TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO COM REMOÇÃO SIMULTÂNEA DE CARBONO, NITROGÊNIO E FÓSFORO EM UM ÚNICO REATOR DE LEITO ESTRUTURADO E AERAÇÃO INTERMITENTE (SBRIA)

Ana Paula Felix[(1)]
Engenheira Ambiental pelo IFSUL de Minas Campus Inconfidentes, Mestranda em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG).
Alessandra Giordani[(2)]
Engenheira Química, Mestra em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Doutora em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP) e Pós-Doutoranda na Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG).
Rafael Brito de Moura[(3)]
Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, mestrado e doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Professor Associado I no Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas (campus Poços de Caldas), onde atua na graduação e na pós-graduação. Orientador permanente de mestrado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA/UNIFAL) na linha de pesquisa em Tratamento de Efluentes.
Duanny Thais Rodrigues Caproni[(3)]
Engenheira Agrônoma pelo IFSUL de Minas Campus Machado, Mestra em Fisiologia Vegetal pela Universidade Federal de Viçosa, licenciada em Biologia pela Faveni, Doutoranda em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas.

Endereço[(1)]**:** Rua dos Expedicionários, 140 - Centro - Poços de Caldas - Minas Gerais - CEP: 37701-041 - Brasil - Tel: +55 (35) 99762-0090 - e-mail: anafelix.engenheiraambiental@gmail.com.

RESUMO

A remoção de nutrientes em efluentes domésticos constitui um desafio no Brasil, e o descarte inadequado desses efluentes pode acarretar diversos impactos ambientais. Diante desse cenário, o presente estudo investigou o desempenho de um reator de leito estruturado com aeração intermitente (SBRIA), em escala piloto, para o tratamento de esgoto sanitário. O sistema foi operado por 56 dias, com tempo de detenção hidráulica de 10 horas, tempo de aeração de 1,75 h e vazão de ar de 52,5 m^3 min^{-1}. Os resultados demonstraram elevado desempenho do sistema, com remoção simultânea de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo. Foram obtidas remoções médias de 87 ± 15% de DBO, 73 ± 20% de nitrogênio total e 100 ± 0% de fósforo, além de eficiências de nitrificação e desnitrificação de 86 ± 14%. A utilização do decantador secundário foi fundamental para promover a clarificação do efluente e assegurar o atendimento aos padrões de lançamento estabelecidos pela legislação vigente. Portanto, o reator SBRIA destaca-se como uma alternativa promissora para o tratamento eficiente de esgoto doméstico, possibilitando a remoção simultânea de matéria orgânica e nutrientes em um único sistema.

PALAVRAS-CHAVE: SBRIA, remoção de nutrientes, esgoto doméstico.

INTRODUÇÃO

A carência de tratamento adequado dos efluentes domésticos, aliado ao crescimento populacional mundial em países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos, causam diversos danos ao meio ambiente e à saúde pública (Oliveira et al., 2023). O lançamento desses efluentes afetam diretamente a qualidade físico-química do curso d'água, gerando um desequilíbrio nos ecossistemas aquáticos (Lúcio, Ribeiro e Tomasso, 2025). Dentre os impactos ambientais, destaca-se o processo de eutrofização, que promove alterações de cor, aumento da turbidez, odores desagradáveis e mudanças no sabor da água, o que dificulta o seu tratamento e uso para abastecimento público (VON SPERLING, 2017).

Os principais sistemas de tratamento de esgoto sanitário empregados no Brasil são baseados em processos convencionais, projetados para a remoção de matéria orgânica, como os reatores anaeróbios de fluxo

ascendente e manta de lodo (UASB) e os sistemas de lodos ativados (RIBEIRO et al., 2023). No entanto, esses sistemas frequentemente apresentam eficiência limitada na remoção de nutrientes presentes no esgoto doméstico, especialmente nitrogênio (N) e fósforo (P), sendo ambos, os principais responsáveis pelos impactos ambientais em ecossistemas aquáticos (Correa et al., 2018). Assim, torna-se imprescindível o desenvolvimento e a investigação de novos sistemas biológicos e tecnologias sustentáveis, com baixo custo de implantação e manutenção, que sejam capazes de promover a remoção simultânea desses nutrientes.

O processo convencional de remoção biológica de nitrogênio é feito através da nitrificação e desnitrificação, sendo na maioria dos sistemas de tratamento, realizada em unidades independentes ao da matéria orgânica, o que aumenta os custos de implantação e operação desses sistemas. Com o objetivo de reduzir custos operacionais, têm sido desenvolvidos sistemas que promovem esses processos simultaneamente em um único reator, utilizando aeração intermitente, o que favorece o equilíbrio do pH e reduz a necessidade de adição de fontes externas de carbono (Correa et al., 2016).

O Structured Bed Reactor with Intermittent Aeration (SBRIA), desenvolvido por Moura, Damianovic e Foresti (2012) possibilita a ocorrência simultânea dos processos de nitrificação e desnitrificação, apresentando elevada eficiência de remoção de N, com valores entre 82% e 89% quando avaliado em escala de bancada e com tempo de detenção hidráulica (TDH) entre 10 e 12 horas. Para o adequado funcionamento do sistema, é necessária a adição de um meio de suporte físico, constituído por espumas de poliuretano, que favorecem o crescimento da biomassa para formação de biofilme. O emprego do SBRIA no tratamento de esgotos domésticos reduz os custos de construção e operação, bem como o consumo de energia elétrica, além de apresentar elevadas eficiências na remoção simultânea de matéria orgânica e nitrogênio (Valim, 2025).

