

1247 - REFORMA E DESEMPENHO DE ETES DE PEQUENO PORTE: UM ESTUDO DE CASO COM REATORES BATELADA SEQUENCIAIS

Jessica Rodrigues Pires da Silva⁽¹⁾

Engenheira Química (UERJ), mestre em Tecnologias Ambientais e Sustentabilidade (NYIT) e doutora em Engenharia Química (COPPE/UFRJ).

Isabela Schneider Bezerra de Menezes⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (UFF). Estagiária de Processos de Tratamento na concessionária Rio+Saneamento.

Hellen Carolina Nunes Queiroz⁽¹⁾

Engenheira Ambiental (UFSCar). Pós-graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária (UERJ). Analista de Suporte a Operações na concessionária Rio+Saneamento.

Wagner dos Santos⁽¹⁾

Licenciatura em Química (IFF), mestre em Ciências Naturais (UENF). Supervisor de Operações na concessionária Rio+Saneamento.

Maxwel Tavares Ramos⁽¹⁾

Técnico de Operações na concessionária Rio+Saneamento.

Endereço⁽¹⁾: Rua Victor Civita, 66 – 2º andar – Barra Olímpica – Rio de Janeiro – Rio de Janeiro - 13563-120 - Brasil - Tel: +55 (21) 97296-9327 e-mail: hellen.queiroz@riomaissaneamento.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo de caso de duas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) de pequeno porte, localizadas no Estado do Rio de Janeiro, que empregam processo de tratamento biológico do tipo Reator Batelada Sequencial (RBS). O estudo englobou as etapas de diagnóstico de situação inicial das duas ETEs, concepção das modificações propostas para a reforma das ETEs com suas motivações e os resultados operacionais após a conclusão das reformas. Objetivou-se, assim, avaliar com base nestes resultados a aplicabilidade do processo RBS em cenários similares, para ETEs de pequeno porte. A escolha por esse processo se deu devido à sua estrutura compacta, operação automatizada e potencial para reduzir custos construtivos e operacionais, sendo uma alternativa viável para municípios pouco populosos. Após a conclusão das reformas, as ETEs foram monitoradas ao longo de 10 meses, com coletas compostas semanais para análise de DBOs, SST, DQO e Nitrogênio Amoniacal. Os dados permitiram avaliar a eficiência do sistema e calcular indicadores operacionais como carga orgânica volumétrica (COV) e coeficiente de rendimento (*yield*) aparente associado à produção de lodo. Os resultados indicaram altas eficiências de remoção de DBOs (94–95%), SST (95–96%) e Nitrogênio Amoniacal (70–96%), atendendo às exigências da Resolução Conema 90/NOP-INEA-45. Os valores de *yield* aparente calculados foram baixos (0,12–0,15 kgSSV/kgDQO), inferiores ao esperado para sistemas convencionais de lodos ativados, o que sugere alta eficiência na digestão aeróbia do lodo. A menor produção de lodo resulta em vantagens operacionais significativas, especialmente em contextos com restrições orçamentárias. Conclui-se que o RBS convencional é uma alternativa recomendável para ETEs de pequeno porte, especialmente em regiões com exigências legais rigorosas e necessidade de soluções economicamente viáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Reator Batelada, ETE, lodo de ETE, Yield aparente, tratamento de esgoto

INTRODUÇÃO

O Brasil enfrenta desafios complexos para alcançar a universalização do saneamento básico. No que se refere a Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), há preocupação com os custos associados à sua construção e operação. Esses custos são particularmente impactantes em pequenos sistemas, que não se beneficiam do ganho de escala (SANTOS, 2018). Em sistemas menores, vários custos construtivos (instrumentação e automação, construção de estruturas de apoio operacional) e operacionais (mão de obra, logística de remoção de resíduos) tornam-se proporcionalmente mais onerosos.

Esses desafios são ampliados por uma legislação ambiental cada vez mais rigorosa no Brasil. Nos últimos anos, as legislações ambientais de estados como Rio de Janeiro (INEA, 2021) e Minas Gerais (COPAM/CERH-MG, 2022)

foram revisadas, exigindo maiores remoções de matéria orgânica, além de remoção de nutrientes e outros parâmetros. Essas maiores exigências demandam soluções tecnológicas robustas, mas que sejam economicamente viáveis e de operação simplificada, principalmente quando se tratam de pequenas estações em municípios ou distritos pouco populosos.

Diante desse cenário, o presente trabalho apresenta o estudo de caso referente a reativação, reforma e operação de duas ETEs de pequeno porte (operando com vazões na faixa de 2,5-3,0 L/s) que utilizam a tecnologia de Reator Batelada Sequencial (RBS) convencional, sem tratamento primário, para tratamento de esgoto sanitário no Estado do Rio de Janeiro. O RBS tem possibilidade de operação automatizada dos ciclos dos reatores e estrutura compacta, devido a ausência de decantadores, uma vez que as etapas de aeração e decantação ocorrem de forma alternada no mesmo tanque (METCALF & EDDY, 2014). Por esses motivos, tem potencial de ter custos construtivos e operacionais relativamente mais baixos, sendo por isso bom candidato de escolha tecnológica para uso em pequenos sistemas de tratamento.

OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é apresentar o estudo de caso completo, englobando as etapas de diagnóstico de situação inicial das duas ETEs, concepção das modificações propostas para a reforma da ETE com suas motivações e os resultados operacionais após a conclusão da reforma e, assim, avaliar com base nestes resultados a aplicabilidade desta tecnologia em cenários similares de ETEs de pequeno porte.

