Avaliação da aplicabilidade de um reator anaeróbio compartimentado (RAC) em sistemas descentralizados para o tratamento de esgoto

Evaluation of the applicability of a compartmentalized anaerobic reactor in decentralized systems for sewage treatment

Data de entrada: 06/03/2025
Data de aprovação: 17/10/2025

Mirella Bianca Gama de Almeida[1]* | Arthur Bispo Ferreira[1] | Adriano Gonçalves dos Reis[1] | Eduardo Lucas Subtil[2] | Fabiana Alves Fiore[1]

DOI: https://doi.org/10.36659/dae.2026.122

Almeida MBG https://orcid.org/0009-0005-4899-6585
Ferreira AB https://orcid.org/0000-0001-5991-8324
Reis AG https://orcid.org/0000-0001-6465-4538
Subtil EL https://orcid.org/0000-0003-3674-2674
Fiore FA https://orcid.org/0000-0002-2430-8240

Resumo

A expansão dos serviços de saneamento é um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. Para isso, o Brasil deve minimizar o déficit de cobertura de saneamento, especialmente em pequenos municípios. Sistemas descentralizados de tratamento de esgoto, como os que utilizam processos anaeróbios, são alternativas viáveis. Este estudo avaliou a eficiência de um reator anaeróbio compartimentado (RAC) como opção descentralizada de tratamento de esgoto. Conduzido em uma unidade experimental no Parque de Inovação Tecnológica de São José dos Campos, São Paulo, o processo foi monitorado com parâmetros físico-químicos: $DBO_{5,20}$, OD, pH, SST, entre outros. A eficiência do sistema foi avaliada por meio de análise de confiabilidade, com o acúmulo de lodo como evento de interesse. Os maiores índices de remoção de $DBO_{5,20}$, turbidez e SST foram de 83,9%, 91,4% e 95,8%, respectivamente. Os valores de temperatura atenderam aos padrões de descarga, e os níveis de pH foram adequados para digestão anaeróbia, com média de 7,68 ± 0,19 no afluente e 7,47 ± 0,17 no efluente. Os resultados indicaram redução na produção de lodo, com maior digestão do esgoto e menor geração de resíduos. A análise de confiabilidade apontou alta probabilidade de acúmulo excessivo de lodo, sugerindo a necessidade de monitoramento de $DBO_{5,20}$ e SST para melhorar a eficiência operacional. O estudo demonstrou que o RAC é viável para o tratamento de esgoto, mas exige descarte frequente de lodo.

Palavras-chave: Esgoto doméstico. Reator anaeróbio compartimentado. Tratamento anaeróbio.

Abstract

The expansion of sanitation services is one of the United Nations' Sustainable Development Goals. To achieve this, Brazil must address needs to minimize its sanitation coverage deficit, particularly in small municipalities. Decentralized collective sewage treatment systems, especially those with anaerobic processes, offer viable such alternatives. This study evaluated the efficiency of a compartmentalized anaerobic reactor (CAR) as a decentralized

[1] Instituto de Ciência e Tecnologia – Universidade Estadual Paulista – São José dos Campos – SP – Brasil
[2] Laboratório de Tratamento de Águas Urbanas e Reúso de Água – Universidade Federal do ABC – Santo André – SP – Brasil
* **Autor correspondente:** mirella.bianca@unesp.br

sewage treatment option. Carried out in an experimental pilot-scale unit at the Technological Innovation Park of São José dos Campos, São Paulo, the process was monitored using the following physicochemical parameters: alkalinity, conductivity, color, biochemical oxygen demand (DBO5,20), dissolved oxygen, pH, settleable solids, total suspended solids (TSS), temperature, and turbidity. System performance efficiency was assessed by reliability analysis, with sludge generation as the event of interest. Statistical analysis defined a limit state equation and applied reliability modeling using analysis via Pystra, highlighting parameter sensitivity related to the probability of system failure. The highest removals of efficiencies for DBO5,20, turbidity, and TSS totaled 83.9, 91.4, and 95.8%, respectively. Temperature values compiled with met discharge standards, and pH levels were optimal for anaerobic digestion, averaging 7.68 ± 0.19 and 7.47 ± 0.17 for influent and effluent sewage, respectively. The results indicated reduced sludge production, with greater sewage digestion generating less waste. Reliability analysis showed a high probability of excessive sludge generation, underscoring the need to monitor DBO5,20 and TSS to improve operational efficiency. This study showed that CAR is viable for sewage treatment but requires frequent sludge disposal. The developed reliability analysis can enhance operational efficiency, crucial for future CAR studies in decentralized systems.

Keywords: *Domestic sewage. Compartmentalized anaerobic reactor. Anaerobic treatment.*

1 INTRODUÇÃO

Entre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) promulgados pela Organização das Nações Unidas (ONU) estão a gestão sustentável e a garantia de acesso à água limpa e serviços de saneamento, com metas que preveem cooperação internacional, para que os países em desenvolvimento possam aprimorar sua capacidade de fornecê-los. A universalização do saneamento é crucial para atingir outros objetivos, como saúde e bem-estar, vida na água e cidades e comunidades sustentáveis (ONU, 2015).

No Brasil, o saneamento básico é um direito de todos os cidadãos e inclui o fornecimento de água potável, esgotamento sanitário, drenagem de águas pluviais e manejo de resíduos sólidos urbanos (Brasil, 2007). Diferentes regiões do país apresentam coberturas desiguais em domicílios urbanos com sistemas de saneamento. No país, pouco mais da metade do esgoto gerado é tratado (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, 2020), sendo esta a principal causa da poluição de águas superficiais. Quando não tratado adequadamente, o esgoto compromete a qualidade da água e seus múltiplos usos (Agência Nacional de Águas – ANA, 2017).

A região Sudeste do Brasil apresenta as maiores taxas de cobertura de sistemas de saneamento, enquanto as regiões Norte e Nordeste possuem os maiores déficits. A baixa cobertura desse serviço também ocorre em domicílios rurais do país, com exceção da região Sul, que apresenta melhor desempenho nesse aspecto (Brasil, 2020a). Essa situação é mais comum em pequenos municípios ou em condições de vulnerabilidade socioeconômica (Nascimento; Ferreira; Pinto, 2021). A desigualdade no acesso aos serviços de saneamento básico reflete no desenvolvimento dos territórios e impacta a saúde da população (Instituto Trata Brasil, 2018).