Diante da elevada eficiência do SBRIA em escala laboratorial, Barbosa (2023) conduziu um estudo pioneiro com a implantação do sistema em escala piloto, obtendo eficiência de remoção de nitrogênio de aproximadamente 57% e evidenciando que a transição para uma escala maior influenciou a qualidade do efluente final. Os resultados também demonstraram a necessidade da incorporação de um decantador secundário para otimizar a retenção de sólidos e aprimorar o desempenho do sistema. Ainda assim, a produção de lodo observada foi inferior à reportada em sistemas convencionais de tratamento.

De maneira semelhante, Valim (2025) demonstrou que o SBRIA apresentou elevada capacidade de adaptação às variações características de esgotos domésticos com contribuições industriais, alcançando remoção de nitrogênio total de 54 ± 20%, com nitrificação de 62 ± 20% e desnitrificação de 85 ± 15%, além de remoção eficiente de matéria orgânica. O sistema apresentou estabilidade, evidenciada pela manutenção do pH e da alcalinidade sem adição de agentes alcalinizantes e reforçando o potencial do SBRIA como uma alternativa promissora e de baixo custo para o tratamento de águas residuárias em escala ampliada.

Apesar dos resultados promissores obtidos em escala piloto, fatores como a contribuição de efluentes industriais no afluente e a ausência de um decantador secundário podem ter limitado o desempenho do sistema em comparação aos resultados observados em escala de bancada. Nesse contexto, o presente estudo busca ampliar o conhecimento sobre o SBRIA por meio da avaliação da remoção biológica de fósforo, ainda não investigada para essa tecnologia.

OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de um reator SBRIA em escala piloto na remoção simultânea de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo.

METODOLOGIA UTILIZADA

REATOR SBRIA EM ESCALA PILOTO E PARÂMETROS OPERACIONAIS

O sistema operado está instalado na Estação de Tratamento de Esgoto 3, do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), no município de Poços de Caldas, Minas Gerais e consiste em um reator de leito estruturado com aeração intermitente (SBRIA), em escala piloto (Figura 1), que já está em operação há 288 dias. A fase avaliada neste estudo teve duração de 56 dias. O SBRIA piloto foi construído em fibra de vidro, com formato cilíndrico, diâmetro de 1,8 m e altura total de 5,1 m, dos quais 4,9 m correspondem à altura útil.

O reator apresenta volume total de 12,3 m³ e volume útil de 8,4 m³, além de porosidade do leito de 66%. A alimentação do esgoto bruto ocorre na base do reator, enquanto a saída do efluente tratado está localizada no topo, a 4,7 m do ponto de entrada, que posteriormente é encaminhado para a unidade de sedimentação. A unidade de sedimentação consiste em um tanque de polietileno, cuja função é reter os sólidos presentes no sistema e melhorar a qualidade do efluente final.

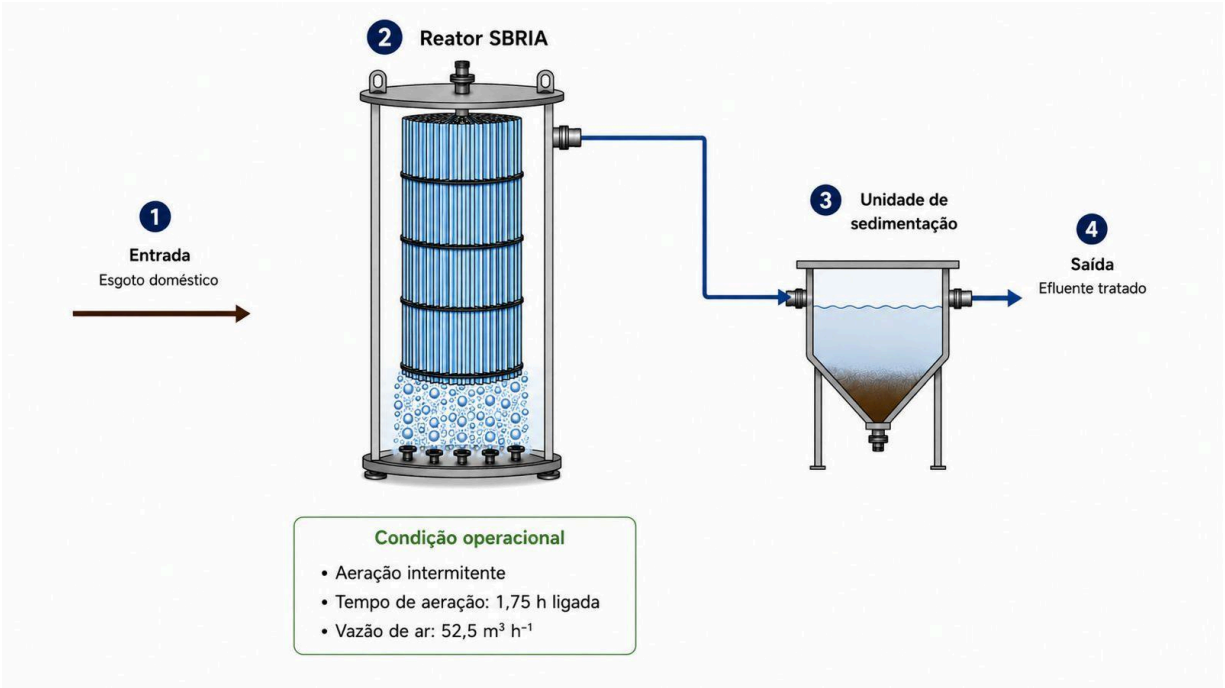
No interior do reator estão inseridos quatro módulos prismáticos de espuma de poliuretano com seção transversal de 30 × 30 mm, altura de 1 m e fixados em estrutura de fibra de vidro e polipropileno. O sistema de aeração é composto por 12 difusores de oxigênio da marca B&FDIAS, modelo Bolha Fina Circular HD, com 270 mm de diâmetro, dotados de membrana flexível constituída por EPDM, silicone e teflon, e corpo em polipropileno reforçado com fibras. A alimentação do reator é realizada por bomba submersível da marca Sulzer, enquanto a aeração é promovida por soprador da marca Nexco.

