE-Brazlândia merece destaque, não apenas por utilizar sistema natural de tratamento, mas também por estar localizada em uma região tradicionalmente caracterizada por atividade agrícola relevante no Distrito Federal, com produção significativa de hortaliças e frutas destinada ao abastecimento regional (EMATER-DF, 2020). Essa condição territorial pode tornar o efluente tratado potencialmente relevante para estudos futuros voltados ao reuso em irrigação, especialmente considerando que, nos resultados observados, a estação apresentou remoção consistente de matéria orgânica e sólidos suspensos, ainda que com maior variabilidade operacional em comparação a sistemas mecanizados.

Dessa forma, investigações futuras poderiam avaliar de forma mais aprofundada o potencial agrônomo desse efluente, bem como sua segurança sanitária, incluindo a análise de parâmetros microbiológicos, como a presença de ovos de helmintos, amplamente utilizados como indicador de risco em diretrizes internacionais de reuso agrícola (WHO, 2006; JIMÉNEZ, 2007). Assim, espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para o aprimoramento da gestão e do planejamento dos sistemas de tratamento de esgotos no Distrito Federal, fortalecendo estratégias voltadas à segurança hídrica e à sustentabilidade ambiental.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADASA – AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL. Plano de gerenciamento integrado de recursos hídricos do Distrito Federal. Brasília: ADASA, 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Atlas Esgotos: despoluição de bacias hidrográficas*. Brasília: ANA, 2017.
- AGÊNCIA SENADO. *Senado aprova empréstimo de 50 milhões de euros para saneamento no DF*. Brasília: Senado Federal, 2024. Disponível em: *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Nova York: ONU, 2015.
- AGHDAM, E. F. et al. Predicting quality parameters of wastewater treatment plants using artificial intelligence techniques. *Journal of Cleaner Production*, v. 405, 2023.
- AIB, H. et al. Evaluating the efficiency of wastewater treatment plants in the Northern Hungarian Plains using physicochemical and microbiological parameters. *Water*, v. 16, 3590, 2024.
- AISSE, Miguel Mansur; LOBATO, Lucas Carvalho S.; CHERNICHARO, Carlos Augusto Lemos. Anaerobic sewage treatment in Brazil: overview and perspectives. *Water Science and Technology*, v. 77, n. 3, p. 708–719, 2018.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual. Brasília: ANA, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES). *Ranking da Universalização do Saneamento – Edição 2021*. São Paulo: ABES, 2021.
- BAIRD, C. *Química Ambiental*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- BALLARIN, A. S.; WENDLAND, E.; ZAERPOUR, M.; HATAMI, S.; MEIRA NETO, A. A.; PAPALEXIOU, S. M. Frequency rather than intensity drives projected changes of rainfall events in Brazil. *Earth's Future*, Hoboken, v. 12, n. 1, p. e2023EF004053, 2024.
- BELTRÃO, Daniel Augusto Santos Prates. Remoção de fósforo no efluente da Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte. 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2023.
- BENTO, A. P. N. et al. Caracterização do lodo ativado: aspectos microbiológicos e implicações operacionais. *Revista DAE*, v. 53, n. 176, p. 34–45, 2005.