A atual cobertura de saneamento nos pequenos municípios do país destaca a necessidade de atenção especial para atingir a meta nacional de coleta e tratamento de esgoto em mais de 90% estabelecida pelo Marco Legal do Saneamento (Brasil, 2020b). Para isso, é necessário inovar os processos convencionais de tratamento de esgoto, considerando as especificidades de comunidades isoladas e de baixa renda que não

são atendidas por sistemas centralizados e de alto custo. Garantir a minimização da contaminação dos corpos receptores do país requer assegurar que o esgoto sanitário seja adequadamente tratado para, pelo menos, garantir as condições de lançamento de efluentes previstas na Resolução CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011).

Nos tratamentos convencionais, geralmente empregados em sistemas centralizados, o esgoto de diferentes locais é coletado e transportado até estações de tratamento. Esses sistemas exigem infraestrutura robusta, como extensas redes de tubulação e bombeamento, o que resulta em elevados custos de implantação que, em geral, são compensados pelo ganho de escala obtido com a operação (Capodaglio *et al.*, 2017; Subtil; Sanchez; Cavalhero, 2016). Esses sistemas são responsáveis pelo atendimento de grande percentual da população residente nos centros urbanos. Como alternativa, a abordagem descentralizada propõe que o tratamento ocorra próximo ao local de geração dos efluentes, favorecendo a expansão desse serviço em áreas rurais, em municípios de pequeno porte (Kutty; Leow; Shahurudin, 2016) e nos locais onde há inviabilidade técnica ou econômica de implantação de sistemas centralizados. Destaca-se que os custos de instalação e operação das soluções descentralizadas são elevados, porém, quando implantadas estrategicamente, podem viabilizar o alcance de regiões com baixa densidade populacional e sem acesso a redes coletoras, fundamental para garantir o atingimento das metas de universalização do saneamento (Brasil, 2020b; Jung; Narayanan; Cheng, 2018).

No Brasil, para o esgoto doméstico, entre as tecnologias mais empregadas para tratamento, estão as fossas sépticas, os sistemas de lodo ativado e os reatores anaeróbios de manta de lodo – UASB (Subtil; Hespanhol; Mierzwa, 2013). Já nos sistemas descentralizados, destacam-se soluções como biorreatores de membrana, arranjos integrados de reatores anaeróbios, *wetlands* construídos, biodigestores, tanques de evapotranspiração e diferentes tipos de filtros (Ferreira *et al.*, 2021). Nesses arranjos, podem ser utilizados organismos fotossintetizantes, como microalgas, incorporados para auxiliar nos processos de tratamento, embora não constituam uma tecnologia isolada.

Em termos de eficiência na remoção de carga orgânica, os melhores desempenhos têm sido observados em sistemas de lodo ativado convencional acoplados à filtração terciária e em unidades de lodo ativado em batelada com aeração prolongada (Neves *et al.*, 2015). No entanto, esses sistemas apresentam desvantagens relevantes: requerem alto grau de mecanização, demandam significativo aporte energético para aeração e geram grandes volumes de lodo residual. Tais características limitam sua sustentabilidade em contextos descentralizados, sobretudo quando o objetivo é apenas a remoção de matéria orgânica (Subtil *et al.*, 2019).

Entre os sistemas anaeróbios utilizados para o tratamento descentralizado de esgoto estão os reatores anaeróbios compartimentados (RACs), que operam como unidade de tratamento isolada (Silva; Silva; Sarti, 2017; Yulistyorini *et al.*, 2019) ou acoplados a tecnologias complementares de tratamento sequencial, como reatores anaeróbios de manta de lodo, permitindo alcançar eficiência de remoção de DBO acima de 60% (Neves *et al.*, 2015); ou integrados ao processo eletroquímico, com remoção de DBO e SST acima de 90% (Aqaneghad; Moussavi, 2016).

Com um design simples, composto por câmaras sequenciais, os reatores anaeróbios compartimentados são operados com alto tempo de retenção de sólidos (TRS), baixos custos operacionais e baixa demanda de mão de obra para manutenção (Rodrigues *et al.*, 2020). Essa configuração simples permite maior ação de microrganismos, sendo eficaz na remoção de materiais orgânicos e suspensos (Aqaneghad; Moussavi, 2016).

A confiabilidade de um sistema RAC pode ser definida como a probabilidade de desempenho adequado de seus componentes ao longo de um período e sob condições operacionais específicas. Trata-se de uma quantidade determinada pelo percentual de tempo de operação do sistema em que os requisitos especificados são atendidos (Tchobanoglus; Burton; Stensel, 2003). A partir disso, é possível definir a eficiência do RAC analisando a influência de diversos fatores na confiabilidade da estação de tratamento de esgoto, incluindo o risco de possíveis perturbações operacionais, como o acúmulo de lodo (Andraka, 2020).

Apesar da eficiência e do baixo custo relatados na operação de RACs, no Brasil, o uso dessa tecnologia em escala real ainda é incipiente, com poucos dados publicados (Ferreira *et al.*, 2021). Isso leva à hipótese de que melhorias e pesquisas contínuas são necessárias para que seu uso seja considerado como uma das alternativas para a ampliação da cobertura de saneamento nos territórios. Diante disso, esta pesquisa foi conduzida para avaliar a operação de um RAC como sistema alternativo de tratamento descentralizado de esgoto em escala piloto, sob condições de tratamento autônomo semelhantes às que ocorrem em pequenas comunidades.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da pesquisa experimental, foi construída uma estação de tratamento de esgoto em escala piloto, feita de material composto de fibra de vidro. O sistema foi instalado e operado no Parque Tecnológico de São José dos Campos. O reator anaeróbio compartimentado (RAC) faz parte do pequeno sistema descentralizado, conforme mostrado na Figura 1.

