RESILIÊNCIA OPERACIONAL DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM SISTEMA DE REÚSO FRENTE À VARIAÇÃO DE CARGA ORGÂNICA: IMPACTOS E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Mariana Schneider Rezende[(1)]
Graduada em Engenharia Civil pela Faculdade de Tecnologia e Ciências - FTC, pós-graduada em Engenharia da Qualidade pela Universidade Cândido Mendes - UCAM e Gerente de Sistemas de Esgoto na Unidade Regional de Camaçari, da Empresa Baiana de Águas e Saneamento - EMBASA.
Davi Oliveira Melo[(2)]
Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Sergipe - UFS, pós-graduado em Engenharia de Saneamento e Preservação Ambiental pelo Centro Universitário Internacional - UNINTER e Analista de Produção e Controle de Qualidade de Água e Esgoto, na Unidade Regional de Camaçari, da Empresa Baiana de Águas e Saneamento - EMBASA.

Endereço[(1)]**:** Rua dos Bombeiros, s/n - Ponto Certo - Camaçari - Bahia - CEP: 42.801-170 - País - Tel: +55 (71) 3621-6037 - e-mail: mariana.rezende@embasa.ba.gov.br.

RESUMO

Este trabalho avalia a resiliência operacional da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Iberostar (Mata de São João – BA) frente às variações de carga orgânica e vazão e seus impactos na qualidade do efluente da Estação de Tratamento de Água de Reúso (ETAR) integrada. Foram analisados dados físico-químicos entre os anos de 2022 e 2026 nos pontos de afluente bruto (P1), efluente final (P2) e água de reúso (P3). A resiliência da ETAR foi quantificada pela Razão de Amortecimento (RA) e Frequência de Eficiência Negativa (FEN), baseados em coeficientes de variação e frequência de episódios de incremento de carga. A ETAR apresentou comportamento anômalo em 2025, com mediana DQO/DBO de 20,5, superior aos demais anos. Os resultados de elevadas concentrações de cloro residual registradas no período (média de 4,56 mg/L) sugerem possível associação com a deterioração da biodegradabilidade do efluente. A baixa correlação entre vazão e eficiência de remoção de DBO do sistema indica que oscilações hidráulicas não são fator preponderante na determinação da carga residual. Com base nos resultados, foram propostas estratégias estruturais e de gestão operacional para maior conformidade com os padrões de qualidade para reúso paisagístico.

PALAVRAS-CHAVE: Lodos Ativados, Resiliência Operacional, Tratamento de Esgoto.

INTRODUÇÃO

O crescente déficit hídrico observado em diversas regiões brasileiras, aliado ao aumento da demanda por saneamento básico, tem impulsionado a adoção de sistemas integrados de tratamento de esgoto com aproveitamento do efluente tratado para fins de reúso — em especial, para irrigação urbana paisagística. Nesse contexto, as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) baseadas em lodos ativados representam uma das tecnologias mais consolidadas para o atendimento simultâneo dos padrões de lançamento e de qualidade de água para reúso (VON SPERLING, 2014).

Segundo Hespanhol (2002), o reúso planejado de efluentes tratados representa alternativa estratégica para mitigação da escassez hídrica e ampliação da segurança hídrica em regiões sujeitas à irregularidade de oferta de água. De forma complementar, Tchobanoglous et al. (2014) destacam que os sistemas de lodos ativados possuem elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos, possibilitando a adequação do efluente para diferentes modalidades de reúso.

Entretanto, a operação dessas instalações está sujeita a variações significativas tanto na carga orgânica afluente — representada principalmente pelas variáveis de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e vazão (Q) do esgoto bruto. Essas oscilações decorrem de fatores como flutuações diárias

e sazonais do consumo de água, infiltrações indevidas na rede coletora, contribuições de efluentes industriais e ocorrência de eventos climáticos extremos (Metcalf & Eddy, 2016).

Em regiões turísticas e áreas de veraneio, tais variações são intensificadas pela presença de população flutuante, que promove aumentos expressivos e temporários nas vazões afluentes e nas cargas orgânicas encaminhadas às Estações de Tratamento de Esgoto (VON SPERLING, 2014). Esse comportamento sazonal impõe desafios adicionais à estabilidade operacional dos sistemas de tratamento e ao controle da qualidade do efluente tratado.

A resiliência operacional de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) está associada à capacidade do sistema de manter condições adequadas de desempenho frente a perturbações hidráulicas, orgânicas e ambientais, assegurando a continuidade da eficiência do tratamento mesmo sob condições adversas (MEEROW et al., 2016; SWEETAPPLE et al., 2019). No contexto dos sistemas biológicos de lodos ativados, essa resiliência relaciona-se diretamente à estabilidade microbiológica, à flexibilidade operacional e à capacidade de absorção de choques de carga e vazão sem comprometimento significativo da qualidade do efluente final (HENZE et al., 2008; TCHOBANOGLOUS et al., 2014).

Segundo Von Sperling (2016), variações abruptas nas cargas afluentes podem provocar desequilíbrios no processo biológico, afetando parâmetros como oxigênio dissolvido, idade do lodo, sedimentabilidade e eficiência de remoção de matéria orgânica. Em áreas sujeitas à sazonalidade populacional, esses efeitos tornam-se ainda mais relevantes, exigindo estratégias operacionais adaptativas e monitoramento contínuo para garantir a confiabilidade do sistema.

Diante desse panorama, a avaliação da resiliência operacional envolve não apenas a análise dos impactos das oscilações de vazão e carga orgânica sobre os indicadores de processo, mas também a identificação de medidas mitigadoras capazes de aumentar a robustez operacional da Estação de Tratamento de Esgoto, reduzindo riscos de não conformidade do efluente tratado e assegurando a manutenção dos padrões exigidos para o reúso.

OBJETIVO GERAL

Avaliar a resiliência operacional da ETE de lodos ativados com reúso em lagoas de irrigação frente à variação de carga orgânica e de vazão, identificando os impactos sobre a qualidade da água de reúso.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar estatisticamente a variação de carga orgânica (DQO/DBO) e vazão (Q), com coeficientes de variação e frequências de sobrecarga;
- Quantificar a correlação entre variação de carga/vazão e eficiência de remoção, avaliando a existência de limiares críticos de carga a partir dos quais possa ocorrer comprometimento significativo de desempenho do sistema;
- Propor estratégias de controle estruturais e de gestão para garantir a conformidade contínua do efluente com os requisitos de qualidade para reúso paisagístico.

