

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

AMANDA CARVALHAES SOUTO VALIM

**REATOR DE LEITO ESTRUTURADO SUBMETIDO A AERAÇÃO
INTERMITENTE EM ESCALA PILOTO PARA REMOÇÃO DE NITROGÊNIO E
MATÉRIA ORGÂNICA DE ESGOTO SANITÁRIO**

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

AMANDA CARVALHAES SOUTO VALIM

**REATOR DE LEITO ESTRUTURADO SUBMETIDO A AERAÇÃO
INTERMITENTE EM ESCALA PILOTO PARA REMOÇÃO DE NITROGÊNIO E
MATÉRIA ORGÂNICA DE ESGOTO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciência e Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Brito de Moura.

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

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. / Amanda Carvalhaes Souto Valim. - Poços de Caldas, MG, 2025.

52 f. : il. -

Orientador(a): Rafael Brito de Moura.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Nitrificação e desnitrificação simultâneas. 2. Reator de leito estruturado com aeração intermitente. 3. Tratamento de esgoto real com contribuições industriais. 4. Remoção de nitrogênio. 5. Sistema em escala piloto. I. Moura, Rafael Brito de, orient. II. Título.

AMANDA CARVALHAES SOUTO VALIM

REATOR DE LEITO ESTRUTURADO SUBMETIDO A AERAÇÃO INTERMITENTE EM ESCALA PILOTO PARA REMOÇÃO DE NITROGÊNIO E MATÉRIA ORGÂNICA DE ESGOTO SANITÁRIO

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Tratamento de Efluentes.

Aprovada em: 25 de setembro de 2025.

Prof. Dr. Rafael Brito de Moura
Presidente da Banca Examinadora
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Deize Dias Lopes
Instituição: Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Sandro Barbosa
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Brito de Moura, Professor do Magistério Superior**, em 25/09/2025, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1627325** e o código CRC **15D86884**.

Dedico esse trabalho ao meu marido André e minha filha Aurora.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pois sem Ele essa etapa não teria sido cumprida.

Ao meu marido, André, por todo apoio e encorajamento na minha jornada acadêmica.

Aos meus pais e irmãos, por sempre acreditarem no meu potencial e pelas oportunidades proporcionadas.

Ao meu orientador, prof. Dr. Rafael Brito de Moura, por todo ensinamento, incentivo, pela paciência e oportunidade de participar desse projeto inovador e tão importante para a área de tratamento de efluentes.

Ao Departamento Municipal de Água e Esgoto de Poços de Caldas, por permitir a realização desse trabalho na ETE-Bortolan, em especial ao operador Frank, pela contribuição na operação do reator, e à supervisora Ana Maria, por me proporcionar condições para a realização do meu mestrado.

Aos técnicos e funcionários da Universidade Federal de Alfenas – Campus Poços de Caldas, pelo suporte e orientações no laboratório.

Aos professores, Leonardo Damasceno e Gunther, por comporem a minha banca de qualificação e por todas as sugestões que enriqueceram esse estudo.

Às minhas colegas de trabalho, Alessandra e Anna Montanari, por toda ajuda e auxílio no desenvolvimento desse projeto.

Às minhas amigas, que mesmo distantes, sempre me incentivaram e torceram por mim.

A todos que de alguma forma contribuíram para que esse objetivo profissional fosse alcançado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O tratamento de esgoto no Brasil apresenta desafios significativos com relação à remoção de compostos nitrogenados, uma vez que a maioria das estações de tratamento não foram projetadas para tal finalidade. Para isso é necessário a implementação de uma etapa de tratamento complementar. Na maioria dos sistemas de tratamento existentes, a remoção biológica convencional de nitrogênio acontece em unidades independentes de tratamento, o que encarece o custo do sistema. Com objetivo de reduzir esses custos, esse trabalho avalia o desempenho de um sistema operando em escala piloto para nitrificação e desnitrificação simultâneas (NDS) visando a remoção de carbono e nitrogênio de esgoto doméstico, utilizando aeração intermitente. Durante o período de monitoramento, o reator de leito estruturado com aeração intermitente (SBRIA) alcançou eficiência de remoção de nitrogênio total de $54\pm 20\%$, com nitrificação de $62\pm 20\%$ e desnitrificação de $85\pm 15\%$. O sistema também demonstrou remoção eficaz da matéria orgânica, com redução de $57\pm 28\%$ na demanda química de oxigênio total (DQO_T) e $87\pm 16\%$ na DQO após sedimentação (DQO_S), indicando sua eficácia na degradação da matéria orgânica, embora uma unidade de sedimentação possa ser necessária para otimizar a separação de sólidos. Além disso, o sistema gerenciou com sucesso a manutenção do pH e da alcalinidade sem a adição de agentes alcalinizantes, mantendo valores médios de $7,0\pm 0,8$ para pH e $166,8\pm 79,8$ mg L⁻¹ para alcalinidade. O SBRIA mostrou resiliência a choques de cargas orgânicas e nitrogenadas, adaptando-se à alta variabilidade do afluente típica de efluente com contribuições industriais. No geral, o SBRIA oferece uma solução promissora e econômica para o tratamento de efluentes, demonstrando um potencial significativo para aplicações em larga escala na remoção de matéria orgânica e nitrogênio.

Palavras-chave: nitrificação e desnitrificação simultâneas; reator de leito estruturado com aeração intermitente; tratamento de esgoto real com contribuições industriais; remoção de nitrogênio; sistema em escala piloto.

ABSTRACT

Wastewater treatment in Brazil faces significant challenges regarding the removal of nitrogen compounds, as most treatment plants were not originally designed for this purpose. Achieving efficient nitrogen removal requires the implementation of an additional treatment stage. In most existing systems, conventional biological nitrogen removal occurs in separate treatment units, which increases operational costs. To reduce these costs, this study evaluates the performance of a pilot-scale system operating under simultaneous nitrification and denitrification (SND) conditions for the removal of carbon and nitrogen from domestic wastewater, using intermittent aeration. During the monitoring period, the structured-bed reactor with intermittent aeration (SBRIA) achieved a total nitrogen removal efficiency of $54\pm 20\%$, with nitrification and denitrification efficiencies of $62\pm 20\%$ and $85\pm 15\%$, respectively. The system also demonstrated effective organic matter removal, with a reduction of $57\pm 28\%$ in total chemical oxygen demand (COD_T) and $87\pm 16\%$ in soluble chemical oxygen demand (COD_S) after sedimentation, indicating its efficiency in organic matter degradation, although a sedimentation unit may be required to optimize solids separation. Moreover, the system successfully maintained stable pH and alkalinity levels without the addition of alkalizing agents, with average values of 7.0 ± 0.8 for pH and 166.8 ± 79.8 mg.L⁻¹ for alkalinity. The SBRIA also exhibited resilience to organic and nitrogen loading shocks, adapting to the high variability of influent typically associated with industrial contributions. Overall, the SBRIA presents a promising and cost-effective solution for wastewater treatment, showing significant potential for large-scale applications in organic matter and nitrogen removal.

Keywords: simultaneous nitrification and denitrification; structured bed reactor with intermittent aeration; real sewage treatment with industrial contributions; nitrogen removal; pilot-scale system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Visão geral das etapas de tratamento e descrição do SBRIA.	28
Figura 2 - Desempenho operacional do SBRIA (a) nitrificação (b) remoção de nitrogênio total. Os símbolos representam: (□) afluente, (■) efluente.....	33
Figura 3 - Boxplots das concentrações de formas de nitrogênio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) e desempenho da nitrificação, desnitrificação e remoção total de nitrogênio no SBRIA.....	34
Figura 4 - Desempenho na remoção de DQO total (preto) e DQO sedimentada (azul). Os símbolos representam: (□) concentração no afluente, (■) concentração no efluente, com a eficiência de remoção indicada pelas linhas vermelha e azul.	35
Figura 5 - Perfil temporal do SBRIA durante o ciclo de 3 horas (2 horas aeradas e 1 hora não aerada).	37
Figura 6 - Concentração de NTK afluente e efluente no período seco (P.S.) e no período chuvoso (P.C.).	38
Figura 7 - Concentração de DQO afluente e efluente no período seco (P.S.) e no período chuvoso (P.C.).	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela-resumo com as principais informações dos estudos com SBRIA.....	25
Tabela 2 - Concentrações médias, máximas e mínimas do afluente.	30
Tabela 3 - Características físico-químicas dos esgotos sanitários.....	31
Tabela 4 - Resultados da análise operacional do reator SBRIA (valores médios).....	31

LISTA DE SIGLAS

Anammox – Oxidação anaeróbia da amônia
CaCO₃ – Carbonato de cálcio
CERH-MG - Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental
DBO – Demanda bioquímica de oxigênio
DQO – Demanda química de oxigênio
DQO_S – Demanda química de oxigênio (amostra sedimentada)
DQO_T – Demanda química de oxigênio total
DQO/N – Razão da demanda química de oxigênio por nitrogênio
ETE – Estação de tratamento de esgoto
H – Hidrogênio
L – Litro
m – Metro
min – Minuto
mg – Miligrama
mm – Milímetro
N – Nitrogênio
N₂ – Gás nitrogênio
NDS – Nitrificação e desnitrificação simultânea
NH₃ – Nitrogênio na forma de amônia não ionizada
NH₄⁺ – Nitrogênio na forma de amônia ionizada
N-NH₄⁺ – Nitrogênio englobando a forma de amônia e íon amônio
N-NO₂⁻ – Nitrogênio na forma de nitrito
N-NO₃⁻ – Nitrogênio na forma de nitrato
NT – Nitrogênio Total
NTK – Nitrogênio Total de Kjeldahl
O – Oxigênio
OD – Oxigênio dissolvido
pH – Potencial hidrogeniônico
SBRIA – Reator de leito estruturado submetido à aeração intermitente

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

ST – Sólidos totais

STF – Sólidos totais fixos

STV – Sólidos totais voláteis

TDH – Tempo de detenção hidráulica

UASB – Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 NITROGÊNIO	15
2.2 REMOÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO	16
2.2.1 Processo convencional de nitrificação e desnitrificação	16
2.2.2 Nitrificação e desnitrificação simultânea	17
2.3 ROTAS NÃO CONVENCIONAIS DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO	17
2.3.1 Nitrificação parcial	17
2.3.2 Processo anammox	18
2.3.3 Nitrificação heterotrófica e desnitrificação aeróbia	19
2.4 REATOR DE LEITO ESTRUTURADO COM AERAÇÃO INTERMITENTE (SBRIA)..	20
2.5 NITRIFICAÇÃO E DESNITRIFICAÇÃO SIMULTÂNEAS EM UM REATOR DE LEITO ESTRUTURADO EM ESCALA PILOTO COM AERAÇÃO INTERMITENTE (SBRIA) PARA O TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO RAL COM CONTRIBUIÇÕES INDUSTRIAIS	26
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Os países em desenvolvimento sofrem com a falta de coleta e tratamento de águas residuais. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023), no Brasil apenas 56% da população têm acesso à coleta de esgoto, desta parcela somente 52,2% são tratados. Na região sudeste o índice de atendimento total de esgoto é de 80,9%, porém apenas 61,6% são tratados.

O lançamento de efluentes líquidos não tratados, com altas concentrações de nitrogênio, pode acarretar o processo de eutrofização, que gera um crescimento exagerado de algas, provocando um consumo excessivo do oxigênio dissolvido no meio, afetando a vida aquática. Além disso, o nitrogênio na forma de amônia livre, acima de determinadas concentrações, é diretamente tóxico aos peixes, e na forma de nitrato está associado a doenças como a metahemoglobinemia (síndrome do bebê azul) (VON SPERLING, 2017).

No Brasil, os principais sistemas de tratamento de esgoto sanitário são reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), lagoas de estabilização e sistemas de lodos ativados. Com relação a remoção de compostos nitrogenados, nos processos exclusivamente anaeróbios, há uma limitação intrínseca em função da natureza, o que demanda a inclusão de unidades aeróbias de pós-tratamento para a oxidação da amônia, podendo atingir eficiências de remoção de N-amoniacal superiores a 70%. No Estado de Minas Gerais, das 627 estações de tratamento de esgoto identificadas, observou-se que 69% são baseadas em reatores do tipo UASB, onde 24% delas não possuíam etapas de pós-tratamento (RIBEIRO et al., 2023). A construção e operação de sistemas de pós-tratamento de efluentes de reatores UASB para remoção de nitrogênio encarecem o sistema, tornando-o por vezes inviável.

O processo convencional de remoção biológica de nitrogênio é feito através da nitrificação e desnitrificação. Na maioria dos sistemas de tratamento existentes, essa remoção acontece em unidades independentes da que ocorre a remoção da matéria orgânica, aumentando os custos desses sistemas.

Buscando minimizar os custos de construção, operação e manutenção desses sistemas, o reator de leito estruturado submetido à aeração intermitente (SBRIA), que promove a remoção simultânea de matéria orgânica e nitrogênio em uma única unidade de tratamento, é objeto de diversas pesquisas recentes. Os principais resultados encontrados foram: redução

nos custos de construção devido a uma única unidade de tratamento; redução nos custos de operação devido a dispensabilidade de adição de produtos alcalinos e fonte externa de carbono; redução no gasto de energia elétrica em função da não recirculação do efluente e redução do bombeamento que seria utilizado na recirculação. Essa tecnologia vem apresentando altas eficiências de remoção de matéria orgânica e nitrogênio, sendo uma alternativa eficiente como unidade secundária/terciária no tratamento de efluentes.