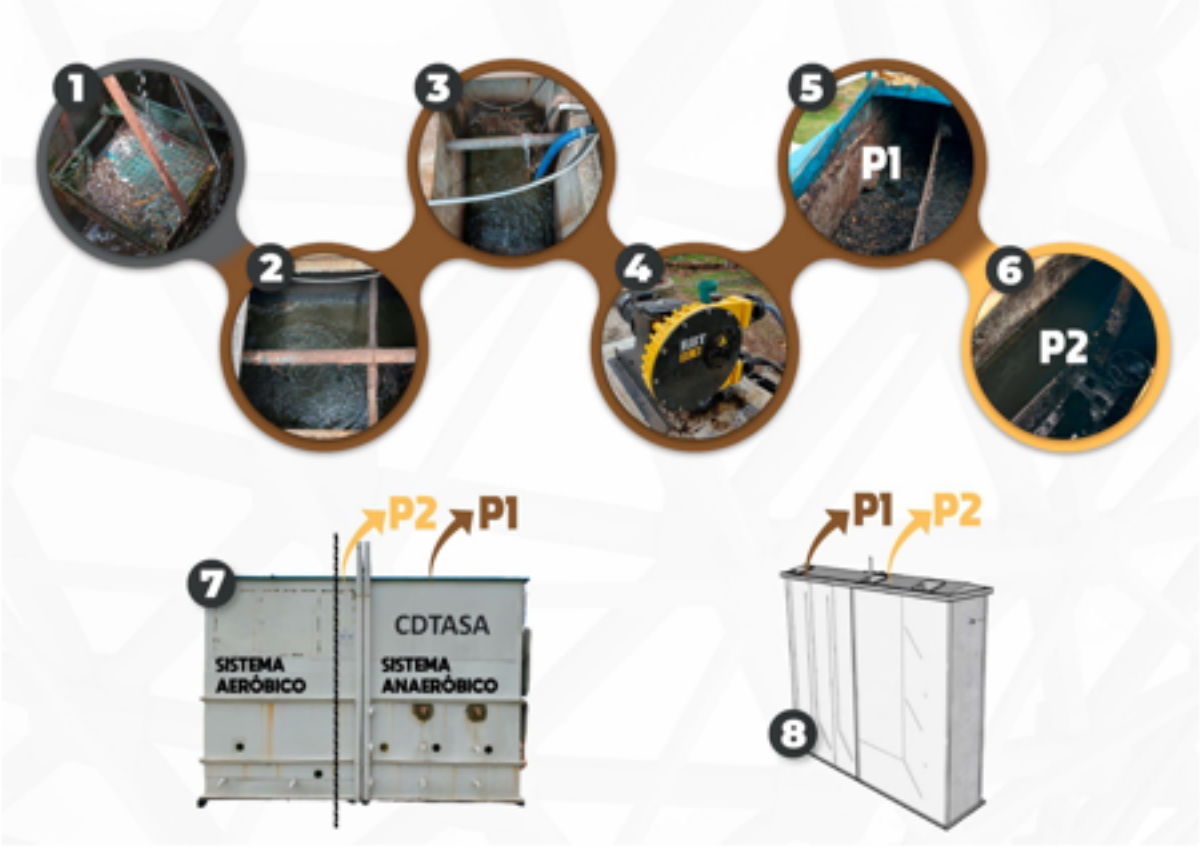

Figura 1 – Etapas do sistema piloto de tratamento de esgoto.

O sistema consiste em um tratamento preliminar por meio de gradeamento (1), seguido por um tanque de equalização (2), que recebe todo o efluente gerado no estabelecimento. Parte do fluxo do Parque Tecnológico de São José dos Campos é coletada (3) por bombeamento em fluxo contínuo (4) e alimenta o RAC avaliado nesta pesquisa a partir dos pontos de amostragem P1, de esgoto afluente (5), e P2, de esgoto após o tratamento anaeróbio (6), sendo estes componentes da estrutura do RAC (7 e 8).

O RAC estudado possui três câmaras de dimensões semelhantes, dispostas em série, permitindo o tratamento contínuo do esgoto afluente, com um tempo de detenção hidráulica de 12 horas e uma vazão de 3,6 m^3 d^{-1}. Após o tratamento pelo RAC, o esgoto é direcionado para a unidade de tratamento aeróbio, que não faz parte do escopo desta pesquisa.

Para este estudo, o RAC foi operado por um período de 5 meses e sua eficiência foi medida semanalmente, utilizando os parâmetros especificados na Tabela 1. As coletas de amostras foram realizadas nos pontos de amostragem P1 e P2, que se referem ao esgoto afluente e ao esgoto tratado, respectivamente. As coletas foram realizadas de acordo com o Método 1060 do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (Lipps; Baxter; Braun-Howland, 2018) e os ensaios foram conduzidos no laboratório de pesquisa institucional.

Tabela 1 – Parâmetros analisados para avaliar a eficiência do RAC.

Parâmetro	Método Analítico	Referência
Alcalinidade	Potenciométrico	POPFQ-UNI 413, Método 2320 B
Condutividade	Condutivímetro	POPFQ-UNI 212, Método 2510 B
Cor	Espectrofotométrico	POPFQ-UNI 214, Método 2120 B
DBO5,20	Incubação por 5 dias a 20ºC	POPFQ-UNI 402, Método 5210 B
Oxigênio Dissolvido (OD)	Eletroanalítico	POPFQ-UNI 420, Método 4500 G
pH	Potenciométrico	POPFQ-UNI 411, Método 4500 H^+
Sólidos Sedimentáveis (SS)	Gravimétrico	POPFQ-UNI 410, Método 2540 F
Sólidos Suspensos Totais (SST)	Gravimétrico	POPFQ-UNI 409, Método 2540 D and E
Temperatura	Termômetro	POPFQ-UNI 424
Turbidez	Turbidímetro	POPFQ-UNI 211, Método 2130 B

Fonte: Lipps, Baxter e Braun-Howland (2018).

A Resolução CONAMA nº 430 (Brasil, 2011) foi utilizada como referência para avaliar a eficiência do RAC no tratamento de esgoto. Essa normativa determina, entre outros requisitos, que o pH dos efluentes se mantenha entre 5 e 9; que a temperatura não provoque elevação superior a 3°C na zona de mistura em relação ao corpo receptor e não ultrapasse 40ºC; que os sólidos sedimentáveis não ultrapassem a concentração de 1,0 mL/L em ensaio de uma hora; e que a demanda bioquímica de oxigênio apresente remoção mínima de 60%, ou, quando não tecnicamente exequível, não exceda a concentração de 120 mg/L no efluente tratado.

Durante a operação do sistema, também foi desenvolvido um protocolo operacional para a remoção de lodo, e a possível influência desse

descarte na eficiência do reator foi avaliada. Para possibilitar a estimativa do volume de lodo removido do RAC, foram consideradas as dimensões físicas de cada compartimento do reator, conforme destacado na Equação 1.

$$V_{lodo} = l \times w \times h_{wcl} \quad (1)$$

Em que V_{lodo} se refere ao volume de lodo removido, calculado ao multiplicar o comprimento (l) pela largura (w) e a altura do nível da coluna d'água após a remoção do lodo (h_{wcl}), sendo que esta última variável depende da quantidade de lodo produzido no sistema. Esse procedimento de remoção de lodo levou em consideração que os três compartimentos têm as mesmas dimensões.