METODOLOGIA

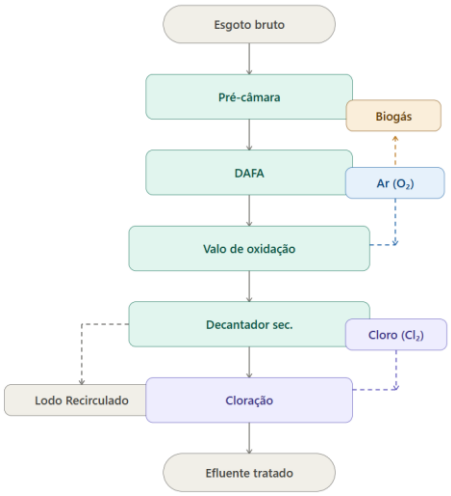
O estudo de caso foi conduzido na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Iberostar, localizada no distrito de Açu da Torre, município de Mata de São João, estado da Bahia (BA). A unidade é operada pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. (EMBASA) e atende, de forma integrada, ao complexo hoteleiro Iberostar, ao condomínio Reserva Imbassaí, incluindo o Hotel Grand Palladium, condomínio Minha Casa Minha Vida Praia Bella e Vista Bella, além da localidade Vila Imbassaí.

O sistema de tratamento da ETE é composto pelas seguintes unidades operacionais: elevatórias de esgoto bruto, pré-câmara, Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente (DAFA), valo de oxidação, decantadores secundários e o sistema de desinfecção, utilizando cloro gás, dispondo adicionalmente de sistema alternativo por dosagem de hipoclorito de sódio. Trata-se, portanto, de um sistema de tratamento combinado anaeróbio-aeróbio, característico de estações que buscam eficiência na remoção de matéria orgânica com menor consumo energético na etapa anaeróbia.

Em complemento ao tratamento convencional, o sistema é dotado de uma Estação de Tratamento de Água de Reúso (ETAR), composta por unidades de coagulação, floculação, decantação e filtração. O efluente gerado pela ETE é parcialmente encaminhado à ETAR, onde recebe tratamento terciário com vistas ao enquadramento nos padrões de qualidade exigidos para fins de reúso, sendo aplicado nas áreas verdes e jardins do complexo hoteleiro Iberostar. Já o efluente não direcionado à ETAR é lançado no corpo hídrico receptor, o Rio Pojuca, devendo atender aos padrões de emissão estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e demais normativas ambientais aplicáveis.

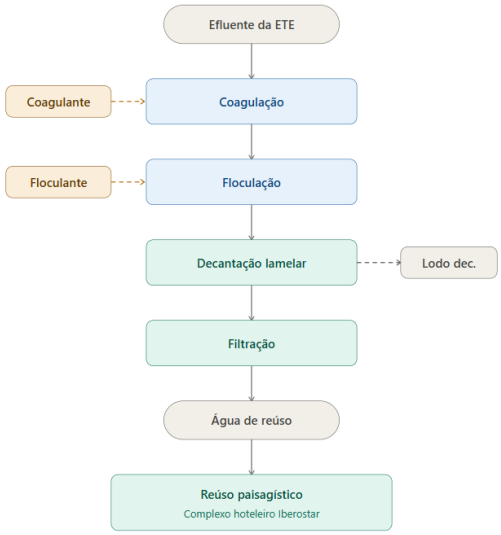
As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, os fluxogramas das etapas de tratamento da ETE e da ETAR, enquanto a Figura 3 e Figura 4 retratam a área objeto de estudo.

Figura 1 - Fluxograma das etapas da Estação de Tratamento de Esgoto Iberostar



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

Figura 2 - Fluxograma das etapas da Estação de Tratamento de Água de Reúso do Iberostar



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

Figura 3 - Imagem aérea da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Iberostar



Fonte: EMBASA, 2026.

Figura 4 - Imagem aérea da Estação de Tratamento de Água de Reúso (ETAR) Iberostar



Fonte: EMBASA, 2026.

As características de projeto da Estação de Tratamento de Esgoto são descritas na Tabela 1, disponibilizada abaixo:

Tabela 1 - Características de projeto da Estação de Tratamento de Esgoto do Iberostar

Parâmetros de projeto	Pré-câmara	Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente (DAFA)	Valo de oxidação	Decantador Secundário
População equivalente de projeto (hab. em 2025)		11.142		
Número de unidades implantadas	2	1	1	2
Dimensões (m)	3,9 x 3,0	12,0 x 8,0	28,0 x 8,0	d = 11
Profundidade útil (m)	5,5	5,0	2,5	2,5
Área de cada unidade (m^2)	5,85	96	224,0	62,4
Volume útil de cada unidade (m^3)	64,35	480	537,6	107,6
TDH	2,31	8,63	-	2
Vazão média (m3/h)	27,81	55,62	-	-

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir de laudos analíticos emitidos pelo laboratório central da EMBASA, certificado, compreendendo o período de janeiro de 2022 a abril de 2026. As determinações analíticas foram conduzidas em conformidade com os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017) e com as normas técnicas da ABNT pertinentes. O monitoramento abrangeu três pontos de amostragem: esgoto bruto afluente à ETE (P1), efluente final tratado da ETE (P2) e água de reúso produzida pela ETAR (P3), com frequência predominantemente quinzenal, com um total de 76 amostras por ponto.

No ponto P1/P3, foram avaliados os parâmetros de qualidade DQO e DBO, já no ponto P2, além desses parâmetros, também foram realizadas análises de Cloro Total (Cloro Residual Total). Ressalta-se que a estação possui monitoramento de outros parâmetros operacionais e de qualidade, os quais não integram o escopo da presente pesquisa.

Complementarmente, para o período de 2022 a 2026, foram incorporados dados de vazão diária afluente à ETAR, obtidos por meio de registros operacionais, com vistas à análise do desempenho hidráulico da unidade e à correlação entre variações de vazão e qualidade do efluente produzido.

O tratamento dos dados compreendeu duas etapas sequenciais. Na primeira, procedeu-se à consolidação e à organização do conjunto histórico de monitoramento, no período supracitado, separando-se as coletas nas quais havia dados de DQO e de DBO nos três pontos (P1, P2 e P3). Na segunda, realizou-se a caracterização estatística dos parâmetros avaliados, mediante o cálculo de medidas de tendência central e dispersão — média, mediana, valores mínimo e máximo, desvio-padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) —, com vistas à avaliação da variabilidade da vazão e da carga orgânica afluente. Para o parâmetro do cloro total, foram realizados a identificação e o tratamento de *outliers* pelo critério interquartílico (IQR), adotando-se como limite superior o valor de Q3 + 1,5·(Q3 – Q1) e como limite inferior o valor de Q1 - 1,5·(Q3 – Q1).

Nesse contexto, para investigar as relações entre as variáveis de entrada e saída do sistema, testou-se um modelo de correlação linear entre os parâmetros monitorados nos pontos P2 e P3. Adicionalmente, a influência da cloração sobre a biodegradabilidade do efluente foi avaliada por meio de regressão entre o teor de cloro total (Cl total) e a relação DQO/DBO em P3.

No que diz respeito à definição de resiliência, o conceito foi originalmente introduzido por Holling (1973) no campo da ecologia, sendo definido como a capacidade de um sistema de absorver perturbações e mudanças e, ainda assim, manter as mesmas relações entre suas variáveis de estado.