No que tange aos limites legais, padrões restritivos de lançamento de nitrogênio têm sido aplicados. No âmbito federal, a Resolução CONAMA 430/2011 não estabelece padrões de nitrogênio amoniacal total para o lançamento de efluentes sanitários. Porém, a concentração de nitrogênio amoniacal no esgoto sanitário tratado não deve ferir os níveis toleráveis para a classe de enquadramento do corpo receptor, conforme diretrizes estabelecidas na Resolução CONAMA 357/2005.

No âmbito estadual, o Estado de Minas Gerais publicou a Deliberação Normativa COPAM-CERH/MG nº 8/2022, em 21 de novembro de 2022, que define para sistemas de tratamento de esgotamento sanitários, a concentração máxima de nitrogênio amoniacal de 20 mg/L. O prazo para adequação dos sistemas é função da capacidade de instalação, sendo de 7 anos para estações de até 50 L/s, de 6 anos para estações entre 50 e 100 L/s, e de 5 anos para estações acima de 100 L/s.

Considerando a premente necessidade de adaptação dos sistemas de tratamento de esgoto com o objetivo de promover a remoção de nitrogênio prevista na legislação vigente, e para minimizar os impactos gerados pelo excesso desses nutrientes nos corpos hídricos, esse trabalho apresenta a operação de um SBRIA em escala piloto, tratando esgoto sanitário, aproximando-se das condições plenas de tratamento, para remoção simultânea de matéria orgânica e nitrogênio.

A tecnologia proposta simplifica o processo uma vez que permite a remoção simultânea da matéria orgânica e de compostos nitrogenados em uma única unidade de tratamento. O uso da aeração intermitente proporciona redução nos gastos com energia elétrica em comparação aos sistemas de aeração contínua tradicionalmente empregados. E a operação em fluxo contínuo contribui para a redução da complexidade operacional, característica comum de processos convencionais em batelada. Sendo assim, o SBRIA pode se tornar uma alternativa técnica e economicamente viável no tratamento de efluentes.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal dessa pesquisa foi avaliar, por um período de 258 dias de operação, a eficiência de um SBRIA em escala piloto para remoção de matéria orgânica e nitrogênio de esgoto sanitário.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a estabilidade do sistema na eficiência de remoção de matéria orgânica e nitrogênio;
- b) Investigar o efeito da contribuição não autorizada de efluente industrial no desempenho do sistema;
- c) Analisar a influência da sazonalidade na eficiência do reator;
- d) Avaliar a remoção dos compostos nitrogenados durante os ciclos com e sem aeração;
- e) Comprovar a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação simultânea no reator.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 NITROGÊNIO

O nitrogênio é o quarto elemento mais abundante da natureza, sendo parte da estrutura do DNA, RNA e das proteínas, que são componentes básicos da construção da vida. Compõe cerca de 78% do ar atmosférico, porém não está disponível para ser utilizado pelos organismos (LEE, 1999).

O nitrogênio se alterna entre várias formas e estados de oxidação dentro do ciclo na biosfera. No meio aquático, o nitrogênio pode ser encontrado na forma de nitrogênio molecular (N_2), escapando para a atmosfera, nitrogênio orgânico (dissolvido e em suspensão), amônia (livre NH_3 e ionizada NH_4^+), nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-) (VON SPERLING, 2017).

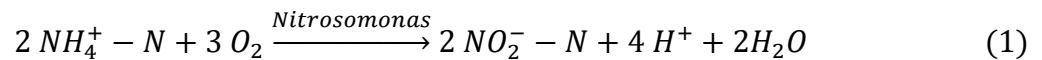
Elevadas concentrações de nitrogênio nos corpos hídricos podem diminuir a capacidade assimilativa dos sistemas fluviais, de maneira que esse nutriente em excesso é transportado para jusante. Comunidades aquáticas como macrófitas e fitoplâncton têm seus

crescimentos favorecidos, podendo causar a eutrofização dos corpos d'água. Esse processo resulta na deterioração da qualidade da água devido a presença de cianobactérias tóxicas, diminuição do oxigênio dissolvido (OD) presente no meio, prejudicando a biodiversidade aquática, e comprometendo a saúde humana devido às altas concentrações de nitrito e nitrato (BRAGION, 2023).

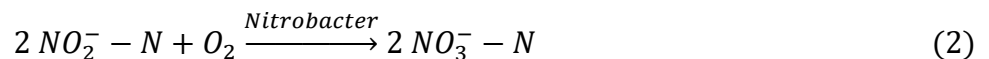
2.2 REMOÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO

2.2.1 Processo convencional de nitrificação e desnitrificação

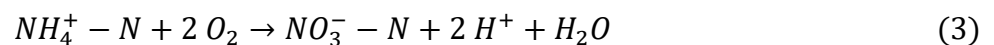
Em sistemas convencionais a remoção biológica de nitrogênio ocorre em duas etapas: nitrificação e desnitrificação. Na nitrificação ocorre a conversão da amônia em nitritos e esses em nitratos, na presença de oxigênio. Os microrganismos envolvidos nesse processo são autótrofos quimiossintetizantes (ou quimioautótrofos), onde o gás carbônico é a principal fonte de carbono. A conversão da amônia em nitritos é realizada pelas bactérias do gênero *Nitrosomonas*, de acordo com a reação demonstrada na Equação 1 (VON SPERLING, 2016):



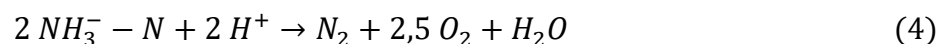
A oxidação dos nitritos a nitratos ocorre principalmente através das bactérias do gênero *Nitrobacter*, sendo expressa por:



A reação global do processo de nitrificação é a soma das Equações 1 e 2:



Na desnitrificação o nitrato é reduzido a nitrogênio gasoso, em condições anóxicas (ausência de oxigênio), pelos microrganismos heterotróficos que utilizam os nitratos como aceptores de elétrons em substituição ao oxigênio, de acordo com a reação abaixo (VON SPERLING, 2016):



2.2.2 Nitrificação e desnitrificação simultânea

Várias pesquisas e alternativas de tratamento vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de promover a remoção do nitrogênio, onde as etapas de nitrificação e desnitrificação ocorram simultaneamente em um mesmo reator, fenômeno esse conhecido como nitrificação e desnitrificação simultânea (NDS) (MOURA et al., 2018).

Existem dois fenômenos que explicam a ocorrência da nitrificação e desnitrificação simultâneas em um sistema. O primeiro é físico, que indica a existência de um gradiente de oxigênio dissolvido no biofilme do reator, onde na parte externa do biofilme a concentração de OD é maior, promovendo um maior desenvolvimento dos microrganismos nitrificantes, já na parte interna do biofilme a concentração de OD tende a zero (condição anóxica), sendo maior a presença dos microrganismos desnitrificantes. O segundo é biológico, pesquisadores têm demonstrado que alguns microrganismos, como o gênero de bactérias *Comamonas*, possuem a capacidade de nitrificar heterotroficamente e desnitrificar em condições aeróbias (MOURA et al., 2018).

Quando comparados aos sistemas convencionais, os sistemas de NDS apresentam vantagens como: redução nos custos de implantação, uma vez que é utilizada uma única unidade para a remoção de matéria orgânica e nitrogênio, ao invés de três unidades como são usualmente utilizados para remoção de matéria orgânica, nitrificação e desnitrificação; redução nos custos de operação, visto que há uma economia no consumo de energia atrelado a utilização de menores concentrações de oxigênio dissolvido, já que parte da matéria orgânica é removida através das bactérias desnitrificantes heterotróficas anaeróbias, que utilizam nitrito e nitrato como aceptores finais de elétrons; e na maioria dos casos não é necessário a adição de uma fonte externa de carbono para que ocorra a desnitrificação, pois todas as etapas ocorrem no mesmo reator (ZHANG et al., 2015).

2.3 ROTAS NÃO CONVENCIONAIS DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO

2.3.1 Nitrificação parcial

No processo de nitrificação parcial, a oxidação do nitrogênio amoniacal é interrompida em nitrito, o que reduz a necessidade de aporte de oxigênio, reduzindo custos operacionais. A nitrificação parcial apresenta, como vantagens, a redução de 25% no consumo de oxigênio dissolvido, além da redução de 35% na produção de lodo e de 40% na demanda de DQO pela via nitrito, quando comparada à desnitrificação via nitrato (SILVEIRA, 2022).

Nesse sentido, diversos estudos de processos para remoção de nitrogênio por meio da nitrificação parcial têm sido desenvolvidos, incluindo nitrificação parcial e desnitrificação, nitrificação e desnitrificação simultâneas e oxidação anaeróbia da amônia (Anammox) (GE et al., 2015).

A interrupção da nitrificação do nitrogênio amoniacal após a etapa de nitrificação ocorre em função de que a oxidação do nitrito se sucede à oxidação da amônia. Assim, em sistemas submetidos à aeração intermitente, a conversão de nitrito em nitrato não se concretiza devido à limitação de oxigênio dissolvido (OD) (MA et al., 2015b).

Diante desse contexto, uma vez que o SBRIA é operado com aeração intermitente, a nitrificação parcial é uma via metabólica possível para oxidação do nitrogênio amoniacal.

2.3.2 Processo anammox

A oxidação anaeróbia da amônia (Anammox) é um processo no qual NH_4^+ (amônio) é convertido em N_2 (nitrogênio gasoso) utilizando NO_2^- (nitrito) como aceptor de elétrons, e se difundiu como uma rota economicamente eficiente para remoção biológica de nitrogênio (ZHANG et al., 2017).

Os microrganismos capazes de realizar esse processo são conhecidos como bactérias Anammox. Esta aplicação vem sendo pesquisada nas últimas décadas e é considerada um processo promissor, devido à redução de custos operacionais, por não necessitar de fonte de carbono, pela menor produção de lodo devido à baixa taxa de crescimento dos microrganismos Anammox e por não gerar gás carbônico (SILVEIRA, 2022).

O processo Anammox possui duas principais desvantagens: (i) valores de DQO superiores a 100-400 mg/L podem restringir a atividade das bactérias Anammox, interromper o processo e reduzir a eficiência de nitrogênio total; (ii) pode ser restringido pela presença das bactérias oxidantes de nitrito, que rapidamente consomem o nitrato e inibem o crescimento das bactérias Anammox devido à escassez de nitrito. Quando submetidos a aeração intermitente em um único reator, que favorece a ocorrência de nitrificação parcial por bactérias aeróbias, estas desvantagens são resolvidas. Parte do nitrogênio amoniacal presente no afluente é oxidado a nitrito pelas bactérias aeróbias oxidantes de amônia, enquanto a amônia restante é oxidada e o nitrito é reduzido a nitrogênio gasoso pelas bactérias Anammox, e o nitrato é reduzido a nitrogênio gasoso pelas bactérias desnitrificantes, que

também consomem matéria orgânica. Nestas condições é possível remover nitrogênio e carbono, e amenizar os problemas do processo Anammox (ZHANG et al., 2017).

De acordo com Ma et al. (2015a) a retenção de bactérias Anammox é favorecida pela presença de biofilme em leito fixo empacotado, onde é possível encontrar um ambiente adequado, com amônia disponível e baixas concentrações de nitrito.

Nesse sentido, por combinar aeração intermitente, tratamento em um único reator com leito estruturado, o SBRIA proporciona condições adequadas para que o processo Anammox ocorra. No entanto, no tratamento de esgoto sanitário, devido à baixa relação DQO/N, que influencia negativamente para a ocorrência do processo Anammox, não foram encontradas evidências de que esse processo tenha desempenhado um papel relevante (MOURA et al, 2018a).

2.3.3 Nitrificação heterotrófica e desnitrificação aeróbia

A nitrificação heterotrófica e desnitrificação aeróbia é um processo baseado na transformação, por microrganismo heterotrófico, da amônia em nitrogênio gasoso em aerobiose. A via metabólica desse processo ainda não foi claramente definida (ROCHA, 2021).

A desnitrificação aeróbia, conduzida por microrganismos desnitrificantes aeróbios, vem sendo pesquisada devido ao potencial para eliminar a necessidade de tanques separados e reduzir a taxa de produção de lodo. Como vantagem, apresenta menor necessidade de alcalinidade pois a alcalinidade gerada durante o processo de desnitrificação pode compensar parcialmente o consumo de alcalinidade pela nitrificação. Além disso, alguns microrganismos envolvidos nesse processo são capazes de realizar a nitrificação heterotrófica (JI et al, 2015).

No entanto, esses microrganismos comumente são bastante sensíveis a perturbações no meio, como baixas temperaturas, altas salinidades, condições extremas de pH, metais pesados, o que limita sua aplicação para tratamento de efluentes reais (CHEN et al, 2014).

De acordo com Chen; Ni (2011), um dos gêneros capazes de realizar a nitrificação heterotrófica e desnitrificação aeróbia é o *Comamonas*, que possui uma taxa de crescimento específico aproximadamente 10 vezes maiores que os microrganismos nitrificantes autotróficos. Moura et al. (2018a) detectou, por meio de análises moleculares, extração e sequenciamento de DNA, que o gênero *Comamonas* foi o único gênero a permanecer durante

toda a operação do SBRIA realizada durante o experimento de 458 dias tratando esgoto sanitário real, indicando que o mecanismo da nitrificação heterotrófica e desnitrificação aeróbia pode ser uma importante via metabólica para a remoção de nitrogênio no SBRIA.