Para o esvaziamento de cada compartimento, o lodo foi extraído das válvulas previamente instaladas para esse fim, iniciando-se a descarga pela válvula mais alta até que houvesse uma maior proporção de líquido em relação ao lodo. Em seguida, a operação foi realizada nas válvulas inferiores. Antes de realizar a mesma operação nos outros compartimentos, aguardou-se até que o nível da água retornasse à condição inicial na estação, para evitar danos à estrutura do sistema. Após a descarga de todo o lodo, a diferença entre os níveis iniciais e finais do efluente foi verificada com uma fita métrica de precisão de 0,05 m, considerando o nível inicial como a altura da estação em capacidade projetada. É importante destacar que, embora a caracterização físico-química detalhada e o tratamento do lodo gerado no RAC não façam parte do escopo desta pesquisa, tema avaliado por Batista *et al.* (2023), o volume de lodo removido é o parâmetro operacional central. O foco deste estudo está em utilizar o acúmulo de lodo como um evento de interesse para avaliar sua influência na eficiência do reator, medida pelos demais parâmetros de qualidade do efluente sendo a Turbidez, Sólidos Sedimentáveis e DBO.

Para avaliar a eficiência do sistema, foi empregada a análise de confiabilidade com base no procedimento proposto por Andraka (2020). A análise de confiabilidade está condicionada à ocorrência de um evento de interesse, ou seja, um fator operacional que interfere diretamente na eficiência do sistema. Assim, o acúmulo de lodo no RAC foi considerado o evento de interesse a ser analisado, uma vez que o acúmulo deste material nos compartimentos do reator, aumento na idade do lodo, implica diretamente na redução da biodegradabilidade, redução de sólidos voláteis e arraste da carga orgânica entre as diferentes fases do tratamento (Chen *et al.*, 2020).

Dada essa condição, foram avaliadas as propriedades estatísticas dos dados que descrevem a qualidade dos efluentes brutos e tratados para verificar a variabilidade da qualidade do efluente por meio dos parâmetros físico-químicos aferidos durante a operação do sistema. Por meio dessas análises, pode-se determinar a função de distribuição que descreve a tendência probabilística de alcance de eficiência operacional adequada (Andraka, 2020; Hines; Montgomery; Goldsman, 2000). Para tal, compreende-se como confiabilidade do sistema a semelhança e proximidade da distribuição dos parâmetros avaliados em função de distribuições estatísticas teóricas (Barth, 1982).

Para as análises estatísticas, foi utilizado o software Jamovi (versão 2.3.21), e os testes de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov foram adotados para verificar a normalidade dos dados. As comparações entre os parâmetros nos pontos de amostragem P1 e P2 foram realizadas utilizando o teste T de Student para variáveis independentes (dados paramétricos) ou o teste de Wilcoxon (dados não paramétricos), considerando $p<0,05$ para determinar a significância estatística (Hines; Montgomery; Goldsman, 2000).

Após a verificação das distribuições estatísticas, foi definida a Equação de Estado Limite (EEL), que descreve a unidade de análise do sistema, determinada pelo parâmetro físico-químico

avaliado em comparação com o limite de descarte estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430 (Brasil, 2011). A EEL é definida como o valor da resistência (fornecimento) de uma determinada variável, subtraída do valor da respectiva variável em relação ao pedido (demanda) (Ang; Tang, 1984). No contexto deste trabalho, a resistência é atribuída como o valor dos parâmetros que influenciam ao acúmulo de lodo no sistema, enquanto a demanda é fixada no limite de eficiência de remoção da Resolução CONAMA nº 430/2011 para descarte, ou até mesmo no valor mínimo de eficiência das medições do respectivo parâmetro. A partir disso, definiu-se como falha do sistema a condição onde o valor da resistência é menor que a demanda. Compreendendo este efeito como uma instabilidade operacional que resulta, entre outros fatores, no carreamento de sólidos para o efluente, conhecido como arraste de lodo.

Com isso, a falha do sistema é definida quando o valor da resistência se torna menor que o da demanda. Essa condição indica uma instabilidade operacional que pode levar ao arraste de lodo – ou seja, o carreamento de sólidos para o efluente –, resultando na redução da eficiência do sistema e no potencial descumprimento dos padrões de descarte.

As EELs definidas no estudo forneceram a base para a aplicação da análise de confiabilidade por meio do modelo *Python Structural Reliability Analysis* (Pystra). Sendo transcrito na linguagem como um modelo matemático de distribuição dos valores de eficiência de remoção dos parâmetros sensíveis ao acúmulo de lodo no RAC. Esse modelo matemático resulta na confiabilidade do sistema e permite verificar a sensibilidade dos parâmetros à probabilidade de falha do sistema, sendo esta a condição em que a eficiência está abaixo do adequado, resultando no acúmulo de lodo. A sensibilidade, neste contexto, refere-se à capacidade da eficiência de remoção dos parâmetros avaliados em influenciar o acúmulo de lodo (Myhre *et al.*, 2022).

O modelo Pystra realiza a análise de confiabilidade com base na Simulação de Monte Carlo (MCS). Uma abordagem que, a partir da faixa de valores de tendência central (média e desvio padrão) da eficiência de remoção, e da distribuição de probabilidade, gera números aleatórios para representar o comportamento das EELs, que descrevem as condições operacionais ideais do sistema (Taheriyoun; Bahrami; Moradinejad, 2014), em diferentes condições. Essa técnica é baseada na resolução iterativa do modelo de programação linear que aproxima o comportamento do sistema, indicando a probabilidade de acúmulo de lodo devido à baixa eficiência operacional (Ostfeld, 2001).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra o comportamento dos parâmetros físico-químicos avaliados no tratamento de esgoto durante o período de operação do RAC. A caixa representa os percentis de 25 a 75, as linhas verticais (bigodes) representam os valores mínimo e máximo, e a barra horizontal indica a concentração mediana.

Os parâmetros que apresentaram distribuição paramétrica foram: alcalinidade, condutividade, cor, DBO, pH, temperatura e turbidez. O teste T de Student mostrou que, nesses casos, há uma diferença significativa ($p > 0,05$) (Hines; Montgomery; Goldsman, 2000) entre as características do esgoto afluente e efluente para o RAC. Quanto aos parâmetros não paramétricos: SS, SST e OD, o teste de Wilcoxon mostrou que não há diferença significativa ($p < 0,05$) entre estes.

A Figura 3 mostra o comportamento da DBO, SST e T ao longo do período de operação do sistema.