A partir desse conceito, conforme destacado por Rotava (2014), a literatura distingue dois comportamentos fundamentais e complementares: a estabilidade, que representa a habilidade de um sistema de retornar a um estado de equilíbrio após um distúrbio temporário — sendo mais estável quanto mais rápido o retorno e menores as flutuações —, e a resiliência, que mede a persistência do sistema e sua habilidade de absorver distúrbios e mudanças enquanto mantém suas funções essenciais (HOLLING, 1973; ROTAVA, 2014).

Sob a perspectiva dos sistemas de engenharia, entretanto, o conceito de resiliência assume uma interpretação mais específica. No arcabouço seminal de Hashimoto, Stedinger e Loucks (1982), a resiliência refere-se à velocidade de recuperação do sistema após um evento de falha, distinguindo-se da confiabilidade, associada à probabilidade de o sistema permanecer em estado satisfatório.

Ainda no contexto dos sistemas de condução de esgoto, a resiliência pode ser compreendida como a capacidade inerente do sistema de acomodar flutuações agudas nos parâmetros operacionais e retornar aos níveis normais de serviço sem sofrer danos permanentes (WATERWORLD, 2016). Tal conceito pode ser aplicado aos sistemas de esgotamento sanitário, nos quais perturbações na quantidade e/ou qualidade do efluente bruto podem comprometer o desempenho operacional, tanto de forma temporária quanto permanente.

No que se refere à ETAR, para além da estatística descritiva já apresentada, a resiliência do sistema foi avaliada por dois indicadores quantitativos (ver Tabela 2), sendo estes a Razão de Amortecimento (RA) e a Frequência de Eficiência Negativa (FEN). Esses indicadores foram adotados como proxies operacionais de resiliência por captarem, respectivamente, duas dimensões complementares desse conceito.

Tabela 2 - Indicadores de resiliência utilizados no estudo

Indicador	Definição	Interpretação
Razão de Amortecimento (RA)	CV (saída) / CV (entrada)	RA < 1: Sistema atenua a variabilidade; RA > 1: sistema amplifica a variabilidade
Frequência de Eficiência Negativa (FEN)	Proporção de eventos com eficiência < 0%	Indica episódios de produção líquida de carga na ETAR

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

A RA expressa a magnitude da resposta do sistema frente à variabilidade da carga afluente: valores inferiores a 1 indicam que o sistema atenua — e não amplifica — as oscilações recebidas, refletindo maior robustez frente a perturbações (componente de resistência). Já a FEN capta a frequência de eventos em que essa capacidade de amortecimento falha, aproximando-se do conceito de confiabilidade discutido por Hashimoto, Stedinger e Loucks (1982). No entanto, ambos os indicadores são estáticos e agregados, pois se baseiam em coeficientes de variação e proporções de eventos calculados sobre toda a série, não permitindo quantificar o tempo de

recuperação do sistema após uma perturbação específica, dimensão temporal que, na literatura clássica sobre resiliência ecológica e de sistemas de engenharia, complementa a noção de resistência aqui abordada.

O desempenho da ETE foi avaliado por meio das concentrações de DBO e DQO no afluente e no efluente, da relação DQO/DBO e das respectivas eficiências de remoção. Complementarmente, foram elaboradas séries temporais para avaliação do comportamento dos parâmetros monitorados ao longo do período estudado. A influência da vazão e da carga orgânica sobre o desempenho da ETE e sobre a qualidade da água de reúso foi investigada por meio de análises gráficas e correlações de Pearson. Também foi utilizado o teste t de *Student* para avaliar a diferença entre médias tanto de DBO quanto da relação DQO/DBO em dois períodos distintos (2022-2024 e 2025-2026).

No que se refere à análise de vazão, foram avaliadas as eficiências de remoção de carga orgânica em função das vazões médias diárias registradas nos dias de coleta, abrangendo o período de 2022 a 2026, a fim de identificar eventuais padrões de resposta do sistema frente a cenários hidráulicos distintos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estatística descritiva dos parâmetros monitorados

O monitoramento contínuo de efluentes em estações de tratamento de esgoto (ETE) é fundamental para avaliar o desempenho do sistema e verificar a conformidade com os padrões de lançamento estabelecidos pela legislação ambiental vigente. Neste estudo, os dados foram coletados em três pontos distintos — P1 (afluente bruto), P2 (efluente final) e P3 (água de reúso) — no período de janeiro de 2022 a abril de 2026, totalizando séries temporais com variações sazonais e operacionais representativas. A Tabela 3 apresenta a estatística descritiva dos principais parâmetros nos três pontos de monitoramento:

Tabela 3 - Estatística descritiva dos parâmetros monitorados (janeiro de 2022 a abril de 2026)

Parâmetro	Ponto	n	Média	Mediana	DP	CV	Mín	Máx
DBO (mg/L)	P1	76	380,71	371,00	148,99	0,39	138,00	754,00
	P2	76	51,58	38,95	45,49	0,88	2,00	260,00
	P3	76	18,70	13,00	18,29	0,98	2,00	72,00
DQO (mg/L)	P1	76	799,70	739,00	346,97	0,43	261,00	2.670,00
	P2	76	230,86	211,50	212,36	0,92	38,00	1648,00
	P3	76	91,17	70,50	59,95	0,66	33,89	379,00
DQO/DBO	P1	76	2,20	2,16	0,79	0,36	1,17	7,44
	P2	76	5,48	4,75	3,70	0,67	1,17	24,29
	P3	76	10,61	5,98	10,67	1,01	1,17	56,96

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

O afluente bruto (P1) apresentou DBO média de 380,71 mg/L e razão DQO/DBO de 2,20. Estes valores são consistentes com o esgoto doméstico brasileiro de alta biodegradabilidade, estando a razão DQO/DBO entre 1,7 e 2,4 (VON SPERLING, 2014). O efluente final da ETE (P2) apresentou DBO média de 51,58 mg/L, com CV = 0,88, indicando variabilidade da carga afluente à ETAR. O efluente da ETAR (P3) apresentou DQO/DBO média de 10,61 e CV = 1,01 – o maior dos três pontos, indicando que a fração biodegradável foi consumida, com sobra de matéria orgânica recalcitrante.

A eficiência mediana de remoção de DBO foi de 89,04%, considerando a relação entre o efluente final (P2) e o afluente bruto (P1), evidenciando desempenho satisfatório (> 85%) na remoção de matéria orgânica. Esse resultado demonstra elevada capacidade de estabilização da carga orgânica afluente e indica operação compatível com padrões esperados para sistemas de tratamento secundário bem ajustados, situando-se acima

das faixas médias de eficiência observadas para grande parte das ETEs brasileiras descritas no Atlas Esgotos da ANA (2020), especialmente para sistemas convencionais com remoção de DBO superior a 80%.