O sistema foi operado com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 10 horas, com ciclo de aeração de 3 horas, sendo 1,75 h de período aerado e 1,25 h de período não aerado com uma vazão de ar de 52,5 $m^3\ min^{-1}$.

MÉTODOS ANALÍTICOS

Para a realização das análises físico-químicas da fase, as amostras de afluente e efluente do reator e do efluente do decantador foram coletadas duas vezes por semana, adotando-se como referência o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA; AWWA; WEF, 2017). Os parâmetros monitorados incluíram Demanda Química de Oxigênio (5220 D), Demanda Bioquímica de Oxigênio (SH-812+BOD intelligent measuring instrument), pH (4500-H^+ B), nitrogênio amoniacal (4500 B), fósforo total (LPB, 2021), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) (ECOCLASS, 2022) e sólidos totais (2540 B), voláteis e fixos (2540 E). As análises de nitrito e nitrato foram determinadas por cromatografia iônica (SYKAM-S155), com utilização de curva de calibração a partir de padrão misto. Os dados experimentais foram expressos como média ± desvio padrão.

Figura 1 - Esquema representativo do SBRIA durante etapa aerada do ciclo operacional, incluindo unidade experimental de sedimentação.



Fonte: Elaborada pelo autor com auxílio de inteligência artificial (ChatGPT/OpenAI, 2026).

DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO

As eficiências de remoção de nitrogênio total (NT), demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e fósforo, bem como as eficiências dos processos de nitrificação e desnitrificação, foram calculadas a partir das concentrações afluentes e efluentes obtidas durante o período experimental, conforme apresentado nas Equações 1 a 6.

$$\text{Remoção de NT (\%)} = \frac{((NTK + N{-}NO_2^- + N{-}NO_3^-)_a f\square_{ue}\square\square_e - (NTK + N{-}NO_2^- + N{-}NO_3^-)_e f\square_{ue}\square\square_e)}{(NTK + N{-}NO_2^- + N{-}NO_3^-)_a f\square_{ue}\square\square_e} \quad (1)$$

$$\text{Nitrificação (\%)} = \frac{(NTK_a f\square_{ue}\square\square_e - NTK_e f\square_{ue}\square\square_e)}{NTK_a f\square_{ue}\square\square_e} \quad (2)$$

$$\text{Desnitrificação (\%)} = \frac{((NTK + N{-}NO_2^- + N{-}NO_3^-)_a f\square_{ue}\square\square_e - (NTK + N{-}NO_2^- + N{-}NO_3^-)_e f\square_{ue}\square\square_e)}{((NTK + N{-}NO_2^- + N{-}NO_3^-)_a f\square_{ue}\square\square_e - NTK_e f\square_{ue}\square\square_e)} \quad (3)$$

$$\text{Remoção de DQO (\%)} = \frac{(DQO_a f\square_{ue}\square\square_e - DQO_e f\square_{ue}\square\square_e)}{DQO_a f\square_{ue}\square\square_e} \quad (4)$$

$$\text{Remoção de DBO (\%)} = \frac{(DBO_a f\square_{ue}\square\square_e - DBO_e f\square_{ue}\square\square_e)}{DBO_a f\square_{ue}\square\square_e} \quad (5)$$

$$\text{Remoção de fósforo (\%)} = \frac{(Fósforo_a f\square_{ue}\square\square_e - Fósforo_e f\square_{ue}\square\square_e)}{Fósforo_a f\square_{ue}\square\square_e} \quad (6)$$

RESULTADOS OBTIDOS

A Tabela 1 apresenta a caracterização do afluente, do efluente proveniente do reator e do efluente após a unidade de decantação durante a operação da fase. Já a Tabela II apresenta a porcentagem média de remoção da saída do reator e saída do decantador em relação ao afluente de entrada.

Tabela 1 - Caracterização do Afluente e do Efluente do Reator e Decantador.

Parâmetro	Unidade	Afl.Fase	Efl.Fase Reator	Efl.Fase Decantador
pH	-	7,1±0,3	6,4±0,4	6,5±0,6
Alcalinidade	mg $CaCO_3$/L	165,1±53,1	33,1±22,4	37,4±23,1
DQO não filtrada	mg/L	288,7±146,1	63,5±54,8	24,1±29,6
DQO filtrada	mg/L	166,6±95,5	32,1±18,8	32,1±20,1
DBO	mg/L	135,5±77,6	20,6±15,7	12,9±8
N-NH_4^+	mg/L	25,1±11,7	1,8±1,7	2,1±1,5
N-NTK	mgN/L	48,1±17,9	6,8±6,5	5,6±5,3
N-N.O	mg/L	23,1±10,2	5,2±5,5	4±4,2
N-NO_2^-	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ
P-PO4	mg/L	1,7±1,5	0,01±0,02	0
N-NO_3^-	mg/L	<LQ	4,5±3,3	4,2±3,6
Sólidos totais	g/L	0,4±0,1	0,2±0,1	0,2±0

Fonte: elaboração própria (2026).