2.4 REATOR DE LEITO ESTRUTURADO COM AERAÇÃO INTERMITENTE (SBRIA)

Um dos modelos de reatores que tem sido utilizado por pesquisadores para processos de NDS é o reator de leito estruturado com aeração intermitente. Esse reator opera com biomassa imobilizada e crescimento aderido, fazendo com que as bactérias permaneçam mais tempo dentro do sistema, apresentando maior tempo de detenção celular, mesmo operando com tempos de detenção hidráulica menores (MOURA *et al*, 2012).

Esse reator vem apresentando alta eficiência de remoção de matéria orgânica e nitrogênio simultaneamente em um único compartimento. Reatores com biomassa aderida apresentam maior concentração de microrganismos, possuem maior tolerância aos impactos de cargas, menor geração de lodo e demandam de áreas menores para sua construção, quando comparados aos reatores com biomassa em suspensão (JENZURA *et al*, 2018).

No Brasil, os meios suportes mais utilizados em reatores de leito fixo não estruturado são normalmente pedra brita, anéis de plástico, elementos cerâmicos, elementos de madeira, cilindros de plástico perfurados, entre outros. Já em reatores de leito estruturado a espuma de poliuretano é o único tipo de meio suporte utilizado, apresentando porosidade elevada ideais para a imobilização da biomassa, além de oferecerem boa resistência mecânica, baixo custo e fácil aquisição. Estudos demonstraram que nesse tipo de espuma, a biomassa aderida conseguiu promover zonas aeróbias e anóxicas, estabelecendo a nitrificação nas zonas externas e a desnitrificação nas zonas internas (OLIVEIRA, 2016).

2.4.1 A evolução na utilização do SBRIA

Moura *et al*. (2012) avaliou a remoção de nitrogênio e matéria orgânica em um único reator de leito estruturado com aeração intermitente. O reator foi construído em acrílico, com volume de 11,6 L e volume útil de 6,1 L. Foi preenchido com estruturas cilíndricas em espuma de poliuretano, formando um leito estruturado com porosidade de 52%. A alimentação foi feita com água residuária sintética com características semelhantes ao esgoto sanitário. O reator foi operado com aeração intermitente, 2 horas aerado e 1 hora não aerado, e uma razão de recirculação de 5 vezes ao da alimentação. Foram testados 3 tempos de

detenção hidráulicos (TDH) diferentes: 8, 10 e 12 horas. O maior TDH apresentou a maior eficiência de remoção, sendo 82% de nitrogênio total e 89% de DQO (demanda química de oxigênio). Nos TDH's de 8 e 10 horas, o reator se apresentou instável em relação a remoção de nitrogênio total, sendo as eficiências médias de 49% e 45% respectivamente. No entanto, as eficiências de remoção de DQO permaneceram altas, com valores de 85% e 88% respectivamente.

Para avaliar a influência da razão de DQO/N e da fonte de carbono no processo de NDS, Santos *et al.* (2016) operou um reator SBRRIA de bancada, com a mesma configuração descrita por Moura *et al.* (2012), com um TDH de $11,2 \pm 0,6$ horas e utilizando sacarose e peptona de carne como fontes de carbono. A razão de DQO/N foi variada mantendo a carga orgânica fixa em $1,07 \text{ kg DQO/m}^3 \cdot \text{d}$ e variando a concentração de NT. As razões analisadas foram: $9,7 \pm 1$ (sacarose – Fase 1); $7,6 \pm 1$ (peptona de carne – Fase 2); $2,9 \pm 1$ (peptona de carne – Fase 3) e $2,9 \pm 0,4$ (sacarose – Fase 4). Nas fases 3 e 4 foi observada a ocorrência do processo anammox, sendo responsável por 35% e 27% das taxas de remoção de NT, respectivamente. O sistema alcançou eficiências de remoção de nitrogênio total de $84,6 \pm 10,1\%$ e $81,5 \pm 5,3\%$, demonstrando uma melhora na eficiência de remoção de NT quando a razão DQO/N foi reduzida para 2,9, mesmo com a baixa disponibilidade de carbono orgânico como doador de elétrons. Os resultados obtidos demonstraram que a integração dos processos de nitrificação, desnitrificação e anammox, sob a limitação de oxigênio, foram responsáveis pela melhoria da eficiência de remoção de NT, potencializando a remoção de nitrogênio e matéria orgânica.

Como a composição do esgoto sanitário é muito mais complexa do que o efluente sintético, Moura *et al.* (2018a) decidiu estudar a aplicação desse mesmo reator citado acima para o tratamento de esgoto sanitário real. A razão de recirculação adotada foi igual a 3, após a realização de ensaios hidrodinâmicos (Moura *et al.*, 2018b). Foram testadas 4 condições operacionais diferentes: TDH de 12, 10 e 8 horas e aeração intermitente com 2 horas aerando e 1 hora não; e TDH de 8 horas com aeração intermitente com 3 horas aerando e 1 hora não. O sistema apresentou elevada eficiência de remoção de nitrogênio total para TDH de 12 e 10 horas, com valores médios de 80%. Com a diminuição do TDH para 8 horas, mantendo a aeração por 2 horas e não aeração por 1 hora, houve uma queda na eficiência do sistema para 70%, sendo essa queda relacionada à diminuição no processo de nitrificação. Alterando a aeração para 3 horas e 1 hora não aerado, com TDH de 8 horas, a eficiência média de

remoção de nitrogênio total foi de 79%. A remoção de matéria orgânica foi elevada em todas as condições, com valores médios em torno de 90% de remoção de DQO. Apesar da operação sob aeração intermitente, os perfis temporais demonstraram que não houve variação nas formas de nitrogênio (N-NH_4^+ , N-NO_2^- , N-NO_3^-) no efluente, devido ao grau de mistura gerado pela recirculação interna.

Jenzura et al. (2018) avaliou a eficiência de remoção de matéria orgânica e nitrogênio em um SBRRIA em escala de bancada tratando uma mistura de 50% de esgoto sanitário bruto após o tratamento preliminar e 50% de efluente já tratado por reator UASB. Essa mistura forneceu uma fonte de carbono para o processo de desnitrificação, eliminando a adição de fonte externa de carbono. O reator possuía um volume útil de 8,6 L, com leito estruturado de espuma de poliuretano. Os ensaios foram realizados com TDH de 8, 10 e 12 horas, e tempo de aeração de 60, 75 e 90 minutos, em ciclos de 180 minutos. A vazão de recirculação foi 2 vezes a vazão de entrada. Nestas condições, a concentração de DQO do efluente variou entre 18 e 59 mg/L, e as análises estatísticas indicaram que a remoção de DQO não foi afetada nem pelo TDH, nem pelo tempo de aeração. A eficiência de remoção de NT variou entre 76 e 88%, sendo no TDH de 8 horas e tempo de aeração de 60 minutos a maior taxa de remoção. A eficiência da desnitrificação não apresentou variação significativa. Os resultados encontrados nesse estudo demonstraram que o SBRRIA é uma tecnologia eficiente para o tratamento de esgoto sanitário, tanto em nível secundário, como terciário.

Continuando os estudos desse modelo de reator, porém em maior escala, Murata et. al (2021) utilizou um reator de leito estruturado submetido à recirculação em escala piloto para avaliar sua implantação, estabilidade e eficiência para tratar esgoto doméstico em condições reais para futura aplicação como sistema descentralizado de tratamento em pequenas comunidades e condomínios residenciais. O reator foi construído em fibra de vidro, formato cilíndrico, com volume total de aproximadamente 0,905 m³ e volume útil de 0,642 m³. A operação foi realizada sob condições de aeração contínua com TDH de 23,6, 35,3 e 48,6 horas e aeração intermitente com TDH de 47,2 horas. A eficiência de remoção de DQO foi superior a 87% em todas as condições. A máxima eficiência de remoção de NT de 74% foi obtida na condição de aeração intermitente (2 horas aerado e 1 hora não aerado). A configuração do sistema de aeração foi eficaz para garantir o equilíbrio na ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação.

Embora os estudos anteriores envolvessem a recirculação do efluente, Oliveira *et al* (2021), foram os pioneiros ao relatar a operação de um SBRIA de bancada sem esse procedimento. O reator foi construído em acrílico, formato cilíndrico, com volume de 10,8 L, e leito estruturado composto por espumas de poliuretano. Foi alimentado com efluente sintético que simulava as características do esgoto sanitário após tratamento preliminar. A operação durou 280 dias com um TDH de 10 horas. Foram variados os parâmetros de fluxo de ar e tempo de aeração. A eficiência de remoção de DQO foi superior a 81% em todas as condições operacionais, e a eficiência de remoção de nitrogênio total variou entre 10 e 80%. Quando o reator foi submetido a tempos de aeração e fluxo de ar maiores, as eficiências de nitrificação foram superiores a 90%, já em tempos de aeração mais curtos e fluxos de ar menores, as eficiências de desnitrificação foram acima de 90%, indicando que o equilíbrio entre esses dois processos é fundamental para o bom desempenho do SBRIA. A maior eficiência de remoção de nitrogênio total, de 80%, foi obtida em um tempo de aeração de 1h e 45min, seguido por 1h e 15min sem aeração e uma taxa de fluxo de ar de 4,5 L/min. O perfil temporal mostrou que, mesmo sem a recirculação do efluente, não houve picos na concentração das formas de nitrogênio, possibilitando uma economia de energia elétrica de até 75%, resultado da redução do bombeamento e da otimização do sistema.

Apesar das pesquisas com o reator SBRIA apresentarem resultados positivos, parâmetros operacionais e de construção permaneciam empíricos. Souza *et al* (2021) otimizou o diâmetro do material suporte e a porosidade do leito para o melhor desempenho do sistema. O estudo foi realizado em escala de bancada, sem recirculação do efluente. O reator foi alimentado com efluente sintético simulando esgoto doméstico após o tratamento preliminar. Foi operado com aeração intermitente, sendo 2 horas aerado e 1 hora não aerado, com um TDH de 10 horas. O diâmetro do material suporte variou entre 1, 2 e 3 cm e a porosidade do leito entre 60, 70 e 80%. As eficiências de remoção de DQO e de nitrificação atingiram valores médios de 80 e 90%, respectivamente, e não sofreram influência com a variação do diâmetro do material suporte e da porosidade do leito. Contudo, as eficiências de remoção de NT e de desnitrificação foram significativamente afetadas, apresentando os maiores valores para um diâmetro de 3 cm e porosidade do leito de 60%. O aumento do diâmetro do material suporte teve um efeito favorável na eficiência de desnitrificação, em razão da existência de uma zona anóxica dentro da espuma de poliuretano. Todavia, com a diminuição do diâmetro, o aumento da porosidade do leito favoreceu o processo de desnitrificação, contribuindo para a

remoção de NT. Os resultados obtidos por esse estudo foram fundamentais para enfatizar a importância de considerar esses parâmetros para a otimização desse tipo de sistema.

Correa et al. (2023) avaliou o desempenho de um SBRIA em escala de bancada na remoção de matéria orgânica e nitrogênio de efluentes lácteos, sob diferentes taxas de carga orgânica. O reator foi construído em acrílico, com volume total de 2,27 L e volume útil de 1,70 L. Foram utilizadas estruturas cilíndricas de poliuretano como meio suporte para o crescimento da biomassa, preenchendo 25% do volume do reator. Ademais, 5% do volume útil do reator continha biomassa suspensa (lodos ativados). O efluente utilizado foi proveniente de uma indústria de laticínios do Paraná, coletado após a unidade de flotação da estação de tratamento de efluentes. O reator foi operado por 227 dias, com ciclos de aeração intermitente de 2:1 (2 horas com aeração e 1 hora sem aeração). O tempo de detenção hidráulica foi de 16 horas. A remoção de matéria orgânica foi superior a 85% e de nitrogênio total a 83%. Foi realizado um teste cinético para avaliar os processos de nitrificação e desnitrificação, onde foi constatado que mesmo com concentrações de 4,5 mg/L de oxigênio dissolvido, foi possível obter desnitrificação no sistema. Já a nitrificação foi afetada com o aumento da matéria orgânica afluyente, pois favoreceu o crescimento de organismos heterotróficos, que podem ter inibido outros microrganismos. Contudo, não houve acúmulo das formas oxidadas de nitrogênio no reator. Os resultados demonstraram que o SBRIA pode ser uma alternativa eficiente como unidade secundária/terciária no tratamento de efluentes lácteos, proporcionando alta remoção de matéria orgânica e nitrogênio, mesmo sob diferentes condições operacionais.

Os bons resultados obtidos nesses estudos apresentam o SBRIA como uma alternativa promissora para a remoção de nitrogênio. A operação em escala piloto desse reator representa um passo importante para a otimização desse tipo de tratamento em aplicações reais de efluentes sanitários e industriais. Barbosa et al. (2024) operou um SBRIA em escala piloto tratando esgoto sanitário proveniente de uma estação de tratamento de Poços de Caldas. O reator foi construído em fibra de vidro, no formato cilíndrico, com volume total de 12,296 m³ e volume útil de 8,37 m³. Os resultados preliminares obtidos nesse estudo demonstraram remoção eficiente de matéria orgânica e nitrogênio simultaneamente, atingindo eficiência de remoção de 56% de DQO total, de 82% de DBO e de 57% de nitrogênio total. Através da aeração intermitente e da não necessidade de adição de produtos alcalinos ou fonte externa de carbono, foi possível obter uma redução nos custos.