Os dados obtidos indicam uma melhoria na eficiência do RAC a partir do terceiro mês de operação, evidenciada no gráfico da Figura 3. O período que antecedeu a melhora no desempenho do sistema, compreendido entre o primeiro mês e a metade do

segundo mês de operação, foi classificado como o período de aclimatação. O aumento da eficiência também foi observado após os procedimentos pontuais de remoção de lodo da unidade. Esses descartes foram iniciados após o período de aclimatação e realizados à medida que se verificava, durante a operação, aumento na concentração de sólidos sedimentáveis e da turbidez. A maior remoção de turbidez alcançada foi de 91,43%, registrada após o terceiro procedimento de remoção de lodo (indicado no gráfico da Figura 3), com resultados de eficiência subsequentes sempre superiores a 80%, como também evidenciado por Silva, Silva e Sarti (2017), que avaliaram um reator anaeróbico/aeróbico compartimentado (RCAA), obtendo valores médios abaixo de 6 NTU.

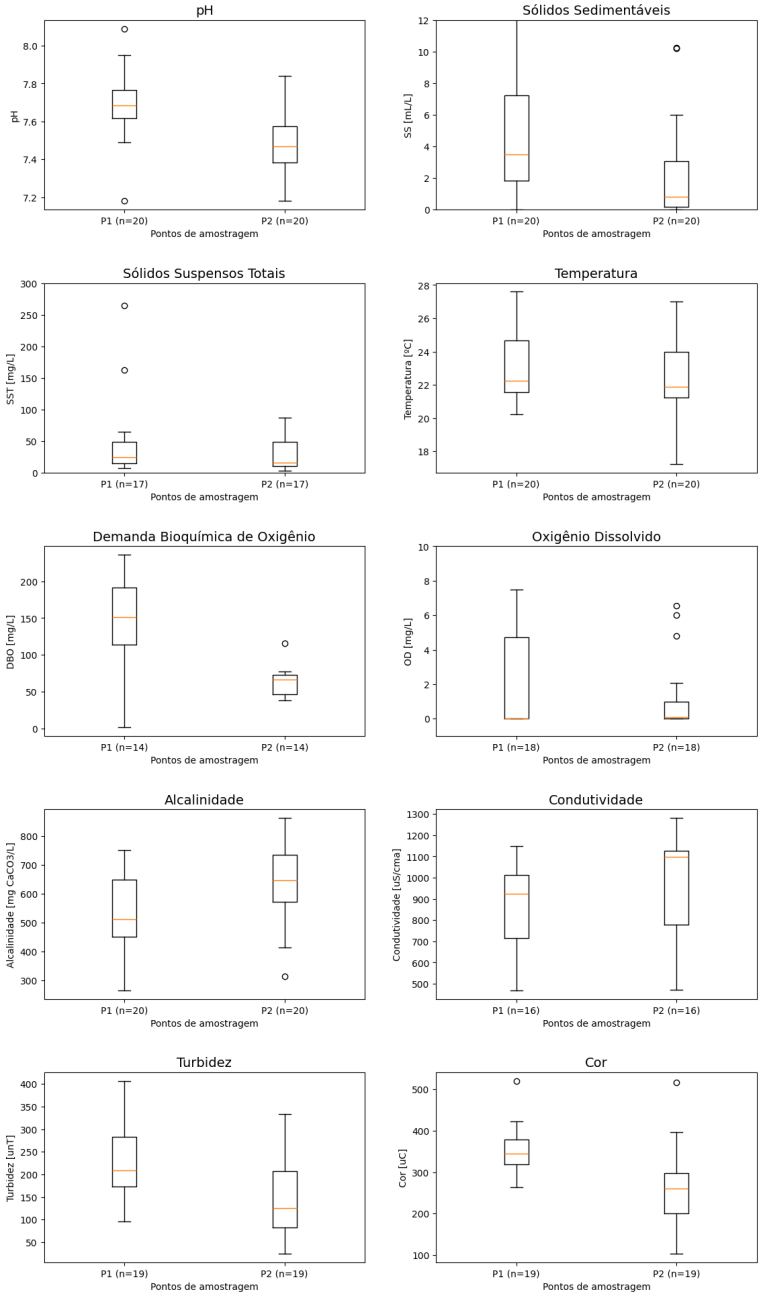

Figura 2 – Comportamento dos parâmetros físico-químicos avaliados para o afluente (P1) e efluente (P2) do RAC.

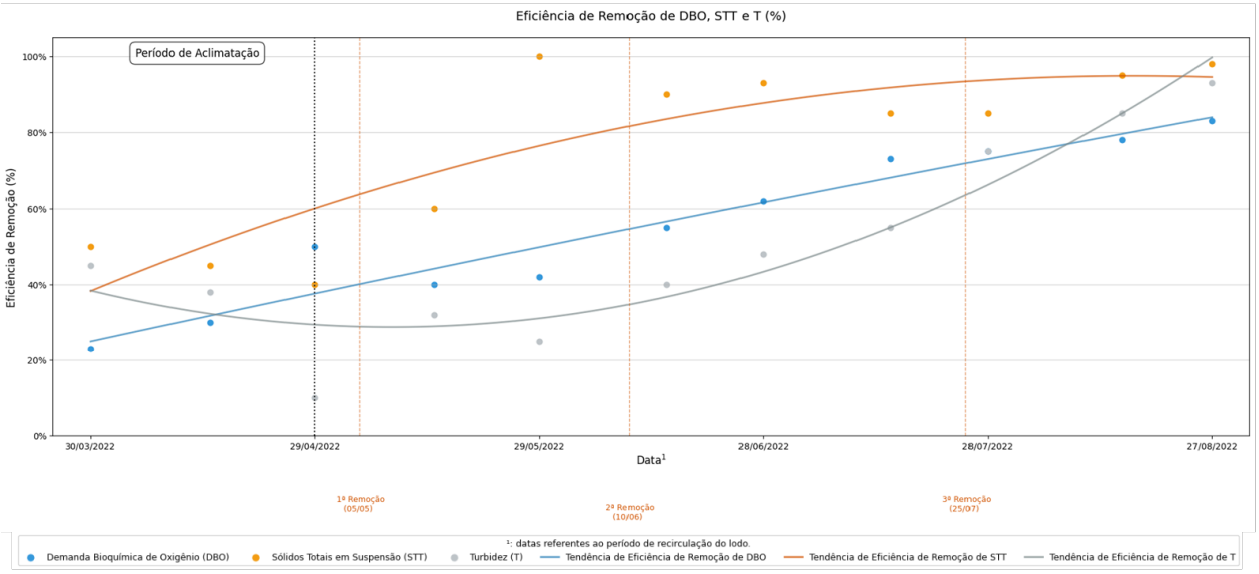

Figura 3 – Comportamento da eficiência da remoção de DBO, SST e T ao longo do período de operação do sistema.