O pH apresentou valores médios de 7,1±0,3 para o afluente, 6,4±0,4 para o efluente do reator e 6,5±0,6 para o efluente do decantador, ambos próximos à neutralidade. Já a alcalinidade média foi de 165,1±53,1 mg $CaCO_3$/L no afluente de entrada, com as saídas médias do reator e do decantador de 33,1±22,4 mg $CaCO_3$/L e 37,4±23,1 mg $CaCO_3$/L respectivamente. Esses resultados evidenciam a ocorrência simultânea da nitrificação e desnitrificação em uma única unidade reacional, permitindo a recuperação parcial da alcalinidade consumida e dispensando a adição de alcalinizantes.

Em relação aos parâmetros referentes a matéria orgânica do afluente, a demanda química de oxigênio (DQO) não filtrada apresentou média de 288,7±146,1 mg/L, com valores médios de 24,1±29,6 mg/L para a saída do

decantador, resultando em 86±20% de remoção, já a DQO filtrada do afluente teve média de 166,6±95,5 mg/L com concentrações médias próximas para os efluentes do reator e do decantador, com eficiência de remoção de 75±14% e 76±21%. A concentração média da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) para o afluente foi de 135,5±77,6 mg/L, o efluente do decantador apresentou média de 12,9±8 mg/L, de forma que a eficiência de remoção foi de 87±15%, já o efluente do reator obteve 80±24% de remoção.

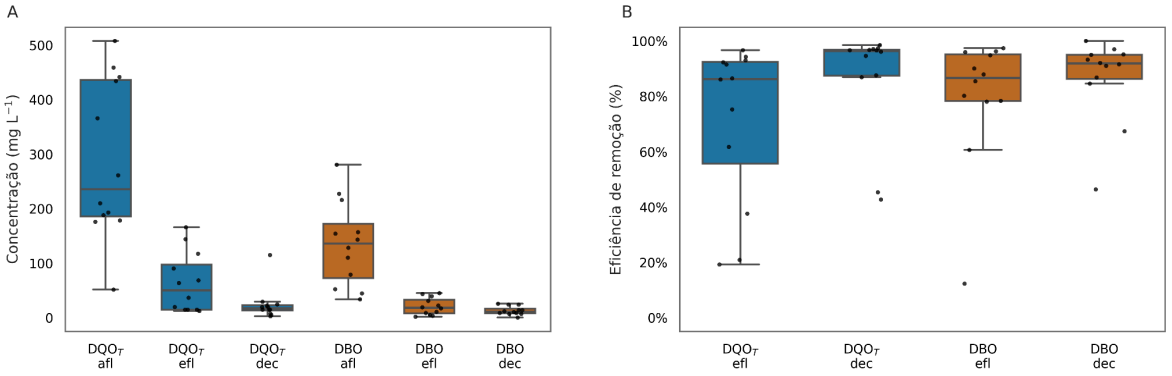
Tabela 2 - Porcentagem média de remoção da saída do reator e saída do decantador em relação ao afluente de entrada.

% Remoção	Fase Saída do reator	Fase saída do decantador
DQO não filtrada	71±29	86±20
DQO Filtrada	75±14	76±21
DBO	80±24	87±15
N total	70±26	73±20
Fósforo	96±6	100±0
Nitrificação	83±22	86±14
Desnitrificação	79±28	84±14

Fonte: elaboração própria (2026).

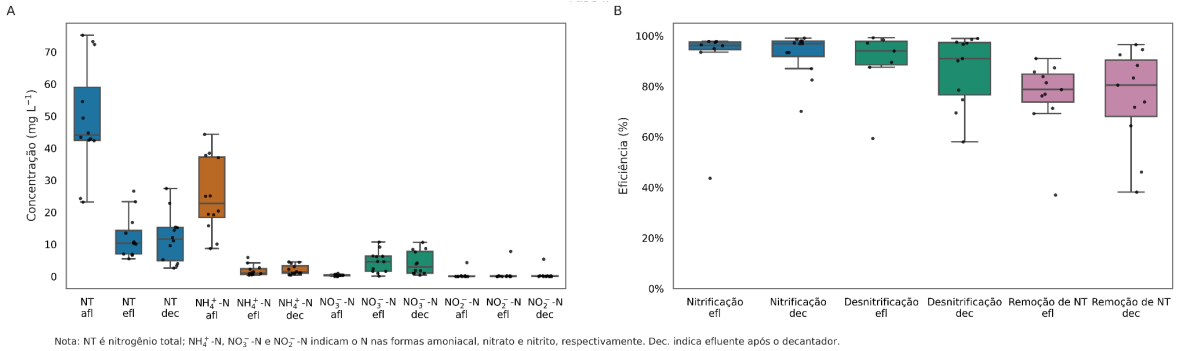
Já para a fração nitrogenada, a remoção média de nitrogênio (N) total foi de 70±26% para o efluente do reator e de 73±20% para o efluente da saída do decantador. As concentrações médias de $N\text{-}NH_4^+$ foram reduzidas de 25,1±11,7 mg/L do afluente para 1,8±1,7 mg/L e 2,1±1,5 mg/L para a saída do reator e decantador. Já o N-NTK teve como concentração média do afluente de 48,1±17,9 mgN/L, para 5,6±5,3 mgN/L para a saída do decantador. Em relação às concentrações de $N\text{-}NO_2^-$, ambos os dados obtidos ficaram abaixo do limite de quantificação, assim como $N\text{-}NO_3^-$ do afluente, diferentemente da saída do reator e do decantador que apresentaram 4,5±3,3 mg/L e 4,2±3,6 mg/L respectivamente. As eficiências de nitrificação e desnitrificação apresentaram um valor médio 83±22% e 79±28% para a saída do reator e de 86±14% e 84±14% para a saída do decantador.