Nesse contexto, a unidade apresenta desempenho superior ao panorama nacional descrito pela ANA (2017), cujo diagnóstico aponta que parcela significativa das estações de tratamento de esgoto brasileiras opera abaixo da eficiência projetada, em razão de limitações estruturais, deficiências operacionais, manutenção insuficiente, sobrecargas hidráulicas e orgânicas, além da ausência de monitoramento contínuo. O estudo destaca ainda que muitas ETEs apresentam remoções insuficientes de matéria orgânica e elevada variabilidade operacional, comprometendo a qualidade do efluente final e o enquadramento ambiental dos corpos receptores. Assim, os resultados observados indicam que a unidade analisada não reproduz as fragilidades normalmente identificadas em grande parte dos sistemas de esgotamento sanitário do país.

Outro parâmetro monitorado foi a concentração de cloro total (mg/L). A Tabela 4 apresenta, após tratamento dos *outliers* pelo critério interquartílico, a estatística descritiva das concentrações de cloro total monitoradas no ponto P2 entre janeiro de 2022 e abril de 2026:

Tabela 4 - Estatística descritiva do cloro total (mg/L) monitorado (janeiro de 2022 a abril de 2026)

Parâmetro	Ponto	Ano	n	Média	Mediana	DP	CV	Mín	Máx
Cl total (mg/L)	P2	2022	18	1,41	0,10	2,41	1,71	0,10	6,70
		2023	17	1,16	0,10	1,46	1,26	0,10	3,90
		2024	06	1,01	0,23	1,56	1,54	0,00	3,88
		2025	23	4,56	4,18	4,43	0,97	0,00	17,27
		2026	08	0,36	0,00	0,78	2,18	0,00	2,19
		Todos	68	1,62	0,10	2,25	1,39	0,00	7,53

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

As concentrações de cloro total apresentaram elevada variabilidade ao longo da série histórica, com média geral de 1,62 mg/L e coeficiente de variação de 1,39. Os anos de 2022, 2023 e 2026 apresentaram medianas iguais ou próximas de zero, indicando a ocorrência de baixas concentrações de cloro residual. Em contrapartida, 2025 registrou a maior média (4,56 mg/L) e o maior valor máximo (17,27 mg/L), refletindo episódios de sobredosagem. Apesar desse comportamento observado em 2025, ajustes operacionais foram implementados no controle da dosagem de cloro. Os resultados de 2026 já sugerem melhora no processo, com redução da concentração média para 0,36 mg/L e diminuição expressiva do valor máximo observado, indicando maior controle operacional da etapa de desinfecção.

Indicadores de resiliência

A Tabela 5 consolida os indicadores de resiliência calculados para a ETAR:

Tabela 5 - Indicadores de resiliência da ETAR (2022-2026)

Indicador	Ano	DBO	DQO
Razão de Amortecimento (RA)	2022	1,62	1,76
	2023	1,06	0,79
	2024	1,29	1,64
	2025	0,78	0,49
	2026	0,30	0,53
Eficiência de remoção - Mediana	2022-2026	59,10,%	55,45%
Eficiência de remoção - Média	2022-2026	54,61%	42,10%
Frequência de Eficiência Negativa (FEN)	2022-2026	6,58% (5/76)	13,16% (10/76)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

Além da variabilidade média do processo, a resiliência operacional de um sistema de tratamento pode ser avaliada pela frequência de ocorrência de episódios nos quais o sistema falha em cumprir sua função essencial. No contexto do presente artigo, a Frequência de Eficiência Negativa (FEN) foi proposta com base nos conceitos de confiabilidade e frequência de falhas utilizados na avaliação de sistemas ambientais e de tratamento de esgotos. Enquanto indicadores tradicionais de confiabilidade avaliam a ocorrência de eventos de não conformidade em relação a padrões de qualidade, a FEN quantifica a frequência de episódios em que a concentração efluente supera a concentração afluente, caracterizando falha momentânea de remoção. Dessa forma, o indicador permite complementar a análise de resiliência operacional por meio da avaliação da recorrência de eventos de desempenho insatisfatório (HASHIMOTO; STEDINGER; LOUCKS, 1982; BA-ALAWI et al., 2020).

Essa situação de concentração efluente superior à afluente, embora aparentemente paradoxal, pode ocorrer em sistemas de tratamento terciário quando há remobilização de compostos retidos em etapas anteriores, falhas em unidades específicas de tratamento ou sobrecarga hidráulica pontual. Artigo publicado na *Journal of Cleaner Production* (2020) argumenta que o estresse de processo é o "elo perdido" na compreensão de como processos discretos de tratamento de esgoto reagem a estressores, e que desvincular "estressores" de "estresse de processo" oferece benefícios significativos para operadores — incluindo a possibilidade de identificar instantaneamente a magnitude do estresse e avaliar como sua dinâmica influencia a saída do processo (HOLLOWAY et al., 2021). Nesse sentido, a FEN funciona como um indicador de eventos de estresse agudo, complementar à RA, que captura a magnitude média do comportamento amortecedor do sistema.

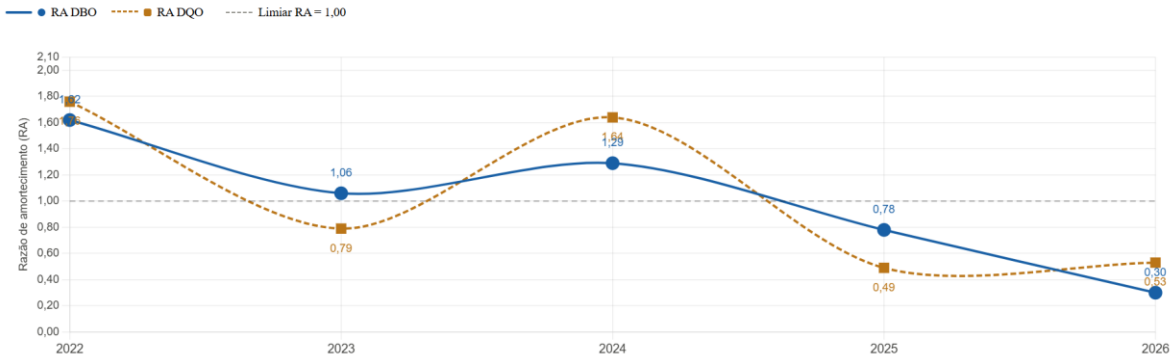
O FEN — no qual a concentração efluente supera a concentração afluente — é documentado na literatura internacional, ainda que descrito com maior frequência para contaminantes emergentes, sendo caracterizado como comportamento globalmente prevalente em diferentes tipos de sistemas de tratamento (KUMAR et al., 2022). No caso da ETAR estudada, este comportamento é mais bem explicado pelos mecanismos de produção de produtos microbianos solúveis (SMP) e de respiração endógena (BARKER; STUCKEY, 1999; AQUINO; STUCKEY, 2008), do que pelos processos de desconjugação típicos daquela literatura.