METODOLOGIA UTILIZADA

O procedimento metodológico para este estudo de caso foi dividido nas seguintes etapas:

- Diagnóstico das ETEs: conforme encontrada pela empresa operadora que assumiu a concessão dos serviços de água e esgoto, incluindo informações dos projetos originais e análise das limitações dos projetos originais;
- Descrição das modificações propostas para a reforma da ETE: estas foram concebidas para permitir não só a reativação, mas também modernização dos processos originais de tratamento, visando: a) melhorar a qualidade do efluente tratado, b) obter maior confiabilidade e consistência no atendimento às metas de qualidade exigidas pela regulamentação ambiental e c) reduzir os custos operacionais no tratamento.;
- Apresentação do desempenho da ETE por meio dos resultados operacionais obtidos, uma vez concluído o período de comissionamento da unidade: os parâmetros DBO₅, SST e Nitrogênio Amoniacal foram monitorados por meio de coletas compostas semanais de esgoto bruto e tratado. Assim, para o trabalho foram utilizados os dados gerados de um total de 31 coletas para a ETE 1 e 39 coletas para a ETE 2. As amostras coletadas foram enviadas para laboratório externo credenciado, e analisadas seguindo os procedimentos descritos na literatura de referência (APHA, 2012). As análises foram realizadas dentro de um período de 10 meses no ano de 2024.

Para complementar a discussão do desempenho operacional da ETE foram calculados, utilizando os dados reais, dois indicadores operacionais fundamentais para o monitoramento e controle de processos de tratamento biológico: o coeficiente de rendimento (*yield*) aparente e a Carga Orgânica Volumétrica (COV). O *yield* aparente foi calculado com base na produção de lodo em base seca acumulada (kg SSV) x DQO removida acumulada. Uma linha de tendência linear foi ajustada aos dados, e o coeficiente angular da equação obtida representou o *yield* aparente.

Para o cálculo da produção de lodo em base seca acumulada, quantificou-se o lodo desaguado na chegada do destino final (compostagem) por pesagem. Portanto, foram utilizadas essas massas pesadas, declaradas no Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) desse resíduo, para os cálculos. O teor de sólidos suspensos totais (SST) nesse resíduo foi considerado como 24% para a ETE 1 e 20% para a ETE 2, pois estes valores são a média dos valores encontrados em algumas análises pontuais feitas nos resíduos. Como sólidos suspensos voláteis (SSV) não foram analisados diretamente no resíduo, foi adotado um fator de conversão de 0,85 kg SSV/kg SST, conforme Metcalf & Eddy (2014), chegando-se, por fim, ao valor de produção de lodo em base seca (kg SSV) para cada período de tempo (sendo cada período definido como o tempo decorrido entre o envio de uma carga de resíduos para compostagem e o envio da próxima carga, ou seja, o intervalo entre as datas do MTR).

Para o cálculo da DQO removida, calculou-se a diferença entre as DQOs do esgoto na entrada e saída da estação. Como várias coletas e análises de DQO foram feitas em cada período de tempo, utilizou-se o valor médio delas, obtendo-se, assim, um valor de DQO removida média para cada período. A DQO acumulada, por fim, representa a soma das DQOs removidas médias dos períodos.

A COV (kg DQO/m³.dia) também foi calculada, utilizando-se a equação 1 (Metcalf & Eddy, 2014):

$$COV = \frac{Q \cdot DQO}{V \cdot \frac{10^3 \text{ g}}{\text{kg}}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde, para COV aplicada, considerou-se os valores de DQO (g/m³) do esgoto bruto e, para COV removida, a diferença entre as DQO do esgoto na entrada e saída da estação. A vazão Q diária foi calculada usando os dados medidos por medidores de vazão instalado nas ETEs, e V representa os volumes úteis dos reatores, sendo 388 m³ no reator 1 e 317 m³ no reator 2, reatores das ETEs 1 e 2, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto original das ETEs era composto por tratamento preliminar (gradeamento grosseiro e remoção de areia) e tratamento secundário do tipo RBS. A ETE 1 possuía dois reatores construídos em paralelo, porém a ETE 2 possuía somente um reator construído, resultando em previsão de esgoto bruto entrando no reator durante os ciclos de decantação e esvaziamento, com expectativa de impactar significativamente a eficiência do tratamento. Ambas as ETEs apresentavam construído um compartimento de digestor aeróbico, a aeração era fornecida por aeradores de superfície (dois no tanque de aeração e um no digestor), e a aberturas e fechamento das válvulas durante os ciclos de RBS eram feitas de modo manual. Nenhuma das duas ETEs possuía unidades de desidratação de lodo, dispositivos de medição de vazão, nem áreas operacionais e de armazenamento químico. Além destas limitações, o estado geral de toda a unidade era bastante ruim (Figuras 1 e 2) e as ETEs encontravam-se desativadas.



Figura 1: imagens da ETE1 antes da reforma, com as estruturas muito comprometidas.



Figura 2: imagens da ETE2 antes da reforma, com as estruturas muito comprometidas.

A reforma das ETEs incluiu, nos dois casos, a substituição dos aeradores superficiais por uma malha difusora de bolhas finas nos tanques de aeração, alimentada por sopradores tipo *roots*. Essas mudanças foram incluídas não apenas para melhorar a qualidade do efluente tratado, para garantia do atendimento à remoção de DBO5 abaixo de 40 mg/L e MBAS abaixo de 2 mg/L, conforme exigido pela legislação ambiental estadual vigente, mas também para garantir um desempenho consistente e resiliente para atingir consistentemente essas metas. As reformas também incluíram a adição de etapa de desaguamento de lodo da ETE, usando bolsas geotêxteis filtrantes (geobag) com pré-polimerização de lodo, a adição de medidor de vazão de água ultrassônico em um canal Parshall que foi construído, e a automatização completa da unidade. O desaguamento no local foi incluído para reduzir os custos operacionais, eliminando a necessidade de transportar lodo líquido. Um tanque de equalização foi adicionado à ETE2 para receber esgoto bruto, durante os ciclos de decantação e descarga de clarificado. Instalações operacionais como laboratórios, armazenamento de produtos químicos e salas de operação também foram construídas nas 2 ETEs. As Figura 3 e 4 ilustram essas melhorias.