Para esse parâmetro, os valores médios foram de 232,87 ± 95,67 e 153,82 ± 85,94 NTU para P1 e P2, respectivamente. A remoção média de DBO foi de 54,46%, e a maior remoção alcançada foi de 83,90%, após o segundo procedimento de remoção de lodo. Essa eficiência foi superior aos resultados obtidos por Yulistyorini *et al.* (2019) e Neves *et al.* (2015), que avaliaram um reator anaeróbico com bafos (ABR) e um reator anaeróbio de leito de lodo em fluxo ascendente (UASB), respectivamente. No primeiro caso, a eficiência média de carga orgânica foi de 74%; no segundo estudo, a eficiência foi de 68% para ABR e 55% para UASB.

As concentrações de DBO influentes ao RAC variaram de 66,70 mg L^{-1} a 236,00 mg L^{-1}, exibindo uma faixa de variação menor do que a evidenciada no estudo de Yulistyorini *et al.* (2019). Apesar da variabilidade da carga orgânica afluente, em ambos os estudos, foi constatado que o RAC foi capaz de manter uma eficiência de tratamento superior a 70%, o que é um fator positivo para a operação de unidades descentralizadas mais suscetíveis a essas variações.

As médias de alcalinidade para P1 e P2 foram, respectivamente, 530,87 ± 127,4 e 634,75 ± 131,89 mg CaCO3 L^{-1}. O aumento da alcalinidade na saída do RAC também foi reportado por Silva, Silva e Sarti (2017) e Yenji, Munavalli e Koli (2020), indicando um bom cenário operacional, uma vez que altos níveis de alcalinidade garantem tamponamento médio, influenciando diretamente os valores de pH e sua estabilidade (Silva; Silva; Sarti, 2017).

As medições de pH variaram de 7,18 a 8,09 para P1 e de 7,18 a 7,84 para P2. Os valores médios nesses pontos foram 7,68 ± 0,19 e 7,47 ± 0,17, respectivamente, e estão em conformidade com a faixa de pH considerada ideal para digestão anaeróbica, que é de 6,50 a 7,50 (Rodrigues *et al.*, 2020), além de estarem em conformidade com a legislação estabelecida (Brasil, 2011). Não houve temperaturas consideradas inadequadas para o tratamento biológico inerente ao esgoto afluente do RAC (Von Sperling, 2005). Os dados obtidos da avaliação do sistema indicam que o RAC minimizou a temperatura do efluente em apenas 3,39%, mas tanto o esgoto influente quanto o efluente do RAC apresentaram condições de temperatura dentro dos padrões de lançamento em corpos d'água estabelecidos no país, ou seja, abaixo de 40°C (Brasil, 2011).

Em relação ao P2, o valor médio de sólidos sedimentáveis foi de 1,93 ± 3,07 ml L^{-1}, após o início do procedimento. Embora esse resultado não esteja em conformidade com a legislação brasileira, que é de 1 mL L^{-1} (Brasil, 2011), 78,57% das amostras apresentaram valores que atendem ao padrão de lançamento. A concentração de sólidos totais suspensos (SST) apresentou grande variação durante o período de estudo. Vale ressaltar que a maior eficiência, de 95,86%, foi obtida após a primeira remoção de lodo, um resultado equivalente aos encontrados no estudo de Aqaneghad e Moussavi (2016), que obtiveram remoções de 93% e 91% para SST. Após as operações subsequentes de remoção de lodo, os maiores valores de eficiência foram 63,79% e 80,14%, respectivamente.

O volume de lodo removido foi calculado a partir da diferença entre as alturas, que são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Volume de lodo descartado no procedimento operacional.

Dias de acúmulo de lodo	42	33	55
Média de lodo gerado por dia (m3)	0.0423	0.0227	0.0130
Volume de lodo/Volume de efluente tratado (%)	1.175	0.631	0.3611

A partir dos dados obtidos, observou-se uma diminuição na produção de lodo por volume de efluente tratado ao longo da operação do reator, indicando uma tendência positiva na eficácia do RAC. De acordo com Patwardhan, Surampalli e Zhang (2015), o aumento na digestão de esgoto resulta em menor acúmulo de resíduos. Vale destacar que o período inicial de operação do RAC, com maior produção de lodo, pode ser associado à fase de estabilização do sistema, conforme proposto por Pang *et al.* (2023).

Considerando o acúmulo de lodo no sistema como o evento de interesse, verificou-se que, entre os parâmetros avaliados, os resultados para DBO, SST e turbidez foram os mais influenciados pelo acúmulo de lodo nos compartimentos do RAC, uma vez que as maiores eficiências de remoção desses parâmetros foram obtidas após o procedimento de remoção de lodo. Diante dessa evidência, para modelar a confiabilidade do sistema, testes via Pystra indicaram que a distribuição normal de probabilidades foi a mais adequada para as variáveis que representam a eficiência de remoção dos parâmetros destacados, todos com valores de p inferiores ao limite de significância adotado ($p < 0,05$), conforme os testes de Kolmogorov-Smirnov (Hines; Montgomery; Goldsman, 2000), alinhando-se aos resultados apresentados por Andraka (2020).

Com a distribuição normal de probabilidades definida, a EEL do sistema foi estabelecida como uma equação linear representando o comportamento dos parâmetros influenciados pelo acúmulo de lodo, bem como os limites de suas respectivas eficiências de remoção. A equação representativa da EEL do sistema é destacada na Equação 2 (Equação do Estado Limite), M_{RAC}. É importante enfatizar que o limite indicativo para o DBO seguiu a eficiência mínima de remoção de 60%, recomendada pela CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011), enquanto para SST e turbidez, seguiu os valores mínimos de eficiência do sistema avaliado, 40% e 30%, respectivamente.

$$\mathbf{M_{RAC}} = (\mathrm{DBO} - a - b \times \mathrm{T}) + (\mathrm{SST} - d)) \quad (2)$$

Como os dados seguem uma distribuição normal, a EEL resultante é a soma das EEL de cada

parâmetro, conforme descrito por Ang e Tang (1984). As estatísticas descritivas dos valores de eficiência dos parâmetros indicaram uma correlação significativamente positiva entre DBO e turbidez (Hines; Montgomery; Goldsman, 2000). Assim, a EEL foi ajustada para considerar essa relação entre os valores por meio das constantes a e b. Em que "a" refere-se ao produto do limite de 0,60 para a eficiência de remoção de DBO e o valor mínimo de eficiência de turbidez de 0,30, enquanto "b" indica o valor de interseção da equação da linha que descreve a correlação entre as variáveis. Para o valor representado pela constante d, adotou-se o valor mínimo de eficiência de SST durante a operação do sistema.