Em razão dos resultados encontrados não terem sido semelhantes aos obtidos em reatores em escala de bancada, a continuidade da operação desse reator em escala piloto é fundamental para investigar possíveis problemas operacionais que poderiam estar influenciando negativamente na eficiência do sistema e assim melhorar o seu desempenho.

A Tabela 1 resume as principais informações dos artigos citados acima sobre a evolução do SBRIA ao longo dos últimos anos.

Tabela 1 - Tabela-resumo com as principais informações dos estudos com SBRIA

(continua)

Autores/ Ano	Tipo de efluente	Volume do reator	Recirculação do efluente	TDH	Máxima eficiência de remoção de DQO	Máxima eficiência de remoção de NT
Moura et al. 2012	Efluente sanitário sintético	6,1 L	Sim	8, 10 e 12 horas	89%	82%
Santos et al. 2016	Efluente sintético com sacarose e peptona de carne	5,5 L	Sim	11,2±0,6 horas	97±2%	84,6±10,1%
Moura et al. 2018	Esgoto sanitário	6,1 L	Sim	8, 10 e 12 horas	90%	80%
Jenzura et al. 2018	50% esgoto sanitário bruto após tratamento preliminar e 50% efluente tratado de reator UASB	8,6 L	Sim	8, 10 e 12 horas	94%	88%
Murata et al. 2021	Esgoto sanitário	0,642 m ³	Sim	23,6, 35,3 e 48,6 horas	> 87%	74%
Oliveira et al. 2021	Efluente sanitário sintético	10,8 L	Não	10 horas	> 81%	80%
Souza et al. 2021	Efluente sanitário sintético	13,4 L	Não	10 horas	86,3±1,1%	87,2±0,9%

Tabela 1 - Tabela-resumo com as principais informações dos estudos com SBRIA (conclusão)

Autores/ Ano	Tipo de efluente	Volume do reator	Recirculação do efluente	TDH	Máxima eficiência de remoção de DQO	Máxima eficiência de remoção de NT
Correa et al. 2023	Efluentes lácteos	2,27 L	Não	16 horas	> 85%	> 83%
Barbosa et al. 2024	Esgoto sanitário	12,296 m ³	Não	10 horas	56±31%	57±27%

Fonte: Autor, 2025.

2.5 NITRIFICAÇÃO E DESNITRIFICAÇÃO SIMULTÂNEAS EM UM REATOR DE LEITO ESTRUTURADO EM ESCALA PILOTO COM AERAÇÃO INTERMITENTE (SBRIA) PARA O TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO RAL COM CONTRIBUIÇÕES INDUSTRIAIS

Artigo submetido e em fase de revisão na Revista Chemical Engineering Science. Número do manuscrito: CES-D-25-02525.

Nitrificação e Desnitrificação Simultâneas em um Reator de Leito Estruturado em Escala Piloto com Aeração Intermitente (SBRIA) para o Tratamento de Esgoto Sanitário Real com Contribuições Industriais

Amanda Carvalhaes Souto Valim, Alessandra Giordani, Anna Flavia Pereira Montanari, Rafael Brito de Moura.

Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Poços de Caldas, Minas Gerais, Brasil.

Resumo

O tratamento biológico de esgoto sanitário real com contribuições industriais apresenta desafios significativos devido à variabilidade nas características do afluente e à possível presença de substâncias inibidoras. Esse estudo avalia o desempenho de um sistema operando em escala piloto (12 m³) para nitrificação e desnitrificação simultâneas (NDS) visando a remoção de carbono e nitrogênio de esgoto sanitário real, utilizando aeração intermitente. Durante o período de monitoramento, o reator de leito estruturado com aeração intermitente (SBRIA) alcançou eficiência de remoção de nitrogênio total de 54±20%, com nitrificação de 62±20% e desnitrificação de 85±15%. O sistema também demonstrou remoção eficaz da matéria orgânica, com redução de 57±28% na demanda química de oxigênio total (DQO_T) e 87±16% na DQO após sedimentação (DQO_S), indicando sua eficácia na degradação da matéria orgânica, embora uma unidade de sedimentação possa ser necessária para otimizar a separação de sólidos. Além disso, o sistema não necessitou da adição de alcalinizantes para o controle do pH, mantendo valores médios de 7,0±0,8 para pH e 166,8±79,8 mg L⁻¹ para alcalinidade. O SBRIA mostrou capacidade de suportar choques tóxicos, adaptando-se à alta variabilidade do afluente típica de efluente com contribuições industriais. Portanto, o SBRIA oferece uma solução

promissora e econômica para o tratamento de efluentes, demonstrando potencial para aplicações em larga escala na remoção simultânea de matéria orgânica e nitrogênio.

Palavras-chave: nitrificação e desnitrificação simultâneas, reator de leito estruturado com aeração intermitente, tratamento de esgoto real com contribuições industriais, remoção de nitrogênio, sistema em escala piloto.

4.1. INTRODUÇÃO

No Brasil, diversos municípios enfrentam dificuldades na remoção eficaz de contaminantes do esgoto, resultando no descarte desses efluentes nos corpos receptores sem o tratamento adequado. Essa prática exerce pressão considerável sobre os recursos hídricos e impacta negativamente seus usos. O desafio se torna ainda maior quando a estação de tratamento recebe efluentes industriais, pois concentrações mais elevadas de compostos nitrogenados e outros poluentes aumentam a complexidade do processo de tratamento (Cho et al., 2014; Dutta et al., 2021).

A atividade das bactérias nitrificantes em estações de tratamento de esgoto é altamente sensível a variações em diversos parâmetros operacionais, como pH, temperatura, concentrações de amônia/nitrito, níveis de oxigênio e a presença de compostos tóxicos. Esses fatores podem afetar a eficiência do processo de nitrificação, muitas vezes resultando em instabilidade do sistema e eventual falha do processo (Cho et al., 2014; Liu et al., 2020). Consequentemente, há uma demanda crítica pelo desenvolvimento de biorreatores capazes de manter alta eficiência de nitrificação apesar dessas variações operacionais. Esses sistemas devem ser projetados para garantir taxas de remoção estáveis e eficazes sob condições operacionais variáveis, melhorando assim a confiabilidade dos processos de tratamento de esgoto.

O gerenciamento do processo de desnitrificação no tratamento de esgoto também representa um desafio, pois requer controle adequado dos parâmetros operacionais, como disponibilidade de carbono, pH, temperatura e oxigênio dissolvido (Liu et al., 2020). A remoção simultânea de compostos orgânicos e nitrogênio em uma única unidade, alcançada por meio do processo de nitrificação e desnitrificação simultâneas (NDS), pode reduzir custos e melhorar a eficiência operacional (Di Capua et al., 2022). No entanto, manter condições ideais para ambos os processos dentro de um único sistema é complexo e exige um controle preciso desses parâmetros para garantir que tanto a nitrificação quanto a desnitrificação ocorram de maneira eficaz. Embora vários estudos tenham demonstrado condições ideais para NDS em reatores de bancada tratando esgoto doméstico (Moura et al., 2018; Oliveira et al., 2022; Santos et al., 2016), as variações na composição do esgoto, especialmente devido a influências de fontes industriais, ainda são pouco abordadas.

O Reator de Leito Estruturado com Aeração Intermitente (SBRIA) tem demonstrado potencial para enfrentar esses desafios ao empregar estratégias de aeração intermitente que permitem que a nitrificação e a desnitrificação ocorram simultaneamente (Moura et al., 2012; Santos et al., 2016). Essa abordagem possibilita manter níveis de oxigênio no reator que permitam a otimização de ambos os processos, mesmo diante de variações nas condições do afluente, incluindo contribuições industriais. Assim, os sistemas SBRIA apresentam potencial para um tratamento mais robusto de efluentes, capazes de lidar com essas variações enquanto minimiza os custos operacionais.

No entanto, um estudo recente em escala piloto realizado por Barbosa et al. (2024) relatou redução na eficiência do tratamento quando o reator SBRIA foi utilizado para esgoto doméstico sujeito a variações na composição, evidenciando uma lacuna na literatura sobre aplicações em efluentes industriais. Embora o estudo forneça resultados valiosos, é um dos poucos que examinam o sistema

aplicado a condições reais de operação em escala piloto. Isso destaca a necessidade de mais pesquisas para compreender o impacto da contribuição de efluentes industriais no desempenho do SBRIA. Estudos mais abrangentes são essenciais para refinar os parâmetros operacionais e melhorar a adaptabilidade do sistema a variações na carga de poluentes de esgoto afluente, garantindo um tratamento robusto e eficaz em diversas aplicações.

Expandindo a pesquisa de Barbosa et al. (2024), esse estudo dá continuidade à operação da mesma configuração inovadora de reator para o tratamento de esgoto sanitário. O sistema emprega o processo de nitrificação e desnitrificação simultâneas (NDS) e remoção de matéria orgânica em um reator de unidade única operado com fluxo contínuo e aeração intermitente. O objetivo foi avaliar de forma abrangente a eficiência do SBRIA em escala piloto na remoção de carbono e nitrogênio, enfatizando seu potencial para lidar com variações decorrentes das contribuições industriais em estações de tratamento de esgoto.

4.2. Materiais e Métodos

4.2.1. Sistema Piloto SBRIA e Parâmetros Operacionais

O sistema SBRIA, conforme descrito em Barbosa et al. (2024), consistiu em um tanque cilíndrico de fibra de vidro com diâmetro interno de 1,8 m e altura útil de 4,95 m. Composto por quatro módulos com espuma prismática de poliuretano (30 x 30 mm), resultando em um volume total de 12,296 m³ e volume útil de 8,37 m³, com porosidade do leito de 66%. O esgoto bruto era bombeado para o reator por meio de uma bomba submersível Abs Sulzer (modelo Abs Robusta 250 T), e o efluente tratado saía a uma altura de 4,75 m. O reator foi operado à temperatura ambiente por 258 dias, dando continuidade à operação concluída por Barbosa et al. (2024), com tempo de detenção hidráulica de 10 horas e aeração intermitente em um ciclo de 3 horas (2 horas com aeração, 1 hora sem aeração), seguindo as recomendações de Oliveira et al. (2022).

O processo de tratamento e a configuração do SBRIA estão apresentados na **Figura 1**.

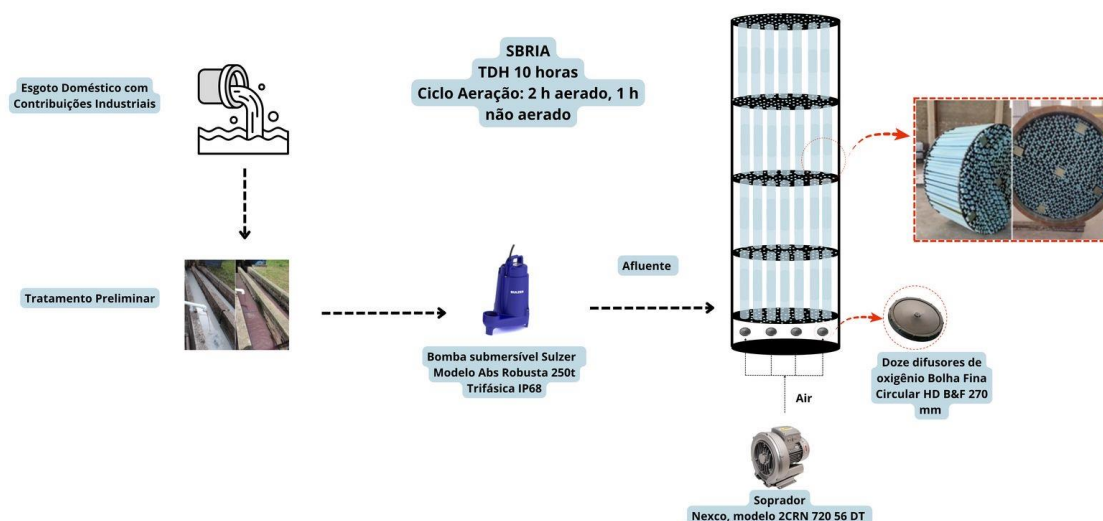


Figura 1: Visão geral das etapas de tratamento e descrição do SBRIA.

Fonte: Autor, 2025.

4.2.2. Métodos Analíticos

Todas as análises foram realizadas seguindo os protocolos especificados no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Amostras do esgoto tratado foram coletadas duas vezes por semana para análise de pH, alcalinidade, nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrito ($\text{NO}_2^-\text{-N}$), nitrato ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), demanda química de oxigênio total (DQO_T) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5).

Para estimar a eficiência do tratamento após uma unidade de sedimentação, conforme recomendado por Barbosa et al. (2024), amostras do efluentes foram colocadas em repouso por 3 minutos. Após esse período, o sobrenadante foi coletado e analisado para determinação da DQO_5 .