Figura 2 - Boxplots das concentrações de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), para o afluente (afl), efluente do reator (efl) e do decantador (dec) na Figura 2 (A) e das respectivas eficiências de remoção em % da demanda química de oxigênio do efluente do reator (DQO efl) e do decantador (DQO dec), eficiência de remoção da demanda bioquímica de oxigênio do efluente do reator (DBO efl) e do decantador (DBO dec) na Figura 2 (B).



Fonte: elaboração própria (2026).

Figura 3 – Boxplots das concentrações de nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$), nitrito ($N\text{-}NO_2^-$) e nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) no afluente (afl), no efluente do reator (efl) e no efluente do decantador (dec) na Figura 3 (A), bem como das eficiências de nitrificação, desnitrificação e remoção de nitrogênio total (NT) no efluente do reator (efl) e no efluente do decantador (dec) na Figura 3 (B).



Nota: NT é nitrogênio total; NH_4^+-N, NO_3^--N e NO_2^--N indicam o N nas formas amoniacal, nitrato e nitrito, respectivamente. Dec. indica efluente após o decantador.

Fonte: elaboração própria (2026).

A concentração média de P-PO4 para o afluente foi de 1,7±1,5 mg/L, já para o efluente do reator a concentração foi de 0,01±0,02 mg/L, tendo uma remoção de 96±6%, já o efluente do decantador apresentou concentração igual a zero, resultando em uma remoção de 100% de P-PO4. Em relação aos sólidos, a concentração do afluente foi de 0,4±0,1 mg/L, enquanto a saída do reator e do decantador foi de 0,2±0,1 mg/L e 0,2±0 mg/L.

A Figura 2 mostra as concentrações de DQO e DBO e das eficiências de remoção. É possível observar a diminuição da concentração ao longo das etapas de tratamento e dos pontos de dispersão dos dados do efluente em relação ao afluente. Já a Figura 3 (A) mostra as concentrações de nitrogênio total (NT), amônia, nitrito e nitrato do afluente e dos efluentes do reator e do decantador, enquanto a Figura 3 (B) mostra a eficiência em porcentagem da nitrificação, desnitrificação e remoção de NT para o efluente do reator e do decantador.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os valores referentes ao pH se mantiveram dentro da faixa considerada neutra, mesmo após a saída do reator e do decantador, apesar da redução em comparação com o pH do afluente. Essa queda no pH está associada com a diminuição da alcalinidade, saindo de 165,1±53,1 mg $CaCO_3$/L no afluente para 33,1±22,4 mg $CaCO_3$/L na saída do reator, devido a demanda estequiométrica dos microrganismos nitrificantes para que ocorra a oxidação do NH_4^+. O consumo líquido de alcalinidade foi de 132,4 mg $CaCO_3$/L, valor inferior ao consumo teórico estimado para a nitrificação completa da amônia removida (166,4 mg $CaCO_3$/L), indicando a recuperação parcial de aproximadamente 34,0 mg $CaCO_3$/L, associada à ocorrência de desnitrificação. Além disso, a nitrificação e desnitrificação simultâneas podem contribuir para a manutenção do pH e da capacidade tamponante do sistema, reduzindo ou até mesmo eliminando a necessidade de suplementação com agentes alcalinizantes, conforme também observado por Valim et al. (2026).

Observa-se que o reator foi eficiente na remoção de matéria orgânica. Os parâmetros DQO e DBO apresentaram altas eficiências, atingindo o desempenho de remoção de DBO de 87±15% no efluente do decantador. As concentrações do afluente apresentaram alta variabilidade, sendo apontada pela dispersão dos dados conforme Figura 2(A). É possível verificar (Figura 2(B)), que a remoção de DBO é superior à de DQO, fenômeno também observado por Barbosa, Giordani e Moura (2024), e que ocorre devido a facilidade de assimilação da fração biodegradável do efluente pelo biofilme estruturado, enquanto a DQO pode possuir frações recalcitrantes que são mais difíceis de serem removidas no sistema. A Figura 2(A) demonstra essa redução das concentrações de DQO e DBO dos efluentes do reator e do decantador, onde é possível observar menor dispersão, que está ligada a capacidade de amortecimento das variações de carga e produção de efluentes mais estáveis, principalmente após a saída do decantador.