A Frequência de Eficiência Negativa (FEN) foi de 6,58% para DBO e 13,16% para DQO, indicando que, em parte das amostras analisadas, o sistema apresentou incremento de carga orgânica na saída da ETAR em relação à saída da ETE, evidenciando instabilidades operacionais pontuais no processo de tratamento. Sob a perspectiva do reúso paisagístico, a média de DBO do P3 é de 18,70 mg/L e a mediana, de 13 mg/L, ou seja, valores que se aproximam do padrão estabelecido pela ABNT NBR 13969:1997 para águas de Classe 2; contudo, a elevada

variabilidade operacional indica que o atendimento a esse critério ainda não ocorre de forma contínua e sistemática.

A análise da Razão de Amortecimento (RA) demonstrou valores inferiores a 1 para DBO em dois dos cinco anos avaliados e para DQO em três dos cinco anos (ver Gráfico 1), sugerindo períodos de menor capacidade de amortecimento de carga orgânica afluente. Apesar disso, observa-se tendência de maior estabilidade operacional nos últimos anos da série histórica.

Gráfico 1 - Razão de amortecimento entre DBO e DQO durante o período de 2022-2026.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

Evolução temporal da razão DQO/DBO nos três pontos

A Tabela 6 apresenta a evolução da DQO/DBO média nos três pontos de monitoramento, entre 2022 e 2026:

Tabela 6 - Razão DQO/DBO média nos três pontos de monitoramento

Ponto	Ano	n	Média	Mediana	DP	CV	Mín	Máx
P1	2022	13	1,93	1,92	0,44	0,23	1,17	2,62
	2023	17	2,18	2,09	0,61	0,28	1,28	3,26
	2024	19	2,19	2,09	0,66	0,30	1,26	3,71
	2025	23	2,43	2,28	1,14	0,47	1,62	7,44
	2026	4	1,95	1,93	0,37	0,19	1,61	2,32
P2	2022	13	3,82	3,51	1,52	0,40	1,17	6,50
	2023	17	4,66	4,06	1,59	0,34	1,63	7,90
	2024	19	7,63	5,23	5,89	0,77	2,20	24,29
	2025	23	5,73	5,39	2,76	0,48	2,55	16,42
	2026	4	2,81	2,56	1,27	0,22	2,39	3,70
P3	2022	13	4,93	3,57	5,11	1,03	2,21	21,72
	2023	17	4,71	4,83	2,06	0,44	1,58	8,99
	2024	19	8,33	6,32	6,13	0,74	1,17	22,80
	2025	23	21,45	20,50	12,46	0,58	5,21	56,96
	2026	4	2,69	2,55	1,27	0,47	1,30	4,36

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

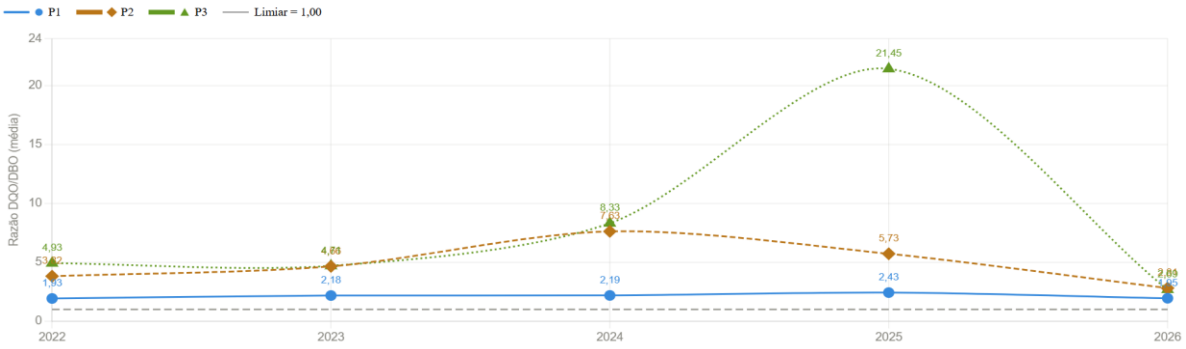
O P1 mantém DQO/DBO estável entre 1,93 e 2,43, indicando afluente de alta biodegradabilidade em praticamente toda a série. O P2 apresenta elevação progressiva de 3,82 (2022) a 7,63 (2024), com retorno a 2,81 em 2026. O P3 exibe padrão semelhante ao P2, apresentando forte aumento na relação DQO/DBO em 2025

(21,45), retornando a um valor mais baixo em 2026 (2,69), sugerindo retorno às condições históricas de operação.

Ressalta-se que os dados referentes ao ano de 2026 compreendem apenas quatro amostras (n = 4), coletadas entre janeiro e abril, em decorrência de adequações operacionais temporárias no ponto de coleta de entrada, que impactaram a continuidade do monitoramento no período. Dessa forma, a série amostral apresenta menor representatividade estatística em relação aos demais anos analisados, recomendando-se cautela na interpretação e comparação dos resultados obtidos.

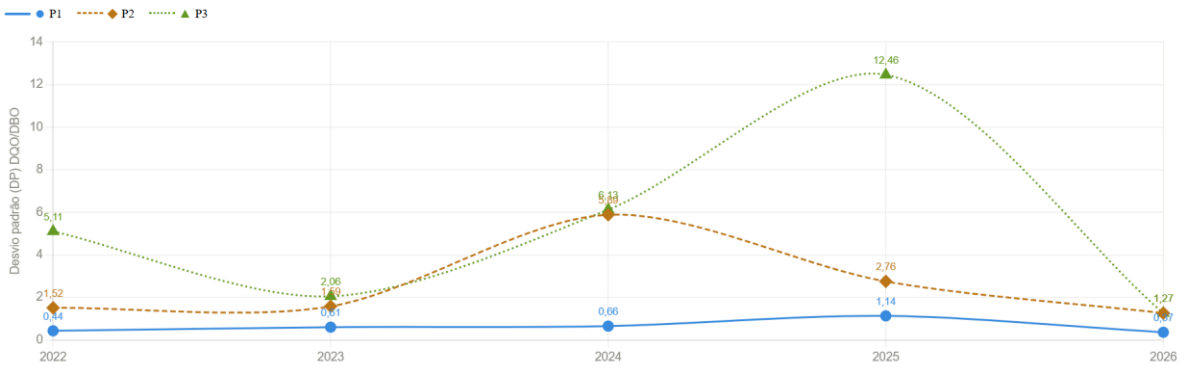
As variações de média e desvio-padrão podem mais bem observadas no Gráfico 2 e no Gráfico 3 abaixo:

Gráfico 2 - Média DQO/DBO durante o período de 2022-2026.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

Gráfico 3 - Desvio Padrão DQO/DBO durante o período de 2022-2026.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

Considerando a estabilidade observada no P1 ao longo de toda a série histórica, o aumento da relação DQO/DBO nos P2 e P3 não parece estar associado a alterações significativas na composição do afluente. Dessa forma, a elevação observada é mais compatível com transformações ocorridas durante o tratamento, incluindo remoção preferencial da fração biodegradável, produção de produtos microbianos solúveis (Soluble Microbial Products – SMP), processos de respiração endógena e aumento da participação relativa da matéria orgânica recalcitrante no efluente tratado (BARKER & STUCKEY, 1999; AQUINO & STUCKEY, 2008).