4.2.3. Determinação da Eficiência do Processo

Para avaliar o desempenho do SBRIA, foram analisados parâmetros de eficiência. Entre eles, a eficiência de nitrificação e desnitrificação, que reflete os processos biológicos de conversão dos compostos nitrogenados considerando a parte orgânica (amonificação), bem como as eficiências de remoção da DQO total e da DQO sedimentada, que indicam a capacidade do sistema de degradar matéria orgânica. Os cálculos dessas eficiências foram realizados de acordo com as Equações (5), (6), (7) e (8), respectivamente. Esses parâmetros fornecem uma compreensão abrangente da eficácia operacional do reator, especialmente no que se refere à remoção de nitrogênio e matéria orgânica sob as condições aplicadas.

$$NT (\%) = \frac{[\text{NTK} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{N} - \text{NO}_3^- - \text{N}]_{\text{afluente}} - [[\text{NTK} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}]_{\text{efluente}}]}{[\text{NTK} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}]_{\text{afluente}}} \quad (5)$$

$$\text{Nitrificação} (\%) = \frac{[\text{NTK}]_{\text{afluente}} - [\text{NTK}]_{\text{efluente}}}{[\text{NTK}]_{\text{afluente}}} \quad (6)$$

$$\text{Desnitrificação} (\%) = \frac{[\text{NTK} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}]_{\text{afluente}} - [[\text{NTK} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}]_{\text{efluente}}]}{[\text{NTK} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}]_{\text{afluente}} - [\text{NTK}]_{\text{efluente}}} \quad (7)$$

$$\text{DQO} (\%) = \frac{[\text{DQO}]_{\text{afluente}} - [\text{DQO}]_{\text{efluente}}}{[\text{DQO}]_{\text{afluente}}} \quad (8)$$

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Caracterização do afluente

O SBRIA foi alimentado com esgoto sanitário da estação de tratamento de esgoto (ETE-Bortolan) captado após o tratamento preliminar, que incluía uma peneira rotativa de 2 mm, duas caixas de areia e um medidor Parshall. Foram identificadas contribuições de efluentes industriais no esgoto sanitário, indicado por variações significativas nos parâmetros do afluente, conforme demonstrado na **Tabela 2**, baseado nas análises físico-químicas realizadas.

Tabela 2: Concentrações médias, máximas e mínimas do afluente.

Parâmetros	Concentração (mg.L ⁻¹)		
	Média ^(n° de amostras)	Máxima	Mínima
Demanda Química de Oxigênio Total (DQO _T)	584,6±250,0 ⁽⁸²⁾	1.122,0	71,0
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	387,9±247,4 ⁽¹⁵⁾	884,4	99,4
Alcalinidade	360,6±177,0 ⁽⁷⁴⁾	888	106
pH	6,80±1,1 ⁽⁸²⁾	10,52	5,85
Nitrogênio Amoniacal (NH ₄ ⁺ -N)	27,3±15,3 ⁽⁸²⁾	94,5	6,4
Nitrito (NO ₂ ⁻ -N)	0,3±0,5 ⁽⁸²⁾	3,0	0,0
Nitrato (NO ₃ ⁻ -N)	1,9±4,0 ⁽⁸²⁾	19,8	0,0
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	38,7±35,9 ⁽⁸²⁾	204,4	10,4
Nitrogênio Total (NT)	40,9±32,0 ⁽⁸²⁾	204,9	11,6
Sólidos Totais (ST)	643,8±325,5 ⁽¹⁴⁾	1530	270
Sólidos Totais Voláteis (STV)	426,2±268,2 ⁽¹⁴⁾	1230	150
Sólidos Totais Fixos (STF)	217,6±81,9 ⁽¹⁴⁾	370	230

Fonte: Autor, 2025.

As concentrações máximas e mínimas observadas no afluente do SBRIA (**Tabela 2**) apresentam grande variação quando comparadas às faixas típicas do esgoto sanitário (**Tabela 3**), principalmente

em relação aos parâmetros de DBO, DQO, pH, alcalinidade, nitrogênio amoniacal e nitrogênio total, o que indica que o afluente tratado pelo SBRIA, em diversos momentos, apresentou contribuição de efluentes industriais. A composição média do esgoto sanitário está indicada na (**Tabela 3**), com as faixas e valores típicos dos principais parâmetros.

Tabela 3: Características físico-químicas dos esgotos sanitários.

Parâmetro	Unidade	Faixa	Típico
DQO	mg/L	450-800	600
DBO	mg/L	250-400	300
Sólidos Totais	mg/L	700-1.350	1.100
pH	-	6,7-8,0	7,0
Alcalinidade	mgCaCO ₃ /L	100-250	200
Nitrogênio Amoniacal	mgNH ₃ -N/L	20-35	25
Nitrogênio Total	mgN/L	35-60	45

Fonte: Von Sperling, 2017.

4.3.2. Eficiência Operacional do SBRIA

O desempenho do sistema SBRIA foi avaliado com base em sua eficiência na remoção de matéria orgânica e compostos nitrogenados, além de sua estabilidade operacional. Os resultados (**Tabela 4**) destacam sua robustez e adaptabilidade no tratamento de esgoto doméstico com contribuições industriais, caracterizado por alta variabilidade. A eficiência de remoção de DQO, de nitrogênio e a manutenção do pH dentro da faixa neutra, demonstram a capacidade do reator de lidar com variações nas características do afluente, mantendo alta eficiência de tratamento. Esses resultados reforçam o potencial do reator para aplicações práticas e incentivam investigações adicionais sobre seu desempenho a longo prazo e escalabilidade.

Tabela 4: Resultados da análise operacional do reator SBRIA (valores médios).

Parâmetros	Afluente (mg.L⁻¹)	Efluente (mg.L⁻¹)	Eficiência de Remoção (%)
Demanda Química de Oxigênio Total (DQO _T)	584,6±250,0	291,0±194,0	50±28

Parâmetros	Afluente (mg.L⁻¹)	Efluente (mg.L⁻¹)	Eficiência de Remoção (%)
Demanda Química de Oxigênio Sedimentada (DQOs)	584,6±250,0	75,5±68,1	87±16
Alcalinidade	360,6±177,0	166,8±79,8	-
pH	6,80±1,1	7,71±0,70	-
Nitrogênio Amoniacal (NH ₄ ⁺ -N)	26,8±13,5	7,9±6,5	69±22
Nitrito (NO ₂ ⁻ -N)	0,3±0,5	0,7±1,2	-
Nitrato (NO ₃ ⁻ -N)	1,9±4,0	3,0±6,1	-
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	38,7±35,9	19,7±10,8	62±22
Nitrogênio Total (NT)	40,9±32,0	15,4±11,9	54±20
Sólidos Totais (ST)	607,8±187,4	483,8±128,8	-
Sólidos Totais Voláteis (STV)	426,2±268,2	270,5±90,0	-
Sólidos Totais Fixos (STF)	217,6±81,9	212,3±62,8	-

Fonte: Autor, 2025.

A eficiência média de remoção de nitrogênio total (NT) atingiu 54±20% (**Figura 2**), valor consistente com os resultados encontrados por Barbosa et al. (2024). No entanto, a maior variabilidade observada

no afluente, provavelmente influenciada por contribuições industriais, evidencia os desafios de tratar esgoto misto para atender aos padrões regulatórios. Efluentes industriais frequentemente apresentam composições complexas e variáveis que podem introduzir compostos tóxicos, inibir a atividade microbiana e reduzir a eficiência dos processos de nitrificação (Dutta et al., 2021), limitando assim a remoção de NT.

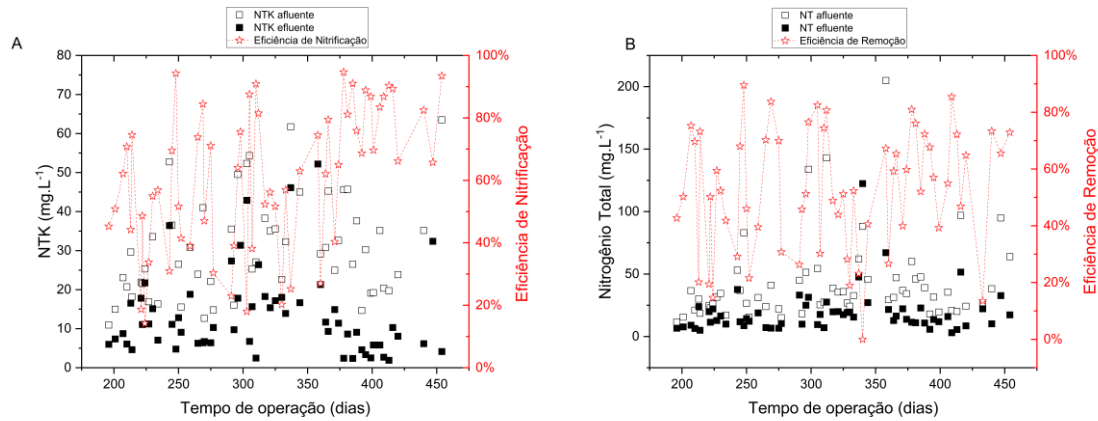


Figura 2: Desempenho operacional do SBRIA (a) nitrificação (b) remoção de nitrogênio total. Os símbolos representam: (□) afluente, (■) efluente.

Fonte: Autor, 2025.

Nesse estudo, a eficiência de nitrificação apresentou valor médio de $62 \pm 20\%$, inferior às eficiências relatadas por Barbosa et al. (2024) e em estudos de bancada com reatores SBRIA (Moura et al., 2018; Oliveira et al., 2022; Santos et al., 2016), nos quais os valores geralmente ultrapassaram 80%. Variações nas características do afluente, como a concentração de nitrogênio e a presença de compostos inibidores de origem industrial não analisados no experimento, possivelmente contribuíram para a redução da eficiência de nitrificação observada. A inibição da nitrificação devido à influência de efluentes industriais também foi relatada por Paśmionka e Gospodarek (2022). Bassin et al. (2011) investigaram a nitrificação de esgoto doméstico misturado com efluente de uma indústria química em reatores de leito móvel em escala laboratorial e constataram que substâncias residuais presentes no efluente industrial tratado inibiram fortemente o processo de nitrificação. No entanto, ao otimizar as condições para a adaptação dos microrganismos nitrificantes, incluindo um longo período operacional para facilitar a aclimação sob condições estressantes e inibitórias, foi possível alcançar eficiência de nitrificação superior a 90%. Essa discrepância evidencia os desafios de tratar efluentes reais, devido à complexidade do processo de tratamento. O controle preciso dos parâmetros operacionais é essencial para manter um desempenho eficiente de nitrificação, especialmente ao tratar esgoto doméstico com contribuições industriais. A adoção de estratégias operacionais avançadas, como a incorporação de sistemas de monitoramento em tempo real, a otimização do tempo de detenção hidráulica (TDH) e do tempo de aeração, além da implementação de estratégias de controles do processo que permitam gerenciar a variabilidade do afluente, podem ajudar a mitigar esses desafios e melhorar a eficiência da nitrificação em sistemas em escala piloto.

As taxas de desnitrificação nesse sistema foram eficientes, com valores de $85 \pm 15\%$, assim como foi observado em outros estudos (Moura et al., 2018; Oliveira et al., 2022; Santos et al., 2016), confirmando que o processo de nitrificação foi o fator limitante para a remoção de nitrogênio total (**Figura 3**). Não foi observado acúmulo de nitrito e nitrato, indicando redução eficiente do nitrogênio. A elevada concentração de DQO observada no afluente, atribuída às contribuições industriais, provavelmente favoreceu a desnitrificação, ao mesmo tempo que pode ter inibido a nitrificação. A

matéria orgânica promove a rápida proliferação de bactérias heterotróficas, que competem com os microrganismos nitrificantes pelo oxigênio dissolvido, reduzindo assim sua atividade e, conseqüentemente, a eficiência do processo de nitrificação (Zhang e Yang, 2025). Isso enfatiza a necessidade de um controle cuidadoso dos parâmetros operacionais, como a aeração e o tempo de detenção hidráulica (TDH), para equilibrar os processos de nitrificação e desnitrificação. Um gerenciamento adequado desses parâmetros pode garantir altas taxas de remoção de nitrogênio total, mesmo diante de variações na composição do afluente.

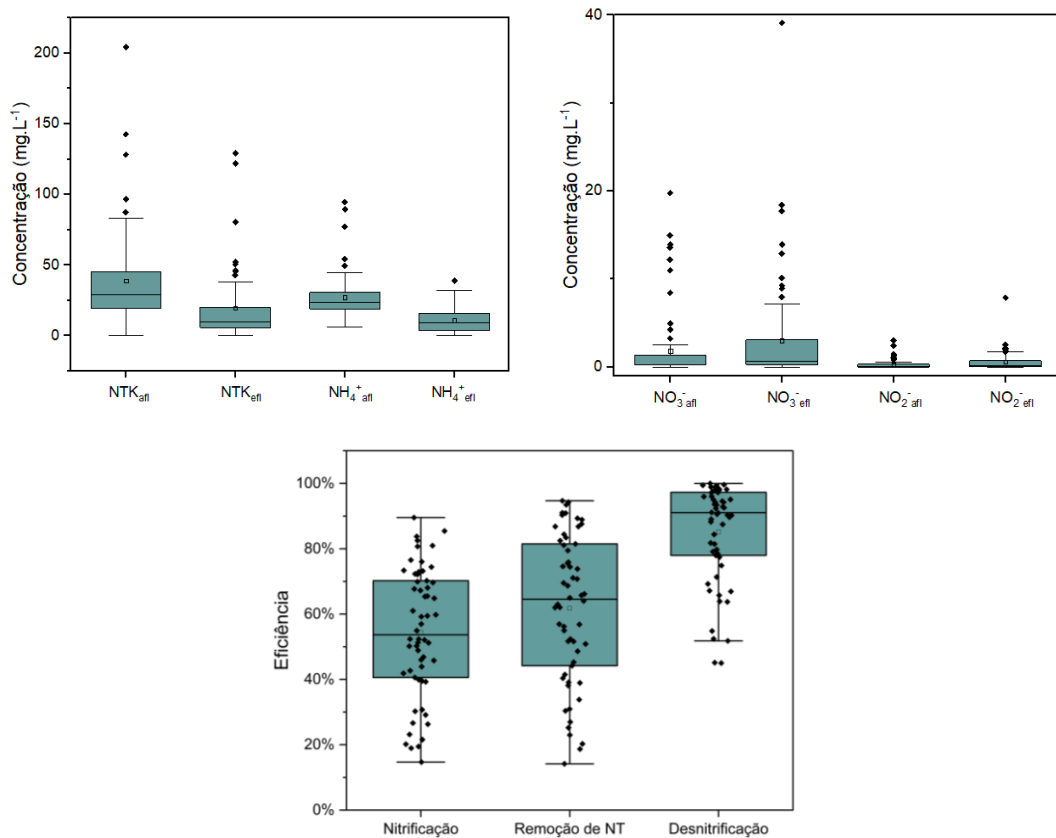


Figura 3: Boxplots das concentrações de formas de nitrogênio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) e desempenho da nitrificação, desnitrificação e remoção total de nitrogênio no SBRIA.