A elevada remoção de DBO obtida neste estudo também evidencia o atendimento aos padrões de lançamento estabelecidos pela legislação brasileira vigente, que determina remoção mínima de 60% de DBO (CONAMA, 2011). Os resultados obtidos para a remoção de DQO e DBO reforçam o potencial dessa tecnologia quando comparada a sistemas anaeróbios convencionais empregados como etapa única de tratamento. Ramos et al. (2023) verificaram que reatores UASB utilizados como único processo biológico não apresentaram desempenho suficiente para atender consistentemente aos padrões de lançamento, destacando a necessidade de etapas complementares. Nesse contexto, os resultados do presente estudo demonstram que a associação do

reator de biofilme estruturado com a unidade de sedimentação representa um avanço tecnológico relevante, promovendo maior estabilidade operacional e elevadas eficiências na remoção de matéria orgânica, mesmo diante da variabilidade característica do esgoto sanitário afluente.

Em relação à diferença entre a DQO filtrada e não filtrada (Tabela 2), é perceptível que a matéria orgânica dissolvida foi removida em grande parte durante o tratamento biológico, uma vez que a DQO filtrada apresentou eficiências semelhantes no efluente do reator e após o decantador, correspondendo a 75 ± 14% e 76 ± 21%, respectivamente. Por outro lado, a remoção de DQO não filtrada atingiu 86 ± 20% após a etapa de sedimentação, evidenciando a importância do decantador na retenção de sólidos suspensos contendo matéria orgânica residual. Esse comportamento sugere que uma parcela significativa da matéria orgânica remanescente no efluente do reator estava associada à fração particulada, sendo removida durante a decantação. A importância da etapa de sedimentação também foi evidenciada por Valim et al. (2026), que utilizaram um reator SBRIA em escala piloto para o tratamento de esgoto doméstico com contribuições industriais. Por meio de ensaios de decantação em bancada, os autores estimaram um aumento da eficiência de remoção de DQO de 57% para 87%, reforçando o potencial da sedimentação como etapa complementar para a melhoria da qualidade do efluente e o atendimento aos padrões de lançamento.

Os avanços observados no presente estudo também se refletiram no bom desempenho de remoção de nitrogênio total pelo sistema (Tabela 2), especialmente após a etapa de sedimentação, que atingiu 73 ± 20% de remoção. Esses valores foram superiores aos reportados por Barbosa et al. (2024) e Valim et al. (2026), que obtiveram remoções de 57 ± 27% e 54 ± 20% de nitrogênio total, respectivamente, ambos utilizando reatores SBRIA em escala piloto. Os resultados aqui apresentados também foram próximos aos obtidos por Oliveira et al. (2023) e Souza et al. (2021), que, utilizando reatores em escala de bancada alimentados com efluente sintético, reportaram eficiências de remoção de nitrogênio total de 79,6% e 87,2 ± 0,9%, respectivamente. Vale ressaltar que o presente estudo foi conduzido em escala piloto, utilizando esgoto sanitário, e apresentou desempenho superior ao observado por Leick et al. (2017), que reportaram remoção de aproximadamente 55% de nitrogênio total em um sistema operado em escala laboratorial tratando esgoto real.

Já em relação às frações nitrogenadas (Figura 3(A)), o $N\text{-}NH_4^+$ apresentou certa estabilidade, com achatamento dos boxplots e baixas concentrações tanto no efluente do reator, quanto do decantador, o que demonstra que ocorreu uma eficiente oxidação de $N\text{-}NH_4^+$. Segundo a Resolução CONAMA 430/2011 o limite para concentração de nitrogênio amoniacal em efluentes é de 20 mg/L. Conforme apresentado na Tabela 2, a concentração média de $N\text{-}NH_4^+$ efluente do SBRIA foi de 1,8±1,7 mg/L, valor substancialmente inferior ao limite estabelecido pela legislação vigente. Embora a Resolução CONAMA nº 430/2011 não estabeleça limites para o nitrogênio total, a concentração média de 5,6 ± 5,3 mg N/L obtida após o decantador evidencia a elevada capacidade do sistema em promover a remoção simultânea das diferentes frações nitrogenadas, reforçando a eficiência e a confiabilidade operacional do processo.

A nitrificação apresentou elevadas eficiências, alcançando 83 ± 22% no efluente do reator e 86 ± 14% no efluente proveniente do decantador. Além disso, a Figura 3(B) evidencia a baixa dispersão dos dados, principalmente no efluente do reator, associada à redução das concentrações de $N\text{-}NH_4^+$ e à ausência de acúmulo de $N\text{-}NO_2^-$, cujas concentrações permaneceram abaixo do limite de quantificação (Tabela 1). A elevada eficiência da nitrificação também é corroborada pelo consumo de alcalinidade e pela discreta redução do pH observados ao longo do tratamento. Esses resultados demonstram a estabilidade operacional do sistema e a manutenção de condições favoráveis ao desenvolvimento dos microrganismos nitrificantes sob regime de aeração intermitente. Embora tenham sido observados alguns outliers no efluente do decantador, possivelmente associados a oscilações pontuais do processo, a eficiência global do sistema não foi comprometida, mantendo-se elevadas taxas de nitrificação.

Já as eficiências de desnitrificação alcançaram 79±28% para a saída do reator e 84±14% para a saída do decantador. Visualizando a Figura 3 (B), nota-se que os boxplots deixam evidente a maior dispersão dos dados, destacando a sensibilidade desse processo às condições operacionais. Entretanto, as elevadas eficiências de desnitrificação observadas, mesmo diante da variabilidade do afluente, sugerem que a disponibilidade de carbono presente no esgoto foi suficiente para sustentar a atividade desnitrificante, dispensando a necessidade de suplementação externa de matéria orgânica. Para o mesmo ciclo de aeração utilizado no presente estudo (1,75 h aeradas), Oliveira et al. (2022) reportaram eficiências de nitrificação semelhantes, variando entre 71% e 88%, ao operarem um reator SBRIA em escala de bancada tratando esgoto sintético. Os autores também destacaram que tanto a vazão de aeração quanto a duração dos ciclos aerados influenciam diretamente o

processo de desnitrificação, constatando que menores tempos de aeração resultam em períodos anóxicos mais prolongados e, consequentemente, em maiores eficiências de desnitrificação.