Complementarmente, a comparação entre o período inicial da série histórica (2022–2024) e o período mais recente (2025–2026), realizada por meio do teste t de *Student* para amostras independentes (teste bicaudal, nível de significância de 5%), revelou diferença estatisticamente significativa para DBO média da saída da ETAR ($p = 0,002$; redução de 23,31 para 10,34 mg/L) e para a relação DQO/DBO média no mesmo ponto ($p < 0,001$; aumento de 6,17 para 18,67).

Os cálculos estatísticos foram efetuados por meio da calculadora online disponibilizada pelo portal *Social Science Statistics*. Apesar de haver diminuição de 11,24% na média de DQO ao se comparar as duas séries

históricas (2022–2024 e 2025–2026), não foi identificada diferença estatisticamente significativa para DQO (p = 0,46; redução de 94,96 para 84,29 mg/L). Esses resultados sugerem que o tratamento passou a remover a fração biodegradável com maior eficiência, enquanto a participação relativa de compostos não biodegradáveis ou lentamente biodegradáveis no efluente final foi significativamente aumentada.

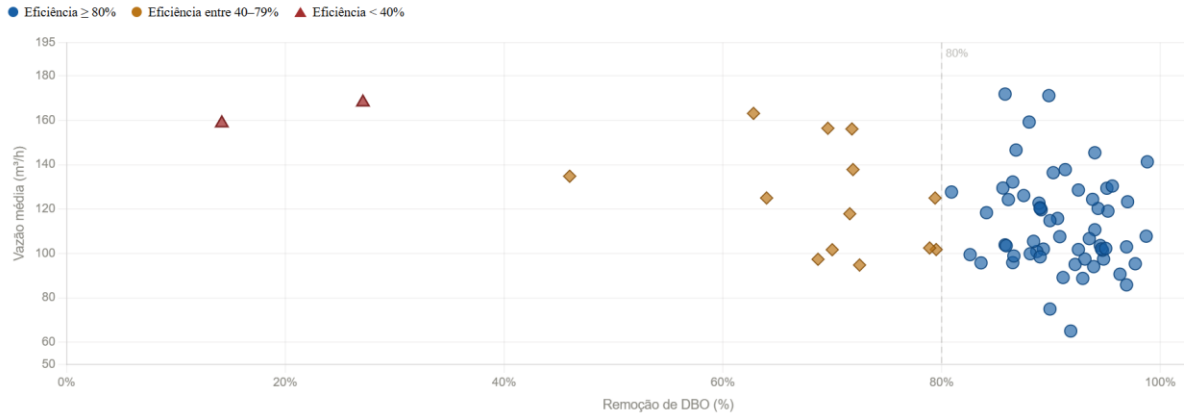
Relação entre vazão diária e carga orgânica

Foram estabelecidas relações entre a vazão de esgoto bruto e a carga orgânica removida, utilizando-se, para fins comparativos, os dados médios diários de vazão (m³/h) correspondentes às datas de coleta das amostras de DBO e DQO, no período de 2022 a 2026.

Conforme observado no Gráfico 4, a maior parte dos registros apresentou eficiência de remoção de DBO concentrada na faixa de 80% a 100%, independentemente da vazão média diária afluente. As vazões registradas variaram aproximadamente entre 60 e 180 m³/h e, ao longo de toda essa faixa, os pontos permaneceram densamente agrupados na porção superior do gráfico, evidenciando comportamento operacional consistente e estável do sistema.

A regressão linear resultou em coeficiente de determinação $R^2 = 0,18$, indicando ausência de correlação significativa entre a vazão afluente e a eficiência de remoção de DBO.

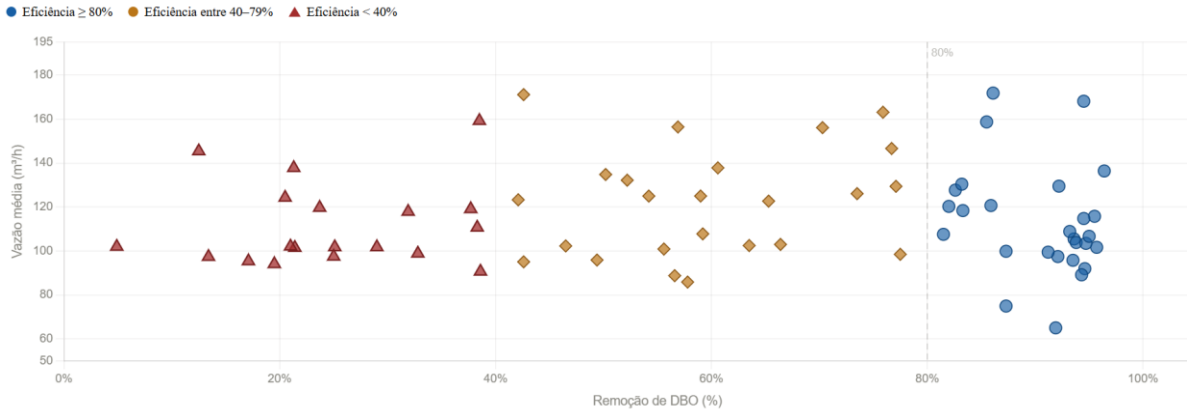
Gráfico 4 - Limiar entre Vazão diária x Eficiência de Remoção da ETE (P2/P1)



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

Em contraste com a ETE, a ETAR apresentou dispersão consideravelmente maior dos pontos ao longo de toda a faixa de eficiências, de 0% a 100%, para vazões igualmente variando entre 60 e 180 m³/h. Não foi possível identificar concentração dos dados em nenhuma faixa preferencial de eficiência, e o R^2 foi aproximadamente nulo. Essa heterogeneidade nos resultados da ETAR não decorre necessariamente de falhas operacionais na própria unidade, mas é em grande parte explicada pelas características do afluente que ela recebe. O Gráfico 5 demonstra a relação entre vazão e eficiência de remoção na ETAR:

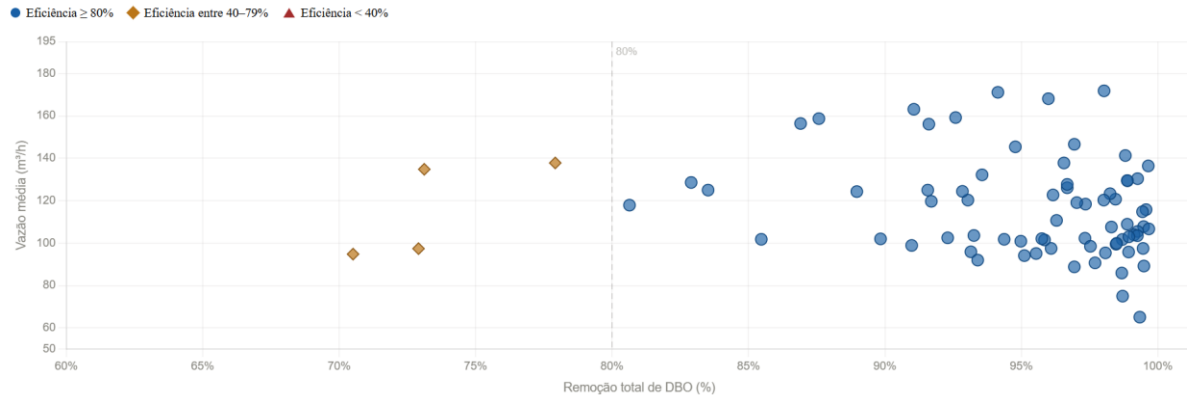
Gráfico 5 - Limiar entre Vazão diária x Eficiência de Remoção da ETAR (P3/P2)