Fonte: Autor, 2025.

A remoção da DQO no reator SBRIA também foi afetada por variações causadas pelas contribuições industriais, que levaram a uma alta variabilidade nas características do afluente. Essas oscilações provavelmente introduziram compostos tóxicos que comprometeram a comunidade microbiana, enfraquecendo sua estabilidade e acarretando na liberação de sólidos no efluente. Isso resultou em eficiências de remoção de DQO total de $50\pm 28\%$. A estabilidade dos biofilmes depende da diversidade e abundância das comunidades microbianas, bem como da disponibilidade de nutrientes, oxigênio e condições ambientais favoráveis. No entanto, a descarga de efluentes industriais em estações de tratamento de esgoto, frequentemente contendo substâncias tóxicas, como metais pesados e poluentes orgânicos complexos, pode afetar negativamente o ecossistema do biofilme. Esses poluentes podem inibir o crescimento e a atividade de microrganismos específicos, reduzir a diversidade microbiana e interromper a troca de nutrientes e os processos metabólicos (Maurya et al., 2023), levando, por fim, à desintegração ou liberação de células. Essa desintegração da biomassa microbiana contribuiu para a liberação de sólidos no efluente (**Tabela 4**), reduzindo assim a eficiência geral do tratamento do

sistema. Pesquisas adicionais são necessárias para desenvolver estratégias que aprimorem a estabilidade das comunidades microbianas, especialmente em resposta aos desafios impostos pela variabilidade do afluente com contribuições industriais.

4.3.3. Avaliação do Desempenho do SBRIA com Unidade de Sedimentação

O uso de uma unidade de sedimentação pode ser eficaz para melhorar a eficiência de remoção da DQO, aumentando-a de $50\pm 28\%$ para $87\pm 16\%$ (Figura 4). Essa melhoria resulta da redução de sólidos suspensos, conforme indicado pela menor concentração de DQO no efluente após a sedimentação (DQO_s), que apresentou uma média de $75,5\pm 68,1 \text{ mg.L}^{-1}$ (Tabela 4). Esses dados sugerem que, embora a ampliação do sistema possa exigir adaptações no processo de tratamento, ainda é possível obter resultados comparáveis aos observados em escala de bancada. Além disso, considerando a variabilidade do efluente, o uso de uma unidade de sedimentação após o SBRIA pode acarretar uma melhora na estabilidade do sistema, o que é crucial para atender às regulamentações de lançamento em corpos receptores. Essa melhoria é consistente com os resultados encontrados em estudos anteriores com modelos similares de reatores (Moura et al., 2012; Oliveira et al., 2022; Santos et al., 2016), enfatizando o papel essencial da sedimentação na otimização da eficiência do tratamento.

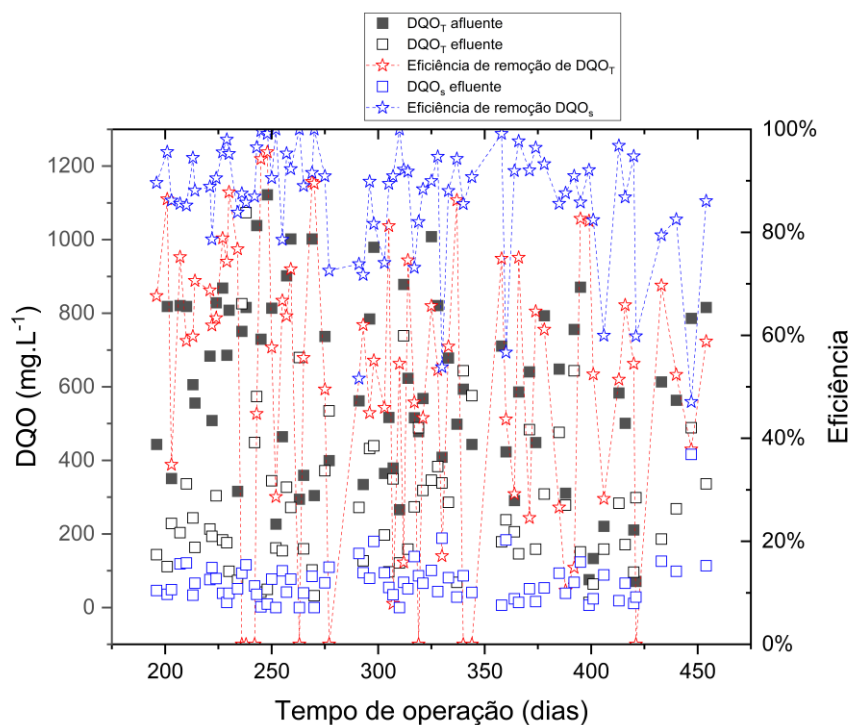


Figura 4: Desempenho na remoção de DQO total (preto) e DQO sedimentada (azul). Os símbolos representam: (□) concentração no afluente, (■) concentração no efluente, com a eficiência de remoção indicada pelas linhas vermelha e azul.

Fonte: Autor, 2025.

O nitrogênio total no efluente após a retenção de sólidos na unidade de sedimentação foi estimado assumindo que cada mg de DQO particulada (DQO_p) corresponde a $0,087 \text{ mg}$ de nitrogênio (Barbosa et al., 2024). Considerando que a DQO_p retida na unidade de sedimentação foi de $173\pm 136 \text{ mg.L}^{-1}$, calculou-se uma estimativa de $15,1\pm 11,8 \text{ mg.L}^{-1}$ para o nitrogênio total retido. Isso resultou em um aumento significativo na eficiência de remoção de nitrogênio total, passando de $54\pm 20\%$ para $81\pm 25\%$

no sistema, dado que a concentração de NT no efluente foi de $22,8 \pm 11,9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Esse valor estimado é próximo aos relatados em estudos anteriores de bancada (Correa et al., 2018; Moura et al., 2018; Oliveira et al., 2022; Santos et al., 2016; Wosiack et al., 2015) e indica o potencial de se alcançar altas eficiências na remoção de nitrogênio em escala piloto.

Os Sólidos Totais no efluente do SBRIA são inferiores aos observados em tanques de aeração de sistemas de lodos ativados (Barbosa et al., 2024), mas os valores mais elevados de ST no efluente ($483,8 \pm 128,8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) e de Sólidos Totais Voláteis ($270,5 \pm 90,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), em comparação com os valores da literatura (Cicekalan et al., 2023; Oliveira et al., 2022; Santos et al., 2016), evidenciam a necessidade de uma unidade de sedimentação para atender aos padrões de lançamento, como também relatado por Barbosa et al. (2024). No entanto, é importante enfatizar que a necessidade de clarificadores menores também resultará na redução dos custos operacionais em comparação aos processos convencionais. Ajustes em escala piloto serão necessários para otimizar ainda mais o processo e alcançar a qualidade desejada do efluente, mantendo a viabilidade econômica do sistema.

4.3.4. Monitoramento do pH e da Alcalinidade na Operação do SBRIA

O pH no reator permaneceu estável ao longo da operação, sem sinais de acidificação e sem necessidade de adição de agentes alcalinizantes, conforme também observado por Barbosa et al. (2024) (**Tabela 4**), destacando a confiabilidade e o potencial do sistema SBRIA. Para compreender melhor os processos que ocorreram no reator, a alcalinidade teórica do efluente foi calculada e comparada com a alcalinidade média medida. Assumiu-se que a nitrificação autotrófica consome $7,14 \text{ mg}$ de alcalinidade (como CaCO_3) por mg de NTK oxidado, enquanto a amonificação do nitrogênio orgânico e a desnitrificação heterotrófica, consideradas individualmente, geram $3,57 \text{ mg}$ de alcalinidade (como CaCO_3) (Moura et al., 2018).

Observou-se um desequilíbrio na alcalinidade, com a alcalinidade medida no efluente sendo de $166,8 \pm 79,8 \text{ mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, significativamente inferior ao valor teórico esperado de $348,4 \pm 52,9 \text{ mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ com base na estequiometria. Essa discrepância sugere a participação de vias não convencionais de remoção de nitrogênio, como o processo anammox, que já foi identificado em outros estudos (Moura et al., 2018; Santos et al., 2016).

A possível participação do processo anammox é fundamentada por sua capacidade de oxidar simultaneamente amônia e reduzir nitrito em condições anóxicas ou de baixa concentração de oxigênio (Adams et al., 2024), processos que provavelmente são facilitados pelos microambientes dentro do biofilme. Esses microambientes, caracterizados por gradientes de OD e substratos, criam condições favoráveis para as bactérias anammox, mesmo dentro de sistemas projetados para a nitrificação e desnitrificação convencionais (Moura et al., 2018). Isso destaca a versatilidade do SBRIA em suportar comunidades microbianas diversificadas e aprimorar a eficiência da remoção de nitrogênio por meio de vias complementares.

4.3.5. Perfil Temporal da Operação do SBRIA

O perfil temporal do reator durante o ciclo de 3 horas (2 horas com aeração, 1 hora sem aeração) foi avaliado para compreender a variação dos parâmetros ao longo do tempo do ciclo (**Figura 5**). Os dados são referentes ao efluente tratado, pois o objetivo era avaliar o efeito da aeração intermitente nas composições do nitrito, nitrato e amônia, e não a eficiência de remoção. Neste dia, os valores de entrada foram referentes aos valores médios medidos nas etapas anteriores.

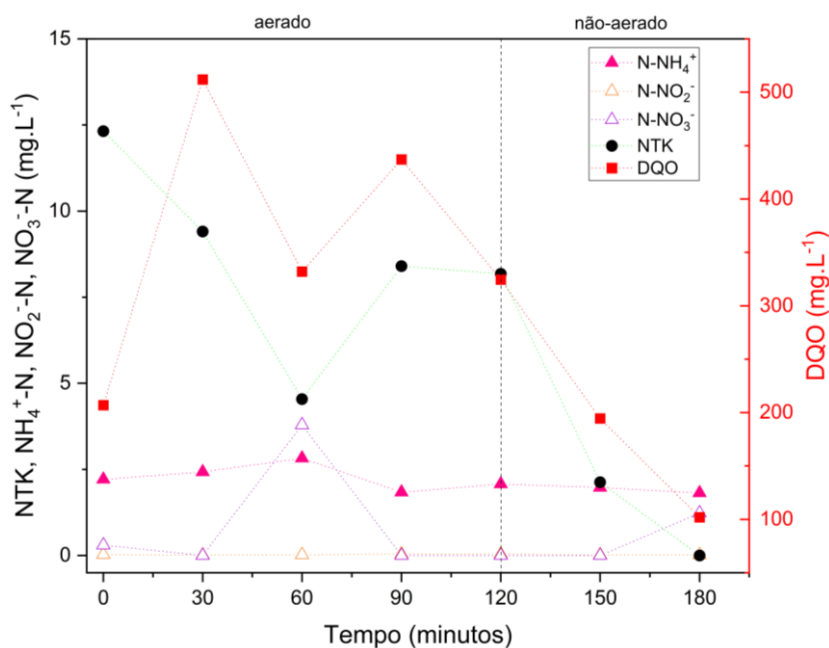


Figura 5: Perfil temporal do SBRIA durante o ciclo de 3 horas (2 horas aeradas e 1 hora não aerada).

Fonte: Autor, 2025.

Os resultados indicaram variações consideráveis na DQO total, principalmente atribuídas à liberação de sólidos durante a fase de aeração. Essa liberação de sólidos provavelmente contribuiu para o aumento da matéria orgânica detectada no efluente, algo que não ocorreu durante o período não aerado (120 a 180 minutos do perfil).

Contudo, os demais parâmetros monitorados apresentaram tendências relativamente estáveis ao longo do ciclo, refletindo a capacidade do sistema de manter um desempenho consistente sob as condições operacionais. Notavelmente, as concentrações de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato permaneceram estáveis, indicando que o ciclo de aeração e a vazão de aeração permitiram a ocorrência do processo de nitrificação e desnitrificação simultânea (NDS). Essa estabilidade sugere uma remoção eficiente de nitrogênio, minimizando o acúmulo indesejado de intermediários, como nitrito ou nitrato. Do mesmo modo, não foram observados picos nas concentrações de nitrato e nitrogênio amoniacal ao final dos períodos com aeração e sem, respectivamente, o que condiz com o observado por Moura et al. (2018). De acordo com esse estudo, os microrganismos nitrificantes crescem aderidos predominantemente na camada externa do meio suporte, onde o oxigênio dissolvido está disponível em concentrações mais altas. Em contrapartida, na camada interna, onde concentrações mais baixas de OD são observadas, a atividade das desnitrificantes e potencialmente de bactérias anammox é favorecida. Essa estratificação do biofilme permite a ocorrência simultânea dos processos de nitrificação e desnitrificação, mesmo durante os ciclos aerados, reforçando a estabilidade observada nas espécies nitrogenadas.