A partir de um monitoramento em tempo real, Oliveira et al. (2023) observaram que a presença de oxigênio residual, em concentrações entre 0,2 e 0,5 mg/L, impede reduções acentuadas do potencial de oxirredução (ORP), retardando o estabelecimento de condições totalmente anóxicas necessárias ao início da desnitrificação. Além disso, os autores verificaram menor consumo de nitrato em fases caracterizadas por maiores concentrações de oxigênio dissolvido. No presente estudo, as concentrações de nitrato observadas no efluente do reator e do decantador foram de 4,5±3,3 e 4,2±3,6 mg/L, respectivamente, o que pode indicar uma limitação parcial da desnitrificação decorrente da persistência de zonas aeróbias durante os períodos não aerados, uma vez que a conversão de $N\text{-}NO_3^-$ em N_2 não foi completa. De maneira geral, Souza et al. (2022) destacaram que a desnitrificação constitui uma das etapas limitantes do sistema, sendo necessário o controle adequado do tempo de aeração, da disponibilidade de carbono orgânico e da vazão de ar, fatores que influenciam diretamente a difusão de oxigênio no interior do meio suporte e, consequentemente, a eficiência do processo. Vale salientar que, mesmo que tenha ocorrido limitação parcial da desnitrificação, foi possível estabelecer um equilíbrio entre os processos de nitrificação e desnitrificação, resultando em elevadas eficiências de remoção de nitrogênio total.

Outro parâmetro analisado foi a remoção de P-PO4, que alcançou 96±6% para o efluente do reator e 100% para o efluente do decantador. Apesar da elevada variabilidade observada para a concentração afluente de $P\text{-}PO_4$ (1,7±1,5 mg/L), a concentração desse nutriente no efluente manteve-se estável e próxima a zero, evidenciando a elevada eficiência do sistema na remoção de fósforo. A saída do decantador apresentou remoção total de P-PO4, o que sugere condições operacionais e biológicas ideais para a remoção desse nutriente no sistema. Yuan et al. (2020) alcançaram para um reator de bancada 94,3% de remoção máxima de fósforo em efluente real, com auxílio dos organismos acumuladores de polifosfato (PAOs) que foram enriquecidos no reator. A remoção constata no reator piloto deste estudo foi superior, alcançando 96±6% de eficiência média para saída do reator, conforme Tabela 1. Essa comparação sugere que a elevada remoção desse nutriente no reator está associada à atuação PAOs, característicos de sistemas com remoção biológica aprimorada de fósforo (EBPR), cuja atividade é favorecida por condições adequadas de anaerobiose. Segundo Luo et al. (2022), o adequado desenvolvimento e a manutenção desses microrganismos requerem a alternância entre fases anaeróbias e aeróbias, além da disponibilidade de carbono orgânico.

Segundo Luo et al. (2024), o nitrato atua como aceptor preferencial de elétrons, desviando o fluxo de carbono orgânico para os processos de desnitrificação e inibindo a liberação intracelular de fósforo pelos PAOs. Esse mecanismo compromete a síntese de reservas internas de carbono, essenciais para a absorção excessiva de fósforo durante a fase aerada. Embora a presença de nitrato residual possa interferir na remoção de $P\text{-}PO_4$, a elevada eficiência observada na saída do reator sugere que a concentração de nitrato não foi suficiente para limitar significativamente a atividade dos PAOs. Adicionalmente, a remoção ainda mais elevada observada após a etapa de sedimentação pode estar associada à retenção de sólidos suspensos, uma vez que a biomassa sedimentada contém fósforo previamente acumulado pelos microrganismos, contribuindo para o aumento da eficiência global de remoção desse nutriente.

De maneira geral, os resultados evidenciaram que a combinação entre o meio suporte estruturado, a estratégia de aeração intermitente e a etapa de sedimentação favoreceu a remoção integrada de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo. Mesmo diante das particularidades e limitações inerentes aos processos biológicos envolvidos, o sistema apresentou desempenho satisfatório para os diferentes parâmetros avaliados e atendeu a legislação vigente, demonstrando o potencial do SBRIA para tratamento de efluentes domésticos.

CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que o reator SBRIA constitui uma tecnologia eficiente para o tratamento de esgoto sanitário, possibilitando a remoção simultânea de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo em um único sistema. A estratégia de aeração intermitente mostrou-se adequada para promover os processos de nitrificação e desnitrificação, enquanto o emprego do decantador secundário contribuiu significativamente para o aprimoramento da qualidade do efluente final. Dessa forma, o SBRIA destaca-se como uma alternativa promissora para o tratamento de esgotos domésticos, apresentando potencial para atender às demandas atuais relacionadas à remoção integrada de nutrientes em condições reais de operação. Adicionalmente, os achados

deste trabalho ampliam o conhecimento acerca da aplicação de reatores SBRIA em escala piloto para o tratamento de esgoto sanitário real.