Com base no modelo de EEL definido, a análise de confiabilidade via Pystra foi realizada utilizando a Equação 3 (Equação do Estado Limite do RAC), em que os respectivos valores para as variáveis DBO, Turbidez (T) e Sólidos Suspensos Totais (SST) foram simulados via SMC, com base nas medidas de tendência central, médias e desvios padrão dos valores de eficiência obtidos durante a operação do RAC.

$$M_{RAC} = (DBO - 0.8951 - 0.153 \quad T) + (SST - 0{,}40)) \quad (3)$$

A resolução iterativa da equação linear estabelecida resultou em uma probabilidade de 63,7% de acúmulo excessivo de lodo no sistema, capaz de afetar os resultados dos parâmetros DBO, Turbidez e SST, considerando os valores centrais dos dados empíricos obtidos durante a operação do RAC. Isso indica uma alta probabilidade de ineficiência operacional do sistema e de tratamento inadequado do efluente, que afetará os resultados dos parâmetros Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Turbidez e Sólidos Suspensos Totais (SST), resultados que reafirmam os propostos por Ostfeld (2001).

Além disso, o modelo também permitiu a verificação percentual da sensibilidade dos parâmetros à probabilidade de falha, ou seja, a solução possibilitou a análise quantitativa da influência do acúmulo de lodo sobre cada parâmetro (Myhre *et al*., 2022). Para tal, a sensibilidade é destacada como os valores referentes aos quadrados dos cossenos direcionais, coeficientes alfa das linhas representativas dos planos de aproximação das simulações e valores empíricos representados na EEL, que são: 40,39% para DBO, 1,97% para turbidez e 57,63% para SST. Esses resultados indicam que o gerenciamento da quantidade de lodo no sistema garante uma boa eficiência em termos de DBO, Turbidez e SS. Tais elementos convergem com a proposta de Andraka (2020) e destacam a importância do monitoramento de DBO e, especialmente, de SST no sistema de tratamento de águas residuais, associados à manutenção do acúmulo de lodo, que pode melhorar a eficiência operacional geral do sistema.

4 CONCLUSÃO

Durante a operação do reator anaeróbio compartimentado (RAC) avaliado nesta pesquisa, foi verificado o potencial de implementação do RAC e a essencialidade da operação adequada da tecnologia para garantir sua eficiência no tratamento de esgoto. Também foi possível constatar que o reator é capaz de tratar diferentes concentrações de matéria orgânica presentes nos efluentes, fator comum em redes coletoras de esgoto, associado à variação no número de usuários e seus diversos usos, alterando a concentração da carga orgânica.

A eficiência do RAC avaliado na remoção de DBO atingiu valores médios de 54,46%. Também foi verificada uma redução de 39,01% na turbidez do efluente de entrada e 71,13% nos sólidos sedimentáveis, consistentes com outros estudos, mas ainda abaixo dos limites especificados para o lançamento de efluente tratado no Brasil. Isso destaca a necessidade da associação de uma outra etapa de tratamento para os efluentes provenientes do RAC.

A análise de confiabilidade adotada neste estudo possibilitou a proposição de um modelo para

determinar a eficiência operacional do sistema de tratamento de esgoto. Entende-se que a metodologia é aplicável e essencial para outros sistemas e pode auxiliar na definição de intervalos ideais de manutenção, sinalizando o momento adequado para a remoção de lodo, com base em parâmetros operacionais de Sólidos Totais (ST) e Sólidos Totais Voláteis (STV) do lodo. Tal funcionalidade minimiza o acúmulo excessivo de lodo e otimiza a eficiência operacional, ampliando o entendimento sobre o funcionamento e desempenho do sistema. Neste estudo de caso, o modelo mostrou uma alta probabilidade de acúmulo excessivo de lodo, 63,7%. Este acúmulo, quando não controlado, impacta diretamente a qualidade do efluente, elevando as concentrações dos parâmetros DBO, turbidez e SST.

Recomenda-se a continuidade dos estudos para permitir a avaliação de outros parâmetros de desempenho do RAC, com foco nos gases e lodos gerados pelo tratamento, a fim de garantir sua aplicação em sistemas descentralizados. O uso correto da tecnologia, aliado à operação e manutenção adequadas, são essenciais para sua implementação em pequenas comunidades, garantindo uma maior cobertura dos serviços de tratamento de esgoto no país.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Fiore FA; **Metodologia**: Fiore FA, Ferreira AB; **Aquisição, análise e interpretação de dados**: Almeida MBG, Ferreira AB; **Redação - Revisão & Edição**: Almeida MBG, Ferreira AB, Reis AG, Subtil EL, Fiore FA; **Supervisão**: Fiore FA.

6 FONTE DE FINANCIAMENTO

O trabalho resulta de projeto de desenvolvimento tecnológico em parceria com a Empresa Tecplas, em atendimento ao Edital de chamamento 001/2018 – (PIT/AGEVAP). O autor principal recebeu uma bolsa de pesquisa do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI), oferecida pela Reitoria da UNESP (Edital 03/2022). O segundo autor foi contemplado com uma bolsa auxílio de estágio pela Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - AGEVAP (Edital 001/2018).

7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Atlas Esgotos**. Despoluição de bacias hidrográficas. Brasília, DF: ANA, 2017.

ANDRAKA, D. Reliability analysis of activated sludge process by means of biokinetic modelling and simulation results. **Water**, [*s. l.*], v. 12, n. 1, p. 291, 2020.

ANG, A. H. S; TANG, W. H. **Probability concepts in engineering planning and design**: Decision, risk, and reliability. New York: Wiley, 1984. 2v.