Foram observadas pequenas variações no NTK e no NT, também associadas à liberação de sólidos no efluente durante a aeração. A estratégia de aeração controlada parece ter sido fundamental para proporcionar um ambiente favorável às comunidades microbianas responsáveis pela nitrificação e desnitrificação simultâneas, mantendo baixa variabilidade nas principais espécies nitrogenadas.

Por fim, esses resultados destacam a importância dos parâmetros de aeração na garantia da estabilidade operacional do SBRIA, especialmente na prevenção da liberação excessiva de sólidos e na

manutenção de baixa variabilidade nos principais indicadores do processo. Estudos futuros podem explorar a otimização adicional da intensidade e duração da aeração para minimizar a liberação de sólidos, ao mesmo tempo em que aumentam a eficiência da remoção de DQO. Além disso, a investigação da dinâmica microbiana durante diferentes fases do ciclo pode fornecer resultados mais profundos sobre os mecanismos que impulsionam a estabilidade e as variações observadas.

4.3.6. Influência da Sazonalidade na Eficiência do Reator

Para analisar a influência da sazonalidade no desempenho do reator, os resultados foram divididos em dois períodos, seco (entre abril e setembro) e chuvoso (entre outubro e março). Foram realizadas 63 análises no período seco e 19 no período chuvoso.

A **Figura 6** apresenta o gráfico boxplot que ilustra a distribuição das concentrações de NTK no afluente e efluente do reator para os dois períodos. No período seco as concentrações afluentes foram superiores às registradas no período chuvoso, provavelmente devido à diluição que ocorre em decorrência da infiltração de águas pluviais na rede coletora. No período chuvoso as concentrações efluentes foram inferiores e mais estáveis em comparação com o período seco, o que pode ser um indício de que a diluição do afluente no período chuvoso causou uma diminuição na concentração de compostos inibidores de origem industrial nos processos biológicos de remoção de nitrogênio que ocorrem no reator.

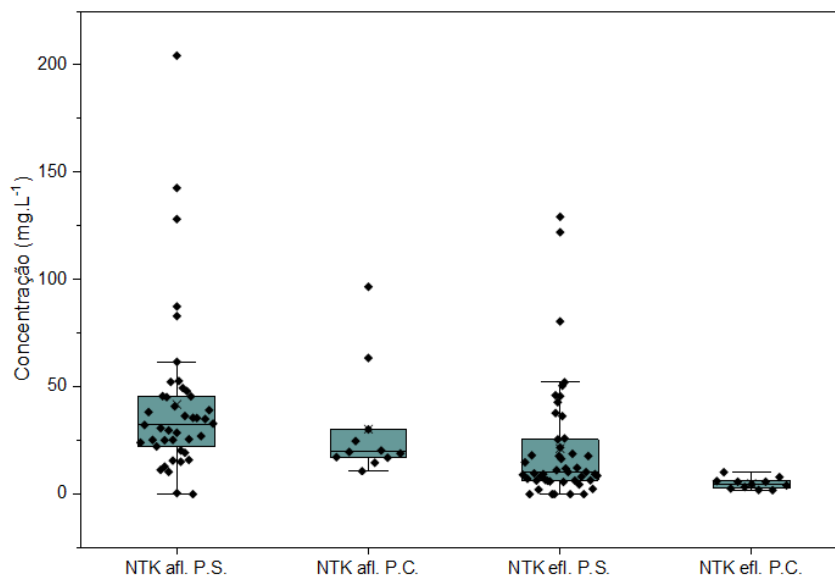


Figura 6: Concentração de NTK afluente e efluente no período seco (P.S.) e no período chuvoso (P.C.).

Fonte: Autor, 2025.

A **Figura 7** apresenta o gráfico boxplot para as concentrações de DQO no afluente e efluente no reator para os dois períodos. A distribuição dos resultados indica que, da mesma forma observada na remoção de nitrogênio, a concentração efluente ao reator apresentou maior estabilidade no período chuvoso, o que pode estar relacionado à diluição de compostos inibidores de origem industrial.

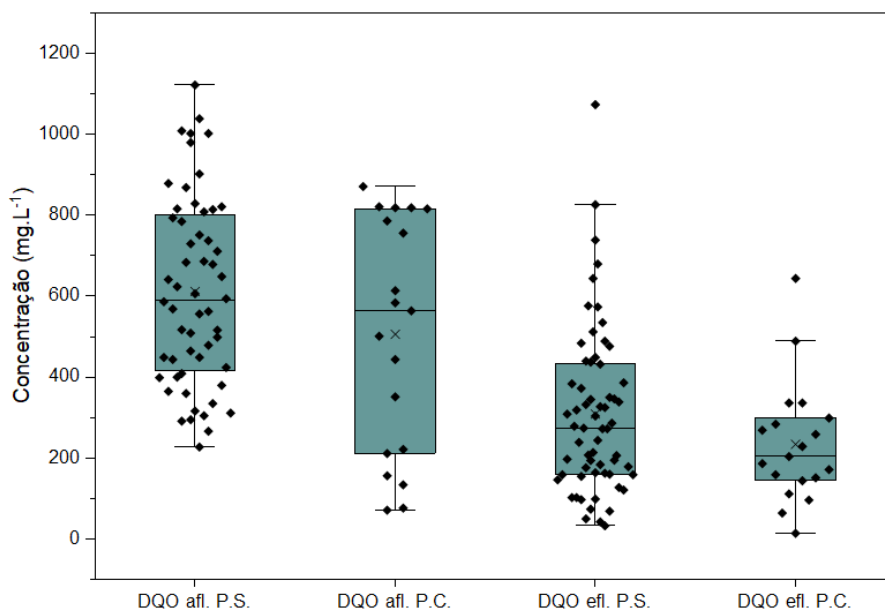


Figura 7: Concentração de DQO afluente e efluente no período seco (P.S.) e no período chuvoso (P.C.).

Fonte: Autor, 2025.

4.3.7. Implicações Práticas e Perspectivas Futuras do SBRIA para o Tratamento de Esgoto Doméstico com Contribuições Industriais

As aplicações do SBRIA vão além do tratamento de esgoto doméstico (Barbosa et al., 2024; Moura et al., 2018; Oliveira et al., 2022; Santos et al., 2016) e abrangem diversas áreas, como o tratamento de efluentes de indústrias de alimentos para animais (Almeida et al., 2018; Wosiack et al., 2015), a produção de bio-hidrogênio via fermentação escura (Blanco et al., 2019) e o tratamento de vinhaça de cana-de-açúcar (Aquino et al., 2017). Essas diferentes aplicações ressaltam a versatilidade e o potencial desse biorreator para implementação em larga escala para diversos efluentes industriais.

No Brasil, despejos ilegais em estações de tratamento de esgoto comprometem a estabilidade do processo de NDS, destacando a necessidade de sistemas robustos e capazes de suportar uma comunidade microbiana diversificada. Essa capacidade é fundamental para manter um tratamento eficaz mesmo sob condições desafiadoras e para avançar além dos processos convencionais (Oliveira et al., 2023). O potencial do SBRIA para a remoção de antibióticos de esgoto doméstico, conforme relatado por Carneiro et al. (2019), reforça ainda mais sua viabilidade como uma tecnologia eficaz e adaptável para o tratamento de efluentes no Brasil. Isso evidencia a importância de ampliar as pesquisas sobre esse biorreator, não apenas para atender aos padrões de lançamento, mas também para lidar com poluentes emergentes que representam riscos à saúde pública e muitas vezes não são tratados em estações convencionais.

Portanto, os benefícios da configuração SBRIA vão além da redução de custos, oferecendo vantagens significativas na melhoria do desempenho do tratamento de efluentes. No entanto, para que sua aplicação tecnológica seja plenamente alcançada em escala industrial, pesquisas adicionais são essenciais para otimizar os parâmetros operacionais e aprofundar a compreensão das comunidades microbianas que impulsionam o desempenho do biorreator. Estudos em escala piloto são

particularmente importantes para validar a viabilidade prática do sistema SBRIA e sua capacidade de tratar diferentes tipos de efluentes, garantindo um tratamento sustentável e eficaz em larga escala.

4.4. Conclusões

O processo de nitrificação e desnitrificação simultânea ocorreu de maneira eficiente no SBRIA para o tratamento de esgoto doméstico com contribuições industriais, apesar da instabilidade causada pela alta variabilidade do afluente. Todavia, o sistema demonstrou capacidade de adaptação a essas variações. A presença de sólidos no efluente contribuiu para a redução da eficiência de remoção de DQO e NT. O uso de uma unidade de sedimentação menor do que as utilizadas em processos convencionais pode melhorar esses parâmetros e facilitar a conformidade com as normas regulatórias.

O desequilíbrio observado na alcalinidade, com um consumo maior do que o esperado, sugeriu a participação de processos não convencionais na remoção de nitrogênio. Contudo, não foram detectados sinais de acidificação ou necessidade de agentes alcalinizantes, demonstrando a estabilidade do sistema.

Esses resultados destacam o potencial do SBRIA como uma solução flexível e eficiente para o tratamento de efluentes. O sucesso da operação em escala piloto representa um avanço para sua aplicação em larga escala. Pesquisas adicionais são necessárias para otimização dos parâmetros operacionais e melhor compreensão da dinâmica das comunidades microbianas, garantindo a escalabilidade e a eficácia do sistema em condições reais de operação.

4.5. Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Carbofibras e ao Departamento Municipal de Água e Esgoto de Poços de Caldas (DMAE) pelo apoio prestado.

Referências

Adams, M., Issaka, E., Chen, C., 2024. Anammox-based technologies: A review of recent advances, mechanism, and bottlenecks. *J Environ Sci (China)* 148, 151–173. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.01.015>

Almeida, R.G.B. de, Santos, C.E.D. dos, Lüders, T.C., Del Nery, V., Leal, C.D., Pereira, A.D., Araújo, J.C., Davenport, R.J., Barana, A.C., Lopes, D.D., Damianovic, M.H.R.Z., 2018. Nitrogen removal by simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) in a structured-bed reactor treating animal feed processing wastewater: Inhibitory effects and bacterial community. *Int Biodeterior Biodegradation* 133, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.06.019>

Barbosa, T.A., Giordani, A., de Moura, R.B., 2024. A pilot-scale study of a novel system for simultaneous nitrogen and carbon removal: technological advancement of a structured bed reactor with intermittent aeration (SBRIA) in real domestic sewage treatment. *Environmental Science and Pollution Research* 31, 12591–12596. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31675-2>

Bassin, J.P., Dezotti, M., Sant’Anna, G.L., 2011. Nitrification of industrial and domestic saline wastewaters in moving bed biofilm reactor and sequencing batch reactor. *J Hazard Mater* 185, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.024>

- Blanco, V.M.C., Oliveira, G.H.D., Zaiat, M., 2019. Dark fermentative biohydrogen production from synthetic cheese whey in an anaerobic structured-bed reactor: Performance evaluation and kinetic modeling. *Renew Energy* 139, 1310–1319. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.029>
- Carneiro, R.B., Sabatini, C.A., Santos-Neto, Á.J., Zaiat, M., 2019. Feasibility of anaerobic packed and structured-bed reactors for sulfamethoxazole and ciprofloxacin removal from domestic sewage. *Science of the Total Environment* 678, 419–429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.437>
- Cho, K.H., Kim, J.O., Kang, S., Park, H., Kim, S., Kim, Y.M., 2014. Achieving enhanced nitrification in communities of nitrifying bacteria in full-scale wastewater treatment plants via optimal temperature and pH. *Sep Purif Technol* 132, 697–703. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.06.027>
- Cicekalan, B., Kosar, S., Cingoz, S., Eyit, N., Ersahin, M.E., Ozgun, H., 2023. Techno-economic and environmental assessment of different municipal wastewater treatment systems. *Journal of Water Process Engineering* 53. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103822>
- Correa, C.Z., Prates, K.V.M.C., de Oliveira, E.F., Lopes, D.D., Barana, A.C., 2018. Nitrification/denitrification of real municipal wastewater in an intermittently aerated structured bed reactor. *Journal of Water Process Engineering* 23, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.03.013>
- de Aquino, S., Fuess, L.T., Pires, E.C., 2017. Media arrangement impacts cell growth in anaerobic fixed-bed reactors treating sugarcane vinasse: Structured vs. randomic biomass immobilization. *Bioresour Technol* 235, 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.120>
- Di Capua, F., Iannacone, F., Sabba, F., Esposito, G., 2022. Simultaneous nitrification–denitrification in biofilm systems for wastewater treatment: Key factors, potential routes, and engineered applications. *Bioresour Technol*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127702>
- Dutta, D., Arya, S., Kumar, S., 2021. Industrial wastewater treatment: Current trends, bottlenecks, and best practices. *Chemosphere* 285, 131245. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131245>
- Liu, X., Kim, M., Nakhla, G., Andalib, M., Fang, Y., 2020. Partial nitrification-reactor configurations, and operational conditions: Performance analysis. *J Environ Chem Eng* 8. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103984>
- Maurya, A., Kumar, R., Raj, A., 2023. Biofilm-based technology for industrial wastewater treatment: current technology, applications and future perspectives. *World J Microbiol Biotechnol*. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03567-7>
- Moura, R.B., Damianovic, M.H.R.Z., Foresti, E., 2012. Nitrogen and carbon removal from synthetic wastewater in a vertical structured-bed reactor under intermittent aeration. *J Environ Manage* 98, 163–167. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.009>
- Moura, R.B., Santos, C.E.D., Okada, D.Y., Martins, T.H., Ferraz Júnior, A.D.N., Damianovic, M.H.R.Z., Foresti, E., 2018. Carbon-nitrogen removal in a structured-bed reactor (SBRRIA) treating sewage: Operating conditions and metabolic perspectives. *J Environ Manage* 224, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.014>
- Oliveira, E.P., de Souza, T.S.O., Okada, D.Y., Damasceno, L.H.S., Salustiano, R.E., de Moura, R.B., 2022. Optimization of airflow and aeration cycles in a new structured bed reactor configuration for

carbon and nitrogen removal. *Environmental Technology (United Kingdom)* 43, 2540–2552. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1887370>