AGRADECIMENTOS

Os Autores gostariam de agradecer à CAPES pela concessão da bolsa de estudos, a UNIFAL pelo apoio institucional e técnico para o desenvolvimento desta pesquisa, a CARBOFIBRAS pela parceria institucional e ao DMAE pelo suporte operacional recebido durante a execução do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA; AWWA; WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington, D.C.: APHA, 2017

2. BARBOSA, T. A. Remoção de nitrogênio e matéria orgânica em um reator de leito estruturado em escala piloto, submetido à aeração intermitente, no tratamento de esgoto sanitário. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.

3. BARBOSA, T; GIORDANI, A. & MOURA, R.B. Um estudo em escala piloto de um novo sistema para remoção simultânea de nitrogênio e carbono: avanço tecnológico de um reator de leito estruturado com aeração intermitente (SBRIA) no tratamento real de esgoto doméstico. Environ Sci Pollut Res, v. 31 , 12591–12596, 2024. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31675-2.

4. 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. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 92, p. 89, 16 maio 2011.

5. CORREA, C. Z; et al. Comportamento da remoção de matéria orgânica (DQO) e nitrogênio amoniacal em um reator de leito estruturado operado sob aeração intermitente. Scientia Plena, v. 12, n.3, 2016. https://doi.org/10.14808/sci.plena.2016.034201.

6. CORREA, C. Z; et al. Nitrification/denitrification of real municipal wastewater in an intermittently aerated structured bed reactor. Journal of Water Process Engineering, v. 23, p. 134-141, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.03.013.

7. LEICK, S. A; et al. EFFECT OF AERATION AND RECIRCULATION IN THE REMOVAL OF NITROGEN AND CHEMICAL OXYGEN DEMAND FROM SANITARY SEWAGE IN A STRUCTURED BED REACTOR. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering, p.1236-1243, 2017. http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n6p1236-1243/2017.

8. LÚCIO, D. S. G; RIBEIRO, R; TOMMASO, G. Simultaneous removal of organic matter and nitrogen in a structured-bed hybrid baffled reactor (SBHBR) under low COD/TN ratio: Evaluation of operational strategies. Journal of Water Process Engineering, v. 75. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107933.

9. LUO, H; et al. The Feasibility of Maintaining Biological Phosphorus Removal in A-Stage via the Short Sludge Retention Time Approach: System Performance, Functional Genus Abundance, and Methanogenic Potential. International Journal of Environmental Research and Public Health, v.19, 2022. https://doi.org/10.3390/ijerph19095494.

10. LUO, H; et al. Integrating enhanced biological phosphorus removal in adsorption-stage to treat real domestic sewage. Bioresource Technology, v.411, 2024. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131334.

11. MOURA, R. B; DAMIANOVIC, M. H. R. Z; FORESTI, E. Nitrogen and carbon removal from synthetic wastewater in a vertical structured-bed reactor under intermittent aeration. Journal of Environmental Management, v. 98, 2012. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.009.

12. MURATA, K. B; *et al*. Pilot scale study of a structured bed reactor for nitrogen and organic matter removal from sanitary sewage: advances and design challenges. Society and Development, v. 10, n, 13, 2021. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i13.21560

13. OLIVEIRA, E. P; et al. Effect of air flow, intermittent aeration time and recirculation ratio in the hydrodynamic behavior of a structured bed reactor. Chemical Engineering Journal, v. 394, 2020. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124988.

14. Oliveira, E.P. et al. (2022). Optimization of airflow and aeration cycles in a new structured bed reactor configuration for carbon and nitrogen removal. Environmental Technology, 43(29), 4565–4580.

15. OLIVEIRA, E. P; et al. Biofilm stratification and autotrophic-heterotrophic interactions in a structured bed reactor (SBRIA) for carbon and nitrogen removal. Bioresource Technology, v. 372, 2023. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128639.

16. RAMOS, A. S.; et al. Performance analysis of wastewater treatment plants using UASB reactors as the sole biological treatment stage in Minas Gerais, Brazil. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 8, 2023, 100475. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100475.

17. RIBEIRO, T. B. et al. Limitações e potencialidades para a remoção de nitrogênio amoniacal nas estações de tratamento de esgoto do estado minas gerais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 32., 2023, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: Abes, 2023. v. 1.

18. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis. Acesso em 09 de junho de 2026.

19. SOUZA, J.V.R, et al. Simultaneous carbon and nitrogen removal in a structured bed reactor subjected to intermittent aeration (SBRIA): effect of support material diameter and bed porosity. J Chem Technol Biotechnol, 97, 1436–1445, 2022. https://doi.org/10.1002/jctb.6936.

20. VALIM, Amanda Carvalhaes Souto. Reator de leito estruturado submetido a aeração intermitente em escala piloto para remoção de nitrogênio e matéria orgânica de esgoto sanitário. 2025. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

21. VALIM, A. C. S; et al. Pilot-scale structured bed reactor with intermittent aeration: a novel strategy for simultaneous nitrogen and carbon removal from domestic sewage with industrial contribution. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2026.https://doi.org/10.1007/s43153-026-00661-9.

22. VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017.

23. YUAN, C; et al. Advanced nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater via simultaneous enhanced biological phosphorus removal and semi-nitritation (EBPR-SN) combined with anammox. Bioprocess and Biosystems Engineering, v.43, p.2039–2052, 2020.

https://doi.org/10.1007/s00449-020-02392-8.