- BERTHOUEX, P. M.; HUNTER, W. G. Data variability and environmental statistics. *Journal of Environmental Engineering*, v. 109, n. 3, p. 556–576, 1983.
- BERTHOUEX, Paul M.; HUNTER, William G. Use of statistical methods in environmental engineering. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1983.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do CONAMA. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, n. 92, p. 89–91, 16 maio 2011.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2023. Brasília: SNIS, 2023.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2023 (dados de 2022)*. Brasília: MDR, 2024.
- CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. *Caesb investirá R\$ 3,2 bilhões até 2029*. Brasília: CAESB, 2024. Disponível em: <https://www.caesb.df.gov.br/caesb-investira-r-32-bilhoes-ate-2029>. Acesso em: 30 out. 2025.
- CAESB – COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL. Relatório de sustentabilidade 2021. Brasília: CAESB, 2021.
- CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Dados operacionais das estações de tratamento de esgotos do Distrito Federal. Brasília: CAESB, 2024.
- CAESB – COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL. Relatório anual de qualidade da água e desempenho operacional dos sistemas de esgotamento sanitário do Distrito Federal. Brasília: CAESB, 2023.
- CAPES. Produção técnica e tecnológica na pós-graduação. Brasília: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, 2019.
- CARNEIRO, Gustavo Antonio; WERNECK, Rodrigo Oliveira; FELIZATTO, Mauro Roberto. *Reúso de água na agricultura irrigada no DF: desafios e oportunidades*. In: XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2025, Vitória – ES. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2025.
- CARVALHO, J. B. Caracterização hidroambiental da bacia do rio São Bartolomeu no Distrito Federal. Brasília: Universidade de Brasília, 2005.
- CEARÁ. Conselho Estadual do Meio Ambiente (COEMA). *Resolução nº 02, de 21 de dezembro de 2017*. Dispõe sobre os padrões de lançamento de efluentes líquidos

no Estado do Ceará. *Diário Oficial do Estado do Ceará*, Fortaleza, CE, 22 dez. 2017.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2007.

CHERNICHARO, Carlos Augusto Lemos et al. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges in Brazil. *Water Science and Technology*, v. 67, n. 11, p. 2525–2534, 2013.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL (CAESB). *Estação de Tratamento de Esgoto Sul – Processo Phoredox*. Brasília: CAESB, 2017. (Documento interno técnico).

CONOVER, William J. *Practical nonparametric statistics*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

CORREIO BRAZILIENSE. *Caesb assina contrato de R\$ 312 milhões com banco alemão para saneamento*. Brasília: Correio Braziliense, 2024. Disponível em: <https://www.correio braziliense.com.br/economia/2024/05/5073187-caesb-assina-contrato-de-r-312-milhoes-com-banco-alemao-para-saneamento.html>. Acesso em: 30 out. 2025.

COSTA, J. M. F.; SILVEIRA, C. S.; COSTA, A. C.; MARCOS JUNIOR, A. D.; GONÇALVES, S. T. N. Trend analysis of precipitation extremes in Brazil: the role of atmospheric temperature. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, São Paulo, v. 60, e2123, 2025.

DEAN, R. B.; FORSYTHE, G. B. Assessing the reliability of effluent quality data. *Journal Water Pollution Control Federation*, v. 48, n. 3, p. 600–606, 1976a.

DEAN, R. B.; FORSYTHE, G. B. Effluent variability and compliance. *Journal Water Pollution Control Federation*, v. 48, n. 9, p. 2152–2160, 1976b.

DEAN, R. B.; FORSYTHE, S. L. Estimation of reliability of wastewater treatment plants. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, Washington, v. 48, n. 3, p. 439–452, 1976.

DJEDDOU, M.; ACHOUR, B.; MARTAUD, M. Determination and analysis of daily reliability level of municipal wastewater treatment plant. *Courrier du Savoir*, n. 17, p. 39–46, 2013.

DJEEDOU, B. et al. Reliability analysis of wastewater treatment plant performance. *Journal of Environmental Management*, v. 114, p. 205–212, 2013.