Figura 3: imagens da ETE1 após a reforma.



Figura 4: imagens da ETE2 após a reforma

As Figuras 5 a 10 apresentam os resultados dos parâmetros analisados de DBO₅, Nitrogênio Amoniacal e SST das ETEs 1 e 2 após a reativação das ETEs. As médias de eficiência de remoção estão apresentadas na Tabela 1.

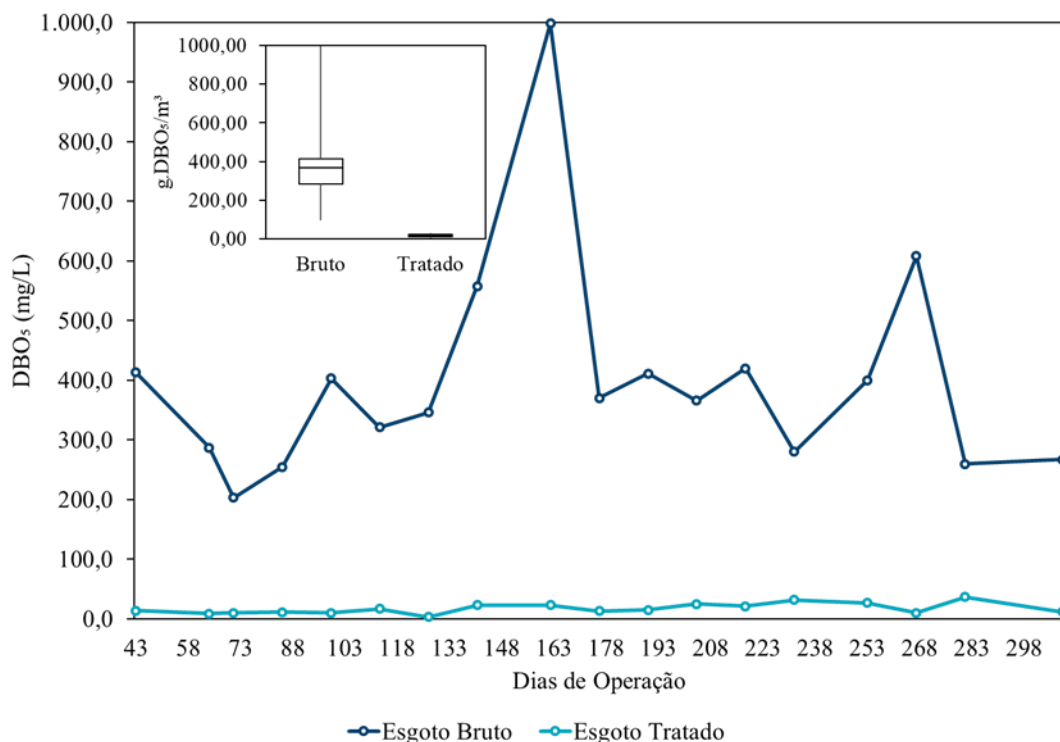


Figura 5: DBO₅ de entrada e saída na ETE 1.

Fonte: Os autores.

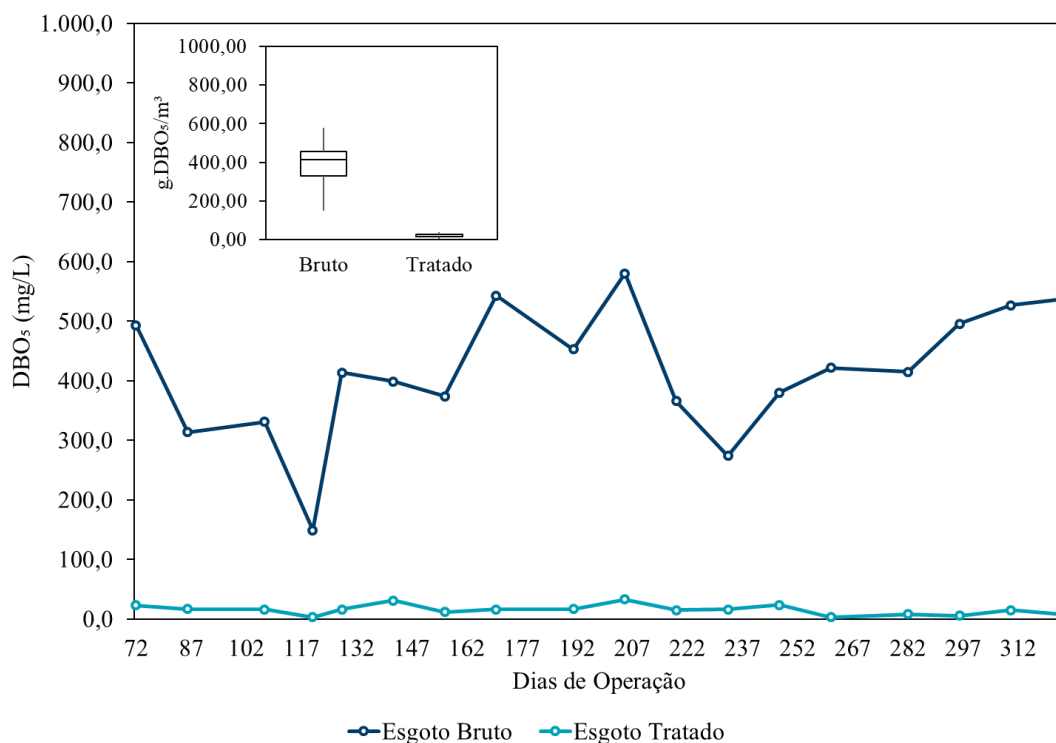


Figura 6: DBO₅ de entrada e saída na ETE 2.