Paniguel Oliveira, E., Giordani, A., Kawanishi, J., Syrto Octavio de Souza, T., Okada, D.Y., Brucha, G., Brito de Moura, R., 2023. Biofilm stratification and autotrophic-heterotrophic interactions in a structured bed reactor (SBRIA) for carbon and nitrogen removal. *Bioresour Technol* 372. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128639>

Paśmionka, I.B., Gospodarek, J., 2022. Assessment of the Impact of Selected Industrial Wastewater on the Nitrification Process in Short-Term Tests. *Int J Environ Res Public Health* 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph19053014>

Santos, C.E.D., Moura, R.B., Damianovic, M.H.R.Z., Foresti, E., 2016. Influence of COD/N ratio and carbon source on nitrogen removal in a structured-bed reactor subjected to recirculation and intermittent aeration (SBRRIA). *J Environ Manage* 166, 519–524. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.054>

Von Sperling, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017.

Wosiack, P.A., Lopes, D.D., Rissato Zamariolli Damianovic, M.H., Foresti, E., Granato, D., Barana, A.C., 2015. Removal of COD and nitrogen from animal food plant wastewater in an intermittently-aerated structured-bed reactor. *J Environ Manage* 154, 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.026>

Zhang, T., Yang, H., 2025. Effect of organic matter on the expression of biochemical properties of partial nitrification immobilized filler and analysis of microbial communities. *Journal of Water Process Engineering* 69. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106654>

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a premente necessidade de adaptação dos sistemas de tratamento de esgoto para atendimento da legislação vigente em termos de remoção de nitrogênio, e para minimizar os impactos causados pelo excesso desses nutrientes nos corpos hídricos, a utilização do reator SBRIA vem como uma alternativa simplificada para a remoção de matéria orgânica e compostos nitrogenados simultaneamente em uma única unidade de tratamento.

Esse trabalho avaliou o desempenho de um SBRIA operando em escala piloto para remoção simultânea de matéria orgânica e nitrogênio. Durante os 258 dias de operação, o sistema alcançou uma eficiência de remoção de nitrogênio total de $54 \pm 20\%$, com nitrificação de $62 \pm 20\%$ e desnitrificação de $85 \pm 15\%$. O sistema também demonstrou remoção eficaz da matéria orgânica, com uma redução de $57 \pm 28\%$ na demanda química de oxigênio total (DQOT) e $87 \pm 16\%$ na DQO após sedimentação (DQOS), indicando sua eficácia na degradação da matéria orgânica, embora uma unidade de sedimentação possa ser necessária para otimizar a separação de sólidos. Além disso, o sistema não necessitou da adição de

alcalinizantes para o controle do pH., mantendo valores médios de $7,0 \pm 0,8$ para pH e $166,8 \pm 79,8$ mg L⁻¹ para alcalinidade.

O perfil temporal do reator apresentou tendências relativamente estáveis ao longo do ciclo de aeração, refletindo a capacidade do sistema de manter um desempenho consistente sob as condições operacionais. As concentrações de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato permaneceram estáveis, indicando que o ciclo de aeração e a vazão de aeração permitiram a ocorrência do processo de nitrificação e desnitrificação simultânea (NDS). Essa estabilidade sugere uma remoção eficiente de nitrogênio, minimizando o acúmulo indesejado de intermediários, como nitrito ou nitrato.

As concentrações máximas e mínimas observadas no afluente do SBRIA apresentaram grande variação quando comparadas às faixas típicas do esgoto sanitário, indicando a contribuição de efluentes industriais. Contudo, o reator demonstrou capacidade de suportar choques tóxicos, adaptando-se à alta variabilidade do afluente.

Com relação a influência da sazonalidade no desempenho do reator, no período seco as concentrações afluentes foram superiores às registradas no período chuvoso, provavelmente devido à diluição que ocorre em decorrência da infiltração de águas pluviais na rede coletora. No período chuvoso as concentrações efluentes foram inferiores e mais estáveis em comparação com o período seco, o que pode ser um indício de que a diluição do afluente no período chuvoso causou uma diminuição na concentração de compostos inibidores de origem industrial nos processos biológicos que ocorrem no reator.

Os resultados desse trabalho destacam o potencial do SBRIA como uma solução promissora e econômica para o tratamento de efluentes, demonstrando um potencial significativo para aplicações em larga escala na remoção simultânea de matéria orgânica e nitrogênio. O sucesso da operação em escala piloto representa um avanço para sua aplicação em larga escala. Pesquisas adicionais são necessárias para otimização dos parâmetros operacionais e melhor compreensão da dinâmica das comunidades microbianas, garantindo a escalabilidade e a eficácia do sistema em condições reais de operação.

REFERÊNCIAS

ADAMS, M.; ISSAKA, E.; CHEN, C. Anammox-based technologies: A review of recent advances, mechanism, and bottlenecks. **Journal of Environmental Science**, v. 148, p. 151–173, 2024.

ALMEIDA, R. G. B. *et al.* Nitrogen removal by simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) in a structured-bed reactor treating animal feed processing wastewater: Inhibitory effects and bacterial community. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 133, p. 108–115, 2018.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23^a edition. Washington, D.C. APHA. 2017.

BARBOSA, T. A.; GIORDANI, A.; MOURA, R. B. A pilot-scale study of a novel system for simultaneous nitrogen and carbon removal: technological advancement of a structured bed reactor with intermittent aeration (SBRIA) in real domestic sewage treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, p. 12591–12596, 2024.

BASSIN, J. P.; DEZOTTI, M.; SANT'ANNA, G. L. Nitrification of industrial and domestic saline wastewaters in moving bed biofilm reactor and sequencing batch reactor. **Journal of Hazardous Materials**, v. 185, p. 242–248, 2011.

BLANCO, V. M. C.; OLIVEIRA, G. H. D.; ZAIAT, M. Dark fermentative biohydrogen production from synthetic cheese whey in an anaerobic structured-bed reactor: Performance evaluation and kinetic modeling. **Renewable Energy**, v. 139, p. 1310–1319, 2019.

BRAGION, A. P. **Transporte e retenção de fósforo e nitrogênio em cursos de água receptores de efluentes: o caso da Estação de Tratamento de Esgoto Monjolinho em São Carlos (SP)**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. USP. 2023. 131p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA n° 357, de 17/03/2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA n° 430, de 13/05/2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

CARNEIRO, R. B. *et al.* Feasibility of anaerobic packed and structured-bed reactors for sulfamethoxazole and ciprofloxacin removal from domestic sewage. **Science of the Total Environment**, v. 678, p. 419–429, 2019.

CHEN, M. *et al.* Impact resistance of different factors on ammonia removal by heterotrophic nitrification–aerobic denitrification bacterium *Aeromonas* sp. HN-02. **Bioresource Technology**, v. 167, p. 456–461, 2014.

CHEN, Q.; NI, J. Heterotrophic nitrification–aerobic denitrification by novel isolated bacteria. **The Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 38, p. 1305-1310, 2011.

CHO, K. H. *et al.* Achieving enhanced nitrification in communities of nitrifying bacteria in full-scale wastewater treatment plants via optimal temperature and pH. **Separation and Purification Technology**, v. 132, p. 697–703, 2014.

CICEKALAN, B. *et al.* Techno-economic and environmental assessment of different municipal wastewater treatment systems. **Journal of Water Process Engineering**, v. 53, 2023.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG n° 8, de 21/11/2022**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

CORREA, C. Z. *et al.* Removal of organic matter and nitrogen from dairy effluents in a structured bed reactor operated with intermittent aeration. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, 2023.

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.

DE AQUINO, S.; FUESS, L. T.; PIRES, E. C. Media arrangement impacts cell growth in anaerobic fixed-bed reactors treating sugarcane vinasse: Structured vs. randomic biomass immobilization. **Bioresource Technology**, v. 235, p. 219–228, 2017.

DI CAPUA, F. *et al.* Simultaneous nitrification–denitrification in biofilm systems for wastewater treatment: Key factors, potential routes, and engineered applications. **Bioresource Technology**, 2022.

DUTTA, D.; ARYA, S.; KUMAR, S. Industrial wastewater treatment: Current trends, bottlenecks, and best practices. **Chemosphere**, v. 285, 131245, 2021.

GE, S. *et al.* Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: A review. **Chemosphere**, 2015.

JENZURA, N. T. *et al.* Prediction of total nitrogen removal in a structured bed reactor for secondary and tertiary treatment of sanitary sewage. **Desalination and Water Treatment**, v. 126, p. 144-150, 2018.

JI, B. *et al.* Aerobic Denitrification: A Review of Important Advances of the Last 30 Years. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 20, p. 643-651, 2015.

LEE, J. D. **Química inorgânica não tão concisa**. 1 ed. Soa Paulo: Editora Blucher, 1999.

LIU, X. *et al.* Partial nitrification-reactor configurations, and operational conditions: Performance analysis. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, 2020.

MA, B. *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances. **Bioresource Technology**, 2015a.

MA, B. *et al.* Suppressing nitrite-oxidizing bacteria growth to achieve nitrogen removal from domestic wastewater via anammox using intermittent aeration with low dissolved oxygen. **Scientific Reports**, 2015b.

MAURYA, A.; KUMAR, R.; RAJ, A. Biofilm-based technology for industrial wastewater treatment: current technology, applications and future perspectives. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, 2023.

MOURA, R. B. *et al.* Nitrogen and carbon removal from synthetic wastewater in a vertical structured-bed reactor under intermittent aeration. **Journal of Environmental Management**, v. 98, p. 163-167, 2012.

MOURA, R. B. *et al.* Carbon-nitrogen removal in a structured-bed reactor (SBRRIA) treating sewage: Operating conditions and metabolic perspectives. **Journal of Environmental Management**, v. 224, p. 19-28, 2018a.

MOURA, R. B. *et al.* Hydrodynamic characteristics of a structured bed reactor subjected to recirculation and intermittent aeration (SBRRIA). **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 35, p. 641-648, 2018b.

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. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, 2021.

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.

OLIVEIRA, E. P. *et al.* Optimization of airflow and aeration cycles in a new structured bed reactor configuration for carbon and nitrogen removal. **Environmental Technology**, v. 43, p. 2540–2552, 2022.

OLIVEIRA, J. G. B. **Reator de leito estruturado com aeração intermitente para tratamento combinado de esgoto sanitário e pós tratamento de efluentes de RALF**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Ponta Grossa. 2016. 69p.

PAŚMIONKA, I. B.; GOSPODAREK, J. Assessment of the Impact of Selected Industrial Wastewater on the Nitrification Process in Short-Term Tests. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, 2022.

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.

ROCHA, J. V. S. B. **Nitrificação heterotrófica e desnitrificação aeróbica para remoção de nitrogênio amoniacal em condições de alta salinidade.** Dissertação (Pós-Graduação). Universidade Federal de Viçosa. 2021. 51p.

SANTOS, C. E. D. *et al.* Influence of COD/N ratio and carbon source on nitrogen removal in a structured-bed reactor subjected to recirculation and intermittent aeration (SBRRIA). **Journal of Environmental Management**, v. 166, p. 519-524, 2016.

SILVEIRA, N. C. **Avaliação dos processos de nitrificação parcial e anammox para o tratamento de efluente de UASB de fábrica de ração animal.** Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. 2022. 145p.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto 2023.** Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis>> Acesso em: 26 mar. 2025.

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. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 97, p. 1436-1445, 2021.

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

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos.** 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

WOSIACK, P. A. *et al.* Removal of COD and nitrogen from animal food plant wastewater in an intermittently-aerated structured-bed reactor. **Journal of Environmental Management**, v. 154, p. 145–150, 2015.

ZHANG, F. *et al.* A novel simultaneous partial nitrification Anammox and denitrification (SNAD) with intermittent aeration for cost-effective nitrogen removal from mature landfill leachate. **Chemical Engineering Journal**, v. 313, p. 619-628, 2017.

ZHANG, T., YANG, H. Effect of organic matter on the expression of biochemical properties of partial nitrification immobilized filler and analysis of microbial communities. **Journal of Water Process Engineering**, v. 69, 2025.

ZHANG, Y. *et al.* Evaluation of simultaneous nitrification and denitrification under controlled conditions by an aerobic denitrifier culture. **Bioresource Technology**, v. 175, n. 3, p. 602–605, 2015.