AQANEGHAD, M.; MOUSSAVI, G. Electrochemically enhancement of the anaerobic baffled reactor performance as an appropriate technology for treatment of municipal wastewater in developing countries. **Sustainable Environment Research**, [*s. l.*], v. 26, n. 5, p. 203-208, 2016. https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.04.013

BATISTA, G. S. *et al.* Adição de sementes de Moringa oleifera antes do espessamento do lodo para melhoria da qualidade do sobrenadante: análises de desempenho de clarificação e toxicidade. **Sustainability**, [*s. l.*], v. 15, n. 9, e7288, 2023. https://doi.org/10.3390/su15097288

BARTH, E. A. EPA evaluation of the Polarion-X device under Section 511 of the Motor Vehicle Information and Cost Savings Act. Ann Arbor: Environmental Protection Agency, 1982.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 3 nov. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 maio 2011.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Relatório de Avaliação Anual 2010 — Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB)**. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2020a.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 jul. 2020b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/

ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 3 nov. 2025.

CAPODAGLIO, A. G. *et al.* Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies. **Water Practice & Technology**, London, v. 12, n. 2, p. 463-477, 2017. https://doi.org/10.2166/wpt.2017.055

CHEN, S. *et al.* Sludge age impacted the distribution, occurrence state and structure of organic compounds in activated sludge and affected the anaerobic degradability. **Chemical Engineering Journal**, [*s. l.*], v. 384, e123261, 2020.

FERREIRA, M. M. *et al.* Systematic review of the last 20 years of research on decentralized domestic wastewater treatment in Brazil: state of the art and potentials. **Water Science & Technology**, London, v. 84, n. 12, p. 3469-3488, 2021. http://doi.org/10.2166/wst.2021.487

HINES, W. W.; MONTGOMERY, D. C.; GOLDSMAN, D. M. **Probability and Statistics in Engineering**. [*S. l.*]: Gen-LTC Group, 2000.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Benefícios econômicos e sociais da expansão do saneamento no Brasil**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2018.

JUNG, Y. T.; NARAYANAN, N. C.; CHENG, Y. L. Cost comparison of centralized and decentralized wastewater management systems using optimization model. **Journal of Environmental Management**, London, v. 213, p. 90-97, 2018.

KUTTY, S. R. M.; LEOW, W. N.; SHAHURUDIN, N. S. Production of nutrients for non-edible plants using an anaerobic baffled horizontal wetland system. *In*: BREBBIA, C. A. *et al.* (Eds.). **WIT Transactions on Ecology and the Environmen**t. Southampton: WIT Press, 2016. p. 227-234. 205v.

LIPPS, W. C.; BAXTER, T. E.; BRAUN-HOWLAND, E. (Eds.). **Standard Methods for the examination of Water and Wastewater**. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2018.

MYHRE, S. F. *et al.* RELSAD: A Python package for reliability assessment of modern distribution systems. **Journal of Open Source Software**, [*s. l.*], v. 7, n. 78, p. 4516, 2022.

NASCIMENTO, G. A.; FERREIRA, M. M.; PINTO, F. F. A. Condições de esgotamento sanitário dos municípios de pequeno porte na porção paulista do Rio Paraíba do Sul. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 31., Curitiba, 2021. **Anais** [...]. Curitiba: [*s. n.*], 2021.

NEVES, C. S. *et al.* Partida de reator anaeróbio compartimentado em série com reatores de manta de lodo de fluxo ascendente, utilizando parâmetros de sedimentação para a formação do lodo. **Engenharia Sanitária Ambiental**, São Paulo, v. 20, n. 4, 2015. https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020040119235

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Objetivos do desenvolvimento Sustentável**. Genebra: ONU, 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/goals. Acesso em: 5 nov. 2025.

OSTFELD, A. Reliability analysis of water distribution systems. **Journal of Hydroinformatics**, [*s. l.*], v. 6, n. 4, p. 281-294, 2001. https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00035-8.

PANG, B. *et al.* Performance evaluation of anaerobic baffled reactor and filter for treating medium-strength wastewater using natural sludge growth and different hydraulic retention times. *In*: ASEAN INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND ENVIRONMENT, 2., Cambodia, 2022. **Proceedings** [...]. Bristol: IOP Publishing, 2023.

PATWARDHAN, A. S.; SURAMPALLI, R. Y., ZHANG, T.C. **Wastewater Treatment and Resource Recovery**. Reston: American Society of Civil Engineers Press, 2015.

RODRIGUES, L. S. *et al.* Aplicabilidade de um sistema de reatores anaeróbios compartimentados seguido de filtro anaeróbio no tratamento de efluentes de suinocultura em pequena escala. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v. 25, n. 3, 2020. https://doi.org/10.1590/S1413-41522020137661.

SILVA, J. A.; SILVA, G. H. R.; SARTI, A. Tratamento de esgoto sanitário de baixa carga utilizando reator compartimentado anaeróbio/aeróbio em escala piloto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v. 22, n. 3, 2017. https://doi.org/10.1590/S1413-41522016144668.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto e Diagnóstico da Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília, DF: SNIS, 2020.

SUBTIL, E. L.; HESPANHOL, I.; MIERZWA, J. C. Biorreatores com membranas submersas (BRMs): alternativa promissora para o tratamento de esgotos sanitários para reúso. **Revista Ambiente & Água** (8) 3, 2013. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1230.

SUBTIL, E. L.; SANCHEZ, A. A.; CAVALHERO, A. **Sistemas descentralizados de águas residuárias e reúso de água**. Santo André: UFABC, 2016.

SUBTIL, E. L. *et al.*. Pilot-scale investigation on the feasibility of simultaneous nitrification and denitrification (SND) in a continuous flow single-stage membrane bioreactor. **Journal of Water Process Engineering**, [*s. l.*], v. 32, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100995

TAHERIYOUN, M.; BAHRAMI, M.; MORADINEJAD, S. Reliability analysis of a municipal wastewater treatment plant using fault tree analysis. **Iran – Water Resources Research**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 1-11, 2014.

TCHOBANOGLUS, G.; BURTON, F.; STENSEL, H. D. Wastewater engineering: treatment and reuse. **American Water Works Association. Journal**, [*s. l.*], v. 95, n. 5, p. 201, 2003.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade da água e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2005.

YENJI, S. S.; MUNAVALLI, G. R.; KOLI, M. M. Field-scale anaerobic baffled reactor for domestic wastewater treatment: effect of dynamic operating conditions. **Water Practice & Technology**, London, v. 16, n. 1, p. 42-58, 2020. https://doi.org/10.2166/wpt.2020.103

YULISTYORINI, A. *et al*. Performance of anaerobic baffled reactor for decentralized wastewater treatment in urban Malang, Indonesia. **Processes**, [*s. l.*], v. 7, n. 4, 2019. https://doi.org/10.3390/pr7040184