Fonte: Os autores.

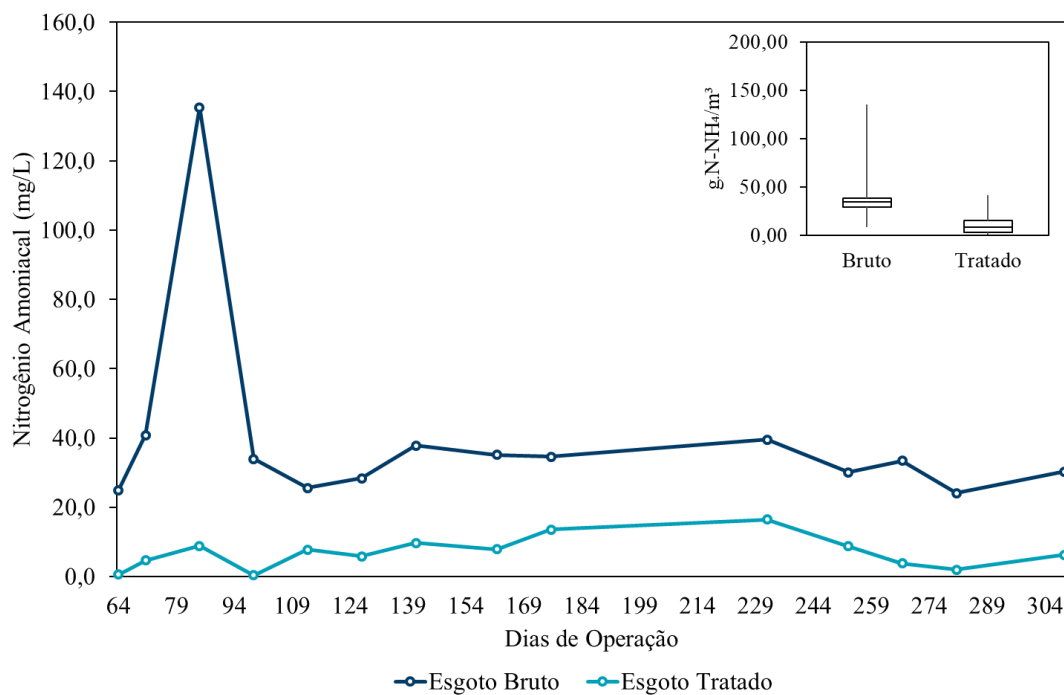


Figura 7: Nitrogênio amoniacal de entrada e saída na ETE 1.

Fonte: Os autores.

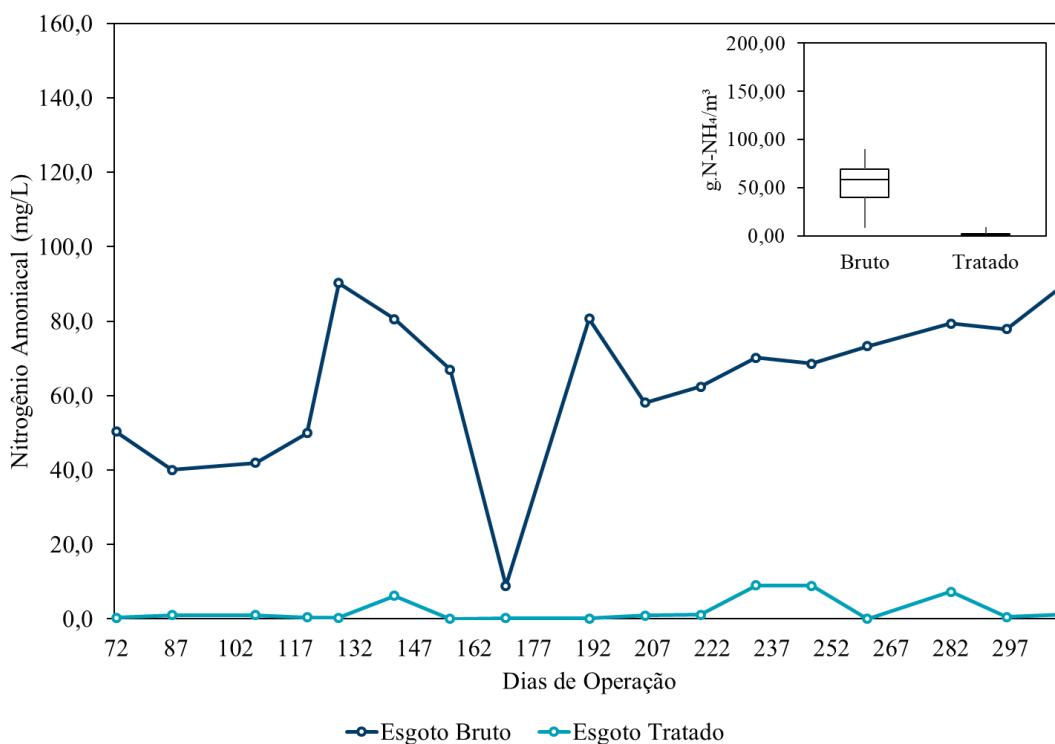


Figura 8: Nitrogênio amoniacal de entrada e saída na ETE 2.