- DO CARMO, R. L.; LIMA, A. C.; RODRIGUES, L. N. et al. Avaliação hidrológica da bacia do rio Descoberto no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 26, 2021.
- EMATER-DF – EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO DISTRITO FEDERAL. *Produção agrícola no Distrito Federal*. Brasília: EMATER-DF, 2020.
- FEINDT, P. H. Gestão de recursos hídricos na bacia do rio Corumbá. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2006.
- FERRANTE, J. E.; OLIVEIRA, E. C.; COSTA, M. P. et al. Estudo limnológico do Lago Paranoá. Brasília: Universidade de Brasília, 2001.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). Manual de saneamento. 4. ed. Brasília: FUNASA, 2015.
- GIBBONS, Jean Dickinson; CHAKRABORTI, Subhabrata. Nonparametric statistical inference. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- GONÇALVES, R. F. *Impactos Ambientais Urbanos*. São Paulo: Rima, 2003.
- GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL (GDF). *Relatório 2: Padrão de Emissões das Diferentes Áreas do DF: Avaliação de Emissões de Gases de Efeito Estufa de Ações Governamentais*. Brasília: IPEDF/Codeplan, 2024.
- HELSEL, Dennis R.; HIRSCH, Robert M. Statistical methods in water resources. Techniques of Water-Resources Investigations, Book 4, Chapter A3. Reston: U.S. Geological Survey, 2002. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/twri/twri4a3/> Acesso em: fev. 2026.
- <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/04/17/senado-aprova-emprestimo-de-50-milhoes-de-euros-para-saneamento-no-df>. Acesso em: 30 out. 2025.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.
- IDE, Willian Ribeiro et al. Uso da flotação por ar dissolvido (FAD) para colheita de microalgas presentes em lagoas de polimento. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v. 9, n. 1, p. 125–138, 2016.
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Normais climatológicas do Brasil 1991–2020: Distrito Federal*. Brasília: INMET, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inmet/>. Acesso em: 4 out. 2025.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

- IPEDF – INSTITUTO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA DO DISTRITO FEDERAL. Indicadores urbanos e ambientais do Distrito Federal: expansão urbana e impermeabilização do solo. Brasília: IPEDF, 2024. Disponível em: <<https://www.ipe.df.gov.br/>>. Acesso em: 13 mar. 2026.
- JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2005.
- JIMÉNEZ, B. Helminth ova removal from wastewater for agriculture and aquaculture reuse. *Water Science and Technology*, v. 55, n. 1-2, p. 485-493, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2007.046>
- LAPOLLI, F. R. *Avaliação de sistemas de lodos ativados com diferentes tempos de aeração e idades do lodo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.
- LIBÂNIO, M. *Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água*. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010.
- LIMA, Carlos Eduardo Pacheco et al. Clima, morfometria e erosividade em unidade hidrográfica do Cerrado do DF: implicações socioambientais e direitos difusos. *Revista Aracê, São José dos Pinhais*, v. 7, n. 7, p. 39480–39503, 2025. DOI: <https://doi.org/10.56238/arev7n7-250>.
- MARA, Duncan. *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. London: Earthscan Publications, 2004. 310 p.
- MAYNARD, H.; THOMAS, J.; CHAN, P. Wastewater Stabilization Pond Performance in the United States. *Water Environment Research*, v. 71, n. 2, p. 205–212, 1999.
- MEDEIROS, G. T. et al. Avaliação da eficiência de remoção de poluentes em estações de tratamento de esgoto por lagoas de estabilização no semiárido brasileiro. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 5, p. 865–874, 2017.
- MENDONÇA, R. F. Lagoas de estabilização no Brasil: desempenho e perspectivas. *Revista DAE*, v. 48, n. 150, p. 22–29, 2000.
- METCALF & EDDY; TCHOBANOGLIOUS, G.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.
- MORETTI, A.; IVAN, H. L.; SKVARIL, J. A review of the state-of-the-art wastewater quality characterization and measurement technologies. *Journal of Water Process Engineering*, v. 60, 2024.
- Mudanças Climáticas e o Distrito Federal*. Brasília: SEMA, 2022.
- NIKU, S. V.; DEAN, R. B.; FORSYTHE, G. B. Performance evaluation of wastewater treatment plants. *Journal Water Pollution Control Federation*, v. 51, n. 4, p. 534–547, 1979.