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

Quando o sistema é avaliado de forma integrada — considerando a DBO do esgoto bruto (P1) como entrada e a DBO do efluente final da ETAR (P3) como saída — o comportamento observado assemelha-se ao da ETE isolada. Como pode ser observado no Gráfico 6, os pontos se concentram na faixa de 80% a 100% de eficiência total, com a nuvem de dados situada predominantemente à direita do eixo X, independentemente de a ETAR apresentar variabilidade interna elevada. Para o sistema completo obteve-se $R^2 = 0{,}0257$, confirmando a ausência de relação linear entre vazão e eficiência global.

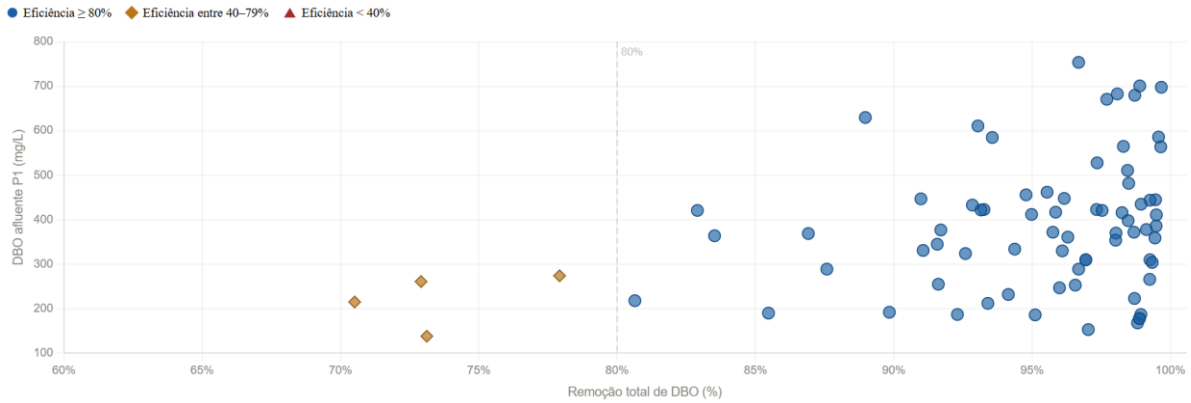
Gráfico 6 - Limiar entre Vazão diária x Eficiência de Remoção do processo (P3/P1)



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

A fim de investigar se cargas orgânicas mais elevadas comprometem a capacidade de remoção da ETE, foi elaborado um gráfico de dispersão relacionando a DBO do esgoto bruto afluente com a porcentagem de remoção de DBO da ETE. Conforme exposto no Gráfico 7, o resultado mostra que a eficiência se manteve predominantemente entre 75% e 100% em toda a extensão da faixa de carga orgânica analisada, sem tendência de redução com o aumento da DBO bruta. O valor de $R^2 = 0{,}124$ também indica correlação linear fraca ou ausente.

Gráfico 7 - Limiar entre DBO Afluente x Eficiência de Remoção do processo (P2/P1)



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EMBASA, 2026.

A ausência de limiar crítico identificável dentro da faixa de vazão e carga orgânica observada (60–180 m³/h) constitui, em si, um resultado relevante: sugere que o sistema opera com margem de segurança operacional dentro dessa faixa, não permitindo, contudo, extrapolações para cenários de sobrecarga fora do intervalo amostrado.

CONCLUSÃO

O presente artigo avaliou a resiliência operacional da ETE Iberostar frente às variações de carga orgânica e vazão no período de janeiro de 2022 a abril de 2026, com foco nos impactos sobre a qualidade do efluente produzido pela ETAR para fins de reúso urbano paisagístico.

Os resultados demonstraram que o esgoto bruto afluente (P1) apresentou elevada biodegradabilidade e comportamento relativamente estável ao longo de toda a série histórica, com razão DQO/DBO variando entre 1,93 e 2,43, compatível com as características típicas de esgoto doméstico descritas por Von Sperling (2014). Tal estabilidade indica que as oscilações observadas nos pontos P2 e P3 decorreram predominantemente de fatores operacionais internos ao sistema de tratamento, e não de alterações significativas na composição do afluente bruto.

Dentre o período analisado, o ano de 2025 apresentou comportamento anômalo, caracterizado pela elevação da razão DQO/DBO no efluente tratado da ETAR, com média de 21,45. Esse período coincidiu com o registro das concentrações mais elevadas de cloro residual da série histórica, o que é biologicamente plausível como fator explicativo: concentrações elevadas de cloro residual podem inibir parcialmente a biomassa biológica residual e favorecer a formação de compostos organoclorados recalcitrantes, ambos capazes de elevar a razão DQO/DBO ao comprometer a fração biodegradável do efluente. Entretanto, a ausência de monitoramento em ponto intermediário entre P1 e P2, bem como a inexistência de análises específicas de subprodutos de desinfecção, impedem o estabelecimento de relação causal conclusiva a partir dos dados disponíveis, evidenciando a necessidade de investigações complementares.

Os indicadores de resiliência operacional revelaram comportamento parcialmente resiliente do sistema. A ocorrência de Razão de Amortecimento (RA) inferior a 1 em parte significativa dos anos avaliados sugere melhora na capacidade de atenuação da variabilidade da carga orgânica nos períodos mais recentes. Contudo, a Frequência de Eficiência Negativa (FEN) observada para DBO e DQO evidencia vulnerabilidades operacionais recorrentes, possivelmente relacionadas à heterogeneidade amostral, ressuspensão de sólidos biológicos e instabilidades nas etapas de polimento. Adicionalmente, os testes estatísticos indicaram redução significativa das concentrações médias de DBO ao longo dos anos, fator que pode ter contribuído para o aumento da relação DQO/DBO nos períodos de menor biodegradabilidade observada.

As análises de dispersão demonstraram ausência de relação linear relevante entre vazão afluente e eficiência de remoção de DBO, tanto na ETE quanto na ETAR e no sistema integrado, evidenciando que a vazão média diária não constitui preditor significativo do desempenho do tratamento dentro da faixa operacional observada. Da

mesma forma, não foi identificado limiar crítico de carga orgânica afluente capaz de comprometer a eficiência do sistema. Esses resultados indicam que os episódios de instabilidade operacional estiveram mais associados às condições internas de operação — especialmente ao controle da cloração e à estabilidade microbiológica das etapas biológicas — do que às oscilações hidráulicas ou orgânicas do afluente.