Fonte: Os autores.

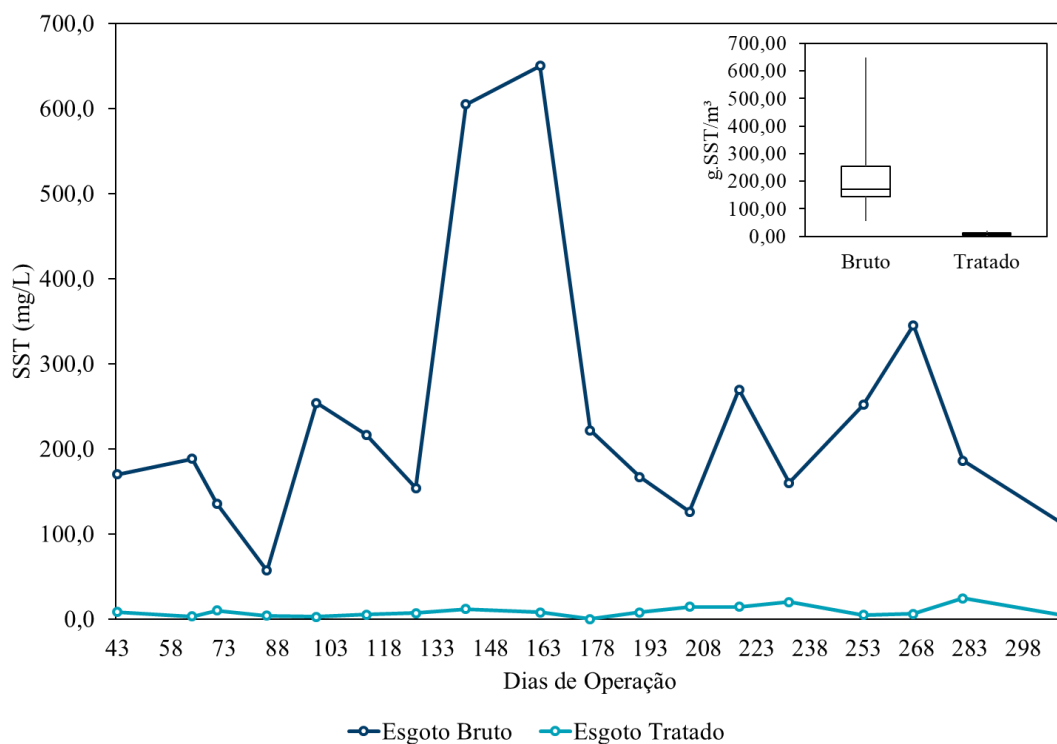


Figura 9: SST de entrada e saída na ETE 1.

Fonte: Os autores

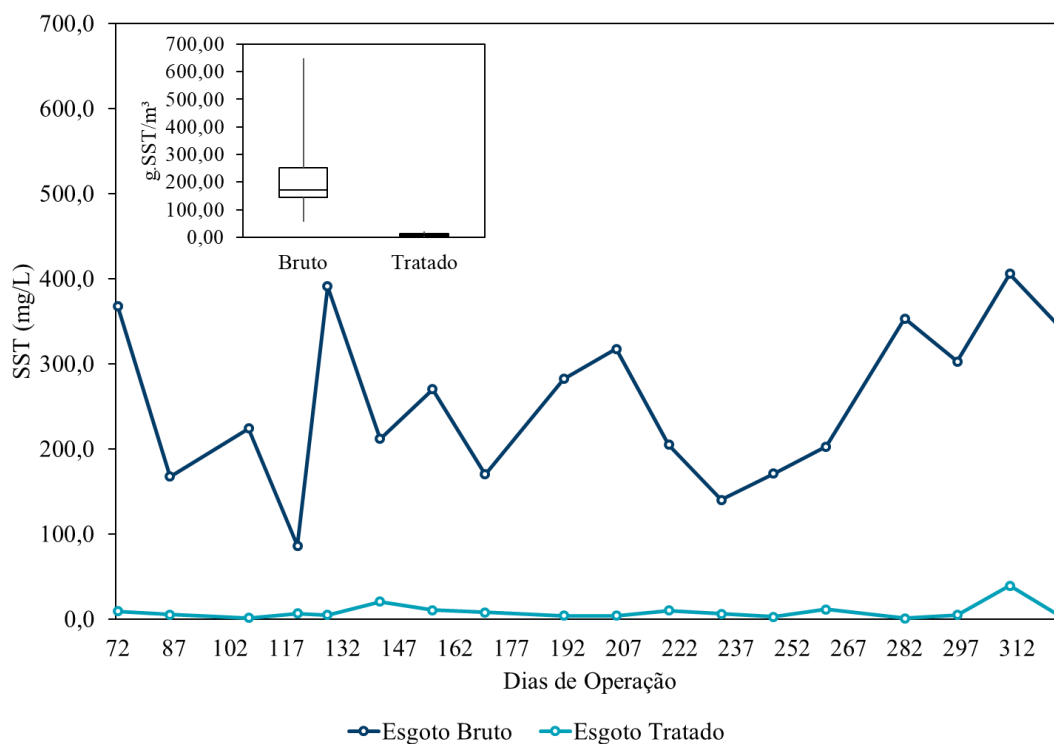


Figura 10: SST de entrada e saída na ETE 2.

Fonte: Os autores.

Tabela 1: Remoção das ETEs.

Parâmetro	Remoção	
	ETE 1	ETE 2
DBO ₅	94%	95%
SST	95%	96%
N-NH ₄	70%	96%

Fonte: Os autores.