- NIKU, S.; SCHROEDER, E. D.; SAMANIEGO, F. J. Performance of activated sludge processes based on statistical analysis. *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, 1979.
- OLIVEIRA, S. C.; VON SPERLING, M. Reliability analysis of wastewater treatment plant performance. *Water Science and Technology*, v. 56, n. 6, p. 179-187, 2007.
- OLIVEIRA, S. M. D. *Análise de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de esgotos*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015.
- PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). *Relatório Especial: Mudanças Climáticas e Cidades*. Suzana Kahn Ribeiro; Andrea Souza Santos (Eds.). Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2016.
- PALANIANDY, Puganeshwary et al. Dissolved air flotation (DAF) for wastewater treatment. In: HUNG, Yung-Tse (ed.). *Waste treatment in the service and utility industries*. Boca Raton: CRC Press, 2017. cap. 5.
- PARANÁ. Conselho Estadual do Meio Ambiente (CEMA). *Resolução nº 70, de 26 de setembro de 2009*. Estabelece critérios e padrões para o lançamento de efluentes líquidos em corpos de água no Estado do Paraná. *Diário Oficial do Estado do Paraná*, Curitiba, PR, 30 set. 2009.
- PAULA, Reuel Lopes de. Metodologia para avaliação de desempenho operacional de estações de tratamento de esgotos. 2013. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Rio de Janeiro: PBMC, 2016.
- PENETRA, Rogério Gomes. Flotação aplicada ao pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio de leito expandido tratando esgoto sanitário. 2003. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- QUEVEDO, C. M. G. Avaliação da presença de fósforo nos esgotos sanitários. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- REGES, J. C. *Análise de confiabilidade em estações de tratamento de esgotos da região metropolitana de Fortaleza*. Monografia (Especialização em Saneamento Ambiental) – Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2009.

- REVISTA MEIO AMBIENTE. Avaliação de parâmetros físico-químicos em efluentes sanitários. 2023.
- RIO GRANDE DO SUL. Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA). *Resolução nº 355, de 24 de março de 2017*. Dispõe sobre os padrões de lançamento de efluentes líquidos e critérios para lançamento em corpos receptores no Estado do Rio Grande do Sul. *Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, RS, 27 mar. 2017.
- SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE DO DISTRITO FEDERAL (SEMA). *Mudanças climáticas e o Distrito Federal*. Brasília: SEMA, 2022.
- SILVA, S. M. *et al.* Confiabilidade no tratamento de esgotos sanitários com reatores UASB. *Revista DAE*, v. 70, n. 231, p. 56–67, 2022.
- SILVA, S. M. *et al.* Eficiência e variabilidade no desempenho de estações de tratamento de esgoto com diferentes tecnologias no Brasil. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES*, Curitiba, 2021.
- SMITH, R. A.; ALEXANDER, R. B.; SCHWARZ, G. E. Natural background concentrations of nutrients in streams and rivers of the conterminous United States. *Environmental Science & Technology*, v. 35, n. 22, p. 4470–4477, 2001.
- SOUSA, S. G. C.; SANTOS, R. C.; ALMEIDA, D. M. Avaliação estatística de estações de tratamento de esgoto utilizando *boxplot* e análise multivariada. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 26, n. 5, p. 817–826, 2021.
- TCHOBANOGLOUS, George; STENSEL, H. David; TSUCHIHASHI, Ryujiro; BURTON, Franklin L. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 1936 p.
- TONETTO, A. F. *et al.* Avaliação de desempenho de sistemas UASB seguidos de pós-tratamento em regiões tropicais: uma revisão crítica. *Revista DAE*, v. 69, n. 230, p. 34–46, 2021.
- TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Abastecimento de água e esgotamento sanitário. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP, 2006.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARTH, M. C. *Drenagem urbana: avaliação e controle da poluição*. Porto Alegre: ABRH, 2000.
- TUKEY, J. W. *Exploratory Data Analysis*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1977.
- UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB). Diretrizes para elaboração de produtos técnicos e tecnológicos nos programas de pós-graduação. Brasília: Universidade de Brasília, 2023.

VAUGHAN, R. J.; RUSSELL, D. D. Treatment plant performance evaluation using statistics. *Journal Water Pollution Control Federation*, v. 55, n. 2, p. 145–152, 1983.

VERSÃO FINAL CORRIGIDA V02. Material técnico sobre DBO e DQO aplicado ao tratamento de esgotos. 2022.

VON SPERLING, M. *Fundamentos do Tratamento de Esgotos: princípios de tratamento biológico e físico-químico*. 3. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2016.

VON SPERLING, M. *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

VON SPERLING, Marcos. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

VON SPERLING, Marcos. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Volume 3: Lagoas de estabilização*. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2005.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume II: Wastewater use in agriculture*. Geneva: World Health Organization, 2006.