No caso específico da ETAR, a elevada dispersão dos resultados de eficiência pode ser explicada pelas baixas concentrações absolutas de DBO no afluente já tratado e clorado proveniente da ETE, condição em que pequenas variações nas concentrações de saída produzem amplificações percentuais expressivas

Diante dos resultados obtidos, recomenda-se adoção integrada de medidas de controle operacional e monitoramento avançado, incluindo:

- controle rigoroso da dosagem de cloro como medida preventiva, dado que concentrações elevadas de cloro total são associadas na literatura à formação de compostos organoclorados recalcitrantes, o que poderia comprometer a biodegradabilidade do efluente destinado ao reúso, ou seja, com base na série histórica recomenda-se manter o cloro total no efluente da ETE (P2) entre 0,5 e 2,0 mg/L, faixa observada nos anos de melhor desempenho da ETAR (2022 e 2024);
- monitoramento sistemático do Tempo de Retenção de Sólidos no valo de oxidação, com meta operacional entre 8 e 12 dias, faixa que, segundo Von Sperling (2014), favorece a estabilidade da biomassa nitrificante em sistemas de clima quente e minimiza a produção de metabólitos microbianos solúveis (SMP) — compostos que contribuem para a elevação da DQO recalcitrante observada em P3. TRS abaixo de 4 dias representa risco de washout da biomassa nitrificante; acima de 20 dias, aumenta a produção endógena de SMP;
- inclusão do Índice Volumétrico de Lodo no protocolo de monitoramento quinzenal já existente, com meta operacional entre 80 e 150 mL/g, conforme recomendação de Metcalf & Eddy (2016). Valores de IVL superiores a 200 mL/g indicam deterioração da sedimentabilidade e devem acionar protocolo de controle de bulking, incluindo ajuste da razão A/M (alimento/microrganismo) e revisão do descarte de lodo;
- inserção de monitoramento contínuo no P2 (dentro do reator), a fim de manter OD entre 1,5 e 3,0 mg/L, pois abaixo de 1,0 mg/L favorece microrganismos filamentosos (bulking), e acima de 4,0 mg/L representa desperdício de energia sem ganho real de eficiência;
- avaliação periódica da eficiência do DAFA por meio do monitoramento de DQO/DBO no efluente do reator anaeróbio (ponto intermediário entre P1 e P2), permitindo isolar a contribuição de cada etapa de tratamento para a carga residual observada em P2;
- implementação de campanhas sistemáticas de subprodutos de desinfecção — em especial trihalometanos (THMs) e compostos organoclorados (AOX) — tanto no efluente final da ETE (P2) quanto no corpo hídrico receptor (Rio Pojuca), com frequência mínima semestral;

Conclui-se que a ETE Iberostar apresentou resiliência operacional parcial ao longo do período estudado, mantendo desempenho satisfatório na maior parte da série histórica, porém com suscetibilidade a episódios de instabilidade capazes de comprometer a qualidade do efluente destinado ao reúso. Ainda assim, os resultados demonstram que o sistema possui potencial técnico para alcançar desempenho consistente e aderente aos requisitos da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 16783:2019, desde que sejam implementadas estratégias de controle operacional mais robustas, associadas ao aprimoramento do monitoramento dos processos biológicos e da etapa de desinfecção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas*. Brasília: ANA, 2017. 88 p.

2. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Atlas esgotos: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil*. Brasília: ANA, 2020. 44 p. Disponível em: SNIRH – Atlas Esgotos (PDF). Acesso em: 1 jun. 2026.

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

4. AQUINO, S. F.; STUCKEY, D. C. Integrated model of the production of soluble microbial products (SMP) and extracellular polymeric substances (EPS) in anaerobic digestion. *Water Research*, v. 42, n. 4–5, p. 1057–1066, 2008.

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16783: Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Acesso em: 27 mai 2026.

6. BA-ALAWI, M. A.; ELMOUBARAK, A. H.; AL-ANSARI, T.; MACKAY, G.; AL-GHAMDI, S. G. Process assessment of a full-scale wastewater treatment plant using reliability, resilience and econo-socio-environmental analyses. Process Safety and Environmental Protection, v. 136, p. 1-15, 2020.

7. BARKER, D. J.; STUCKEY, D. C. A review of soluble microbial products (SMP) in wastewater treatment systems. *Water Research*, v. 33, n. 14, p. 3063–3082, 1999.

8. 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 Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, n. 92, p. 89, 16 maio 2011.

9. FONSEKA, Asantha; DAVIAU, Jean-Luc. *Improving the resilience and adaptability of wastewater conveyance systems*. WaterWorld, 1 fev. 2016. Disponível em: https://www.waterworld.com/home/article/16191368/improving-the-resilience-and-adaptability-of-wastewater-conveyance-systems?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 6 jun. 2026.

10. HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Journal of the Hydraulics Division, New York, v. 108, n. 1, p. 14-20, 1982.

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

12. HESPANHOL, I. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios e recarga de aquíferos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 75–95, 2002.

13. HOLLING, C. S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Palo Alto, v. 4, p. 1–23, 1973.

14. HOLLOWAY, Timothy Grant; WILLIAMS, John; OUELHADJ, Djamila; CLEASBY, Barry. Process stress, stability and resilience in wastewater treatment processes: a novel conceptual methodology. *Journal of Cleaner Production*, v. 282, p. 124434, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124434. Disponível em:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620344784?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 5 jun. 2026.

15. KUMAR, M.; NGASEPAM, J.; DHANGAR, K.; MAHLKNECHT, J.; MANNA, S. Critical review on negative emerging contaminant removal efficiency of wastewater treatment systems: Concept, consistency and consequences. Bioresource Technology, v. 352, p. 127054, 2022. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127054. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127054. Acesso em: 27 de jul. 2026.

16. MEEROW, S.; NEWELL, J. P.; STULTS, M. Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, v. 147, p. 38–49, 2016.

17. METCALF & EDDY / AECOM. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2016.

18. TCHOBANOGLOUS, G.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

19. ROTAVA, J. Resiliência socioecológica: conceitos, abordagens e aplicações. 2014. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.
.
20. SOCIAL SCIENCE STATISTICS. *Student t-Test Calculator for 2 Independent Means*. Disponível em: Social Science Statistics - T-Test Calculator. Acesso em: 7 jun. 2026.

21. SWEETAPPLE, C.; FU, G.; BUTLER, D. Identifying resilient wastewater treatment strategies using a combined operational and system-level approach. *Water Research*, v. 147, p. 274–285, 2019.

22. VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: lodos ativados e remoção biológica de nitrogênio*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

23. VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: lodos ativados*. Belo Horizonte: UFMG, 2016.