Os coeficientes de rendimento (*yield*) aparentes, calculados através da produção de lodo (kg SSV) e DQO removida nas ETEs 1 e 2, foram respectivamente, 0,12 e 0,15 (Figuras 11 e 12). As Figuras 13 e 14 apresentam a carga orgânica volumétrica aplicada e removida.

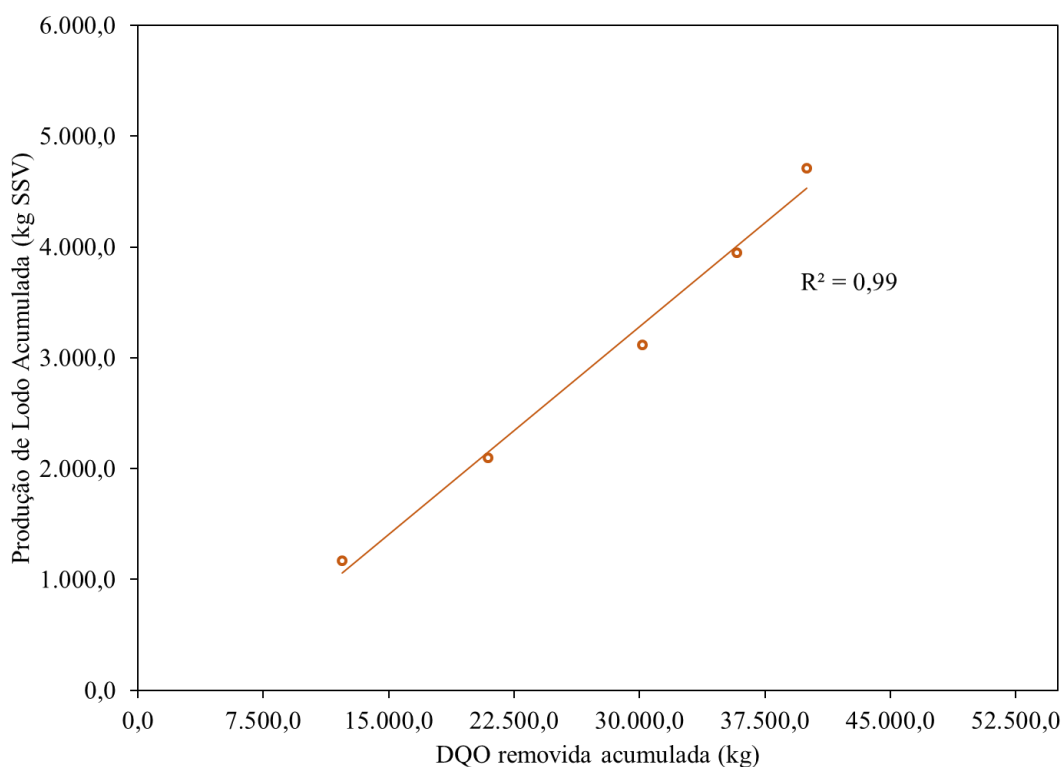


Figura 11: Produção de lodo em relação à DQO removida na ETE 1. Coeficiente de rendimento (*yield*) aparente calculado de aproximadamente 0,12.

Fonte: Os autores.

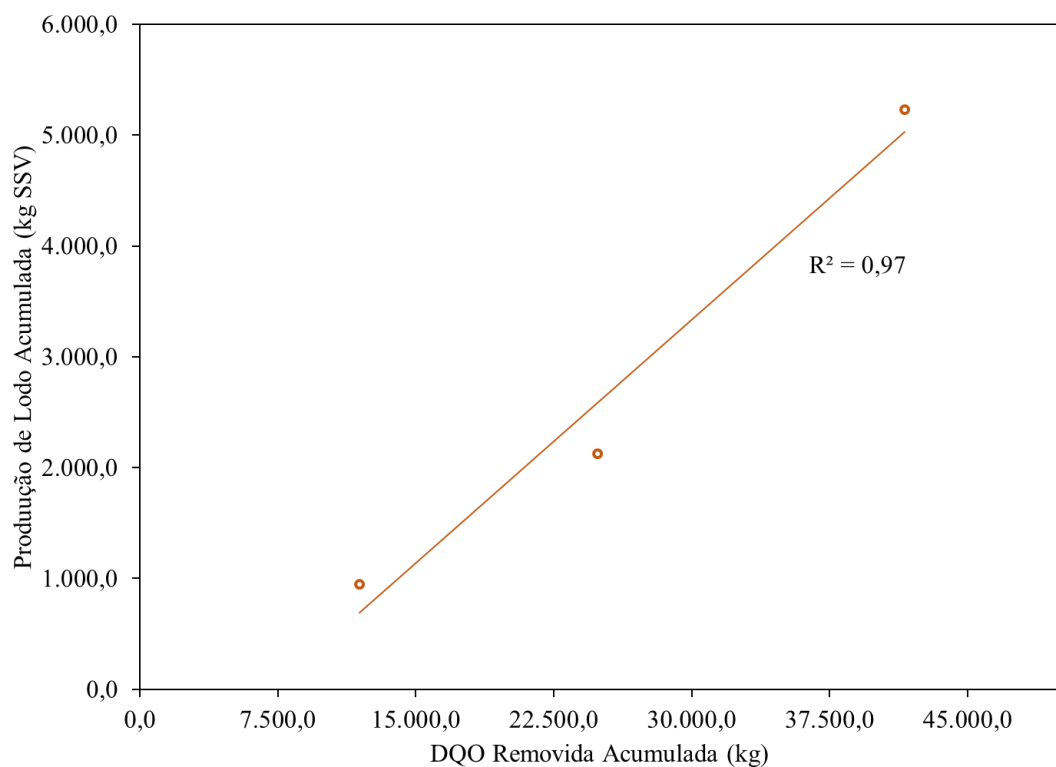


Figura 12: Produção de lodo em relação à DQO removida na ETE 2. Coeficiente de rendimento (*yield*) aparente calculado de aproximadamente 0,15.

Fonte: Os autores.

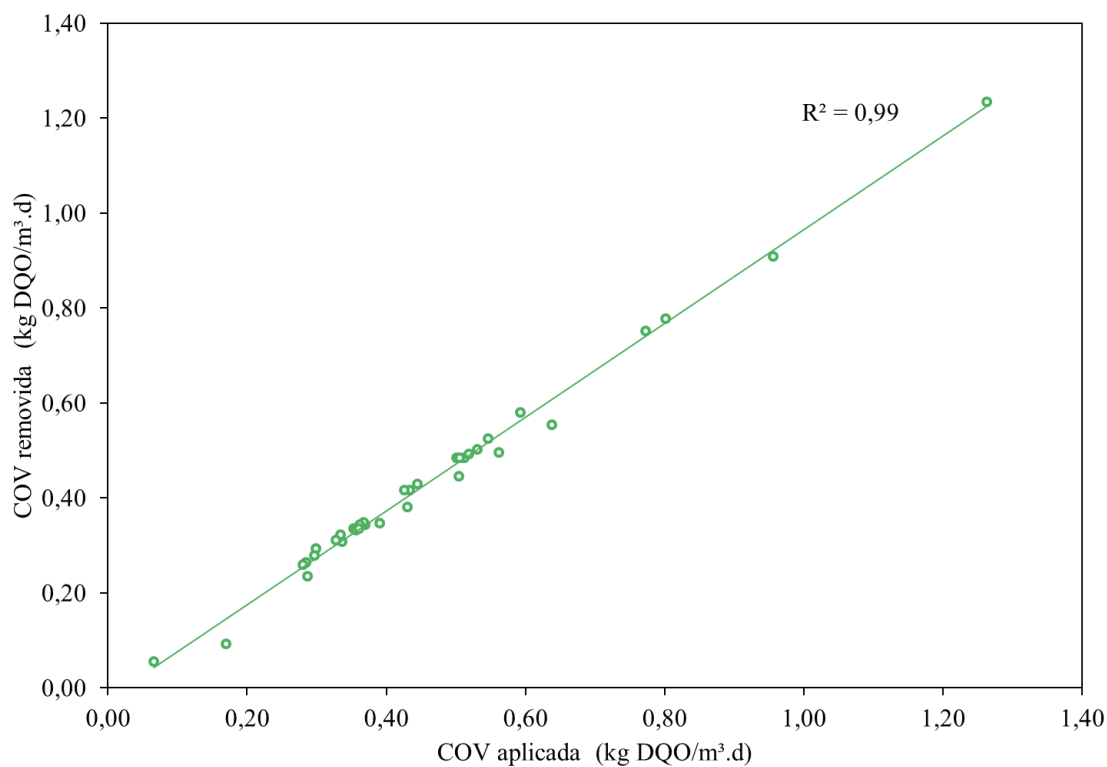


Figura 13: Carga orgânica volumétrica aplicada e removida na ETE 1.

Fonte: Os autores.

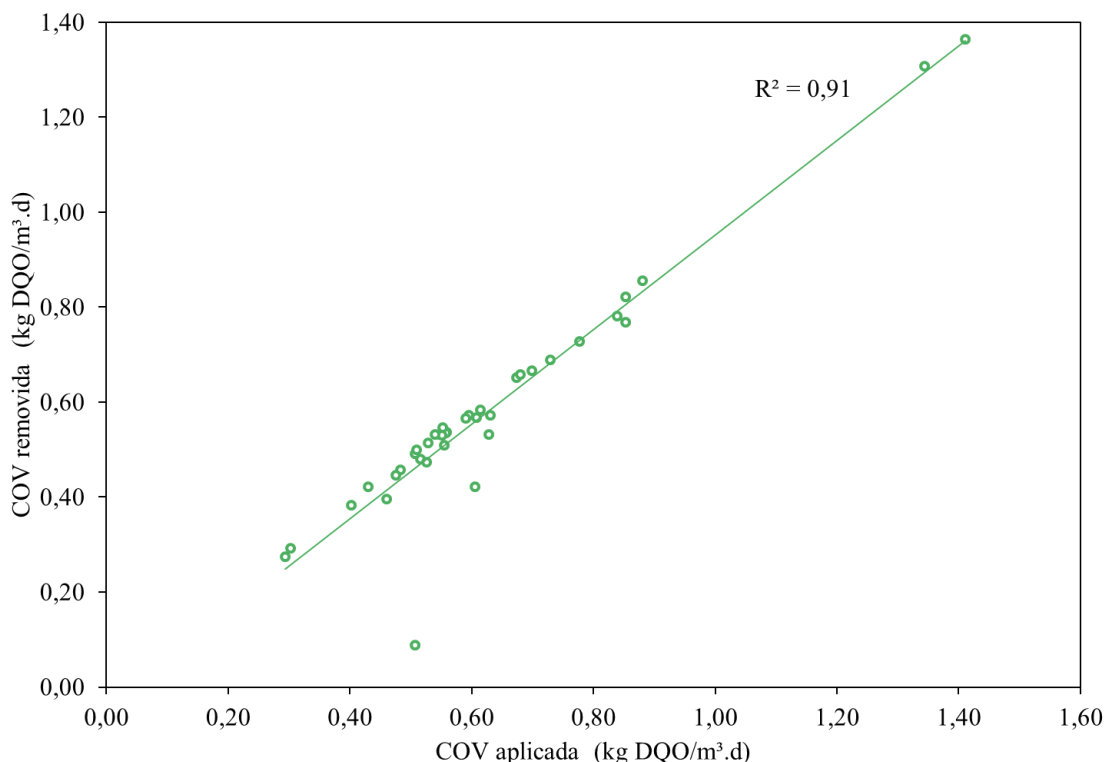


Figura 14: Carga orgânica volumétrica aplicada e removida na ETE 2.

Fonte: Os autores.

As ETEs estudadas apresentam consistentemente elevadas eficiências de remoção para os parâmetros DBO₅, SST e Nitrogênio Amoniacal, conforme esperado pela literatura para a tecnologia RBS (Von Sperling, 2007; Jordão & Pessoa, 1995). Ao comparar as Tabelas 1 e 2 é possível observar que as eficiências de remoção de DBO₅, SST das estações foram condizentes com as típicas, enquanto a remoção de nitrogênio amoniacal superou as expectativas, alcançando valores superiores aos típicos. Essa eficiência elevada pode ser atribuída à alta idade de lodo (>8 dias) praticada nas estações, associada a temperaturas relativamente elevadas na região (25-35°C). Ambas condições favorecem o processo de nitrificação (Metcalf & Eddy, 2014; Jordão & Pessoa, 1995).

Tabela 2: Eficiências de remoção típicas.

Parâmetro	Eficiência de remoção típica (%)
DBO ₅	85-95 ¹
SST	85-95 ¹
N-NH ₄	40-70 ²

Fontes: Von Sperling (2007); Jordão & Pessoa (1995)

O coeficiente de rendimento (*yield*) aparente das estações, calculado em 0,12-0,15, é substancialmente inferior à faixa típica de 0,4 a 0,6 kg SSV/kg DQO de valores de *yield* de síntese para processo de remoção de DBO em lodos ativados convencionais (Von Sperling, 2007; Metcalf and Eddy, 2014). Baixos valores de *yield* podem indicar maior eficiência metabólica microbiana, com maior mineralização da matéria orgânica, o que resulta em uma menor produção de biomassa ativa (Metcalf and Eddy, 2014). As principais causas dos baixos valores de *yield* observados são, possivelmente, a alta idade do lodo e a etapa de digestão aeróbia do lodo, realizada antes do desaguamento. A digestão estabiliza o lodo, reduzindo a fração volátil da biomassa e, conseqüentemente, sua massa total.

Os baixos valores de *yield* obtidos mostram que incluir o processo de digestão do lodo foi vantajoso, pois compensou a ausência de tratamento primário para a depuração de matéria orgânica em suspensão, visto que a estação não possui decantador primário justamente para reduzir custos construtivos e dar mais simplicidade operacional. As Figuras 13 e 14 demonstram a aplicação de altas cargas orgânicas diretamente nos reatores. Valores baixos de *yield* têm uma importante implicação operacional positiva: com menor produção de lodo a ser desaguado e transportado, resulta em uma redução significativa dos custos operacionais (OPEX) relacionados ao transporte e disposição final de resíduos.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados apresentados neste estudo evidenciam a eficácia da estratégia de reforma para reativação das 02 ETEs, e dados operacionais mostram que a tecnologia de RBS aplicada a ETEs de pequeno porte oferece um desempenho operacional robusto, com elevada eficiência de remoção de matéria orgânica e N-amoniaco total. A legislação ambiental estadual do Rio de Janeiro, Resolução Conema 90/NOP-45-INEA (INEA, 2021) estabelece DBO5 e SST inferiores a 40 mg/L e N-amoniaco total inferior a 20 mg/L. Portanto, os resultados demonstraram que as estações têm plena capacidade de atendimento à legislação, mesmo se tratando de uma legislação mais restritiva, com exigência de remoção de N-amoniaco total e valores de DBO5 muito inferiores a legislação de âmbito federal, a CONAMA 430/2011 (onde o limite é 120 mg/L de DBO5) (Brasil, 2011).

Ainda, os coeficientes de rendimento (*yield*) aparentes notavelmente baixos, de 0,12-0,15 kg SSV/kg DQO removida, comprovam uma redução significativa na produção de lodo, minimizando custos operacionais. Embora essa característica seja desejável em qualquer operação de ETE, ela se torna ainda mais relevante no contexto de ETEs de pequeno porte, onde os custos fixos operacionais são proporcionalmente mais elevados. Nesse cenário, é fundamental reduzir os custos variáveis, como aqueles relacionados ao manejo e disposição do lodo.

Os resultados deste estudo reforçam o RBS convencional como uma solução viável e robusta para o tratamento de esgoto em contextos de pequenas comunidades/pequenas ETEs, apresentando vantagens especialmente em localidades com necessidade de cumprimento de legislação ambiental rigorosa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - SMEWW. 22 ed. American Public Health Association, 2012.
- 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, 16 maio 2011.
- INEA – Instituto Estadual do Ambiente. Norma Operacional INEA nº 45. Estabelece critérios e padrões para o lançamento de efluentes líquidos em corpos hídricos receptores no Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: INEA, 2011.
- JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995
- METCALF, L.; EDDY, H. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.
- MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 08, de 21 de novembro de 2022. Diretrizes para o lançamento de efluentes nos corpos hídricos de Minas Gerais. Belo Horizonte: Governo de Minas Gerais, 2022.
- SANTOS, F.N.B. Análise comparativa dos custos operacionais de 44 estações de tratamento de esgoto na região sudeste do Brasil. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 122 p. 2018.
- VON SPERLING, M. Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors. 1. ed. London: IWA Publishing, 2007. ISBN 9781780402123. DOI: 10.2166/9781780402123.