

PARTIDA E AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE LODO EM REATOR AERÓBIO A PARTIR DE DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE CARBONO E NUTRIENTE

Ryan Douglas Alves ¹
João Paulo da Silva Siqueira ²

RESUMO

O tratamento de esgoto é um desafio crucial para a sustentabilidade ambiental, e a eficiência dos sistemas de lodo ativado é frequentemente limitada pela falta de nutrientes. Este estudo avalia o desempenho de um reator biológico aeróbio alimentado com efluente sanitário, focando na suplementação nutricional com formas específicas de carbono e nitrogênio. A pesquisa foi realizada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, onde foram monitorados diferentes reatores, incluindo um controle sem suplementação. Na Etapa I, o Reator 2, que recebeu 0,5% de carbono e nitrogênio, apresentou desempenho superior, com valores ideais de pH e uma comunidade biológica diversificada, resultando em sedimentação eficiente de sólidos. Em contraste, o reator controle demonstrou baixa atividade microbiológica, comprometendo a remoção de matéria orgânica e nutrientes. Na Etapa II, o Reator 2 foi validado em operação contínua, demonstrando estabilidade do pH, essencial para manter a atividade microbiológica. Durante as três bateladas realizadas, o sistema apresentou crescimento progressivo de sólidos sedimentáveis, alcançando 300 mL/L ao final da terceira batelada. Esses resultados indicam que a suplementação inicial de carbono e nitrogênio favoreceu a formação equilibrada de biomassa e melhorou a eficiência do tratamento. Em conclusão, a pesquisa destaca a importância da suplementação nutricional e indica a necessidade de aprofundar estudos sobre a eficiência e inovação em sistemas de tratamento de esgoto.

Palavras-chaves: Sólidos sedimentáveis; Suplementação nutricional; Tratamento de esgoto; Reatores aeróbios; Lodo ativado.

ABSTRACT

Sewage treatment is a crucial challenge for environmental sustainability, and the efficiency of activated sludge systems is often limited by the lack of nutrients. This study evaluates the performance of an aerobic biological reactor fed with sanitary effluent, focusing on nutritional supplementation with specific forms of carbon and nitrogen. The research was conducted at the Federal Institute of Education, Science, and Technology of Piauí, where different reactors were monitored, including a control without supplementation. In Stage I, Reactor 2, which received 0.5% carbon and nitrogen, showed superior performance, with ideal pH values and a diverse biological community, resulting in efficient solid sedimentation. In contrast, the control reactor demonstrated low microbiological activity, compromising the removal of organic matter and nutrients. In Stage II, Reactor 2 was validated in continuous operation, demonstrating pH stability, essential for maintaining microbiological activity. During the three batches carried out, the system showed progressive growth of settleable solids, reaching 300 mL/L by the end of the third batch. These results indicate that the initial supplementation of carbon and nitrogen favored the balanced formation of biomass and improved treatment efficiency. In conclusion, the research highlights the importance of nutritional supplementation and indicates the need for further studies on the efficiency and innovation in wastewater treatment systems.

Keywords: Sedimentable solids; Nutritional supplementation; Sewage treatment; Aerobic reactors; Activated sludge.

¹ Graduando em Tecnologia em Gestão Ambiental. IFPI. ryalvesdouglass@gmail.com

² Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos): área de concentração Saneamento Ambiental – Professor do – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí joao.siqueira@ifpi.edu.br

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento populacional e urbano exige a implementação urgente de soluções eficazes e sustentáveis para o tratamento de esgoto, especialmente em áreas com históricos déficits no acesso a serviços de saneamento. A análise dos serviços de esgotamento sanitário no Brasil, como destacam Pastre *et al.* (2023), revela a necessidade de um planejamento de políticas públicas mais eficazes e sustentáveis. Investimentos em pesquisas de longo prazo e na coleta de dados históricos são essenciais para garantir a eficácia dessas políticas, com o objetivo de melhorar as condições sanitárias e de saúde pública no país.

De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA, 2023), embora 97,9% dos municípios brasileiros possuam acesso a serviços de abastecimento de água, apenas 56% da população tem acesso a redes públicas de esgoto. Isso mostra que, apesar da cobertura de abastecimento de água ser ampla, o tratamento de esgoto permanece inadequado em muitos municípios. Preocupa ainda mais o fato de que apenas 52,2% do esgoto coletado no país é tratado. Este cenário resulta em impactos significativos para a saúde pública e o meio ambiente, especialmente devido ao lançamento de esgoto não tratado no meio ambiente.

A situação no município de Corrente (PI) exemplifica bem esse problema. De acordo com o SINISA (2022), apenas 14,54% da população tem acesso ao esgotamento sanitário, o que representa cerca de 3.967 habitantes. A cidade gera anualmente cerca de 866,74 mil metros cúbicos de esgoto, dos quais apenas 18,78% são coletados e tratados. Isso significa que aproximadamente 703,97 mil metros cúbicos de esgoto são lançados diretamente na natureza sem qualquer tratamento. Esse lançamento indevido de esgoto resulta em riscos significativos para a saúde pública e degradação ambiental. A situação é agravada pela forma precária de afastamento de esgoto, com 19,11% da população dependendo de fossas sépticas e 55,5% de fossas rudimentares ou buracos. Além disso, 3.145 habitantes não têm acesso a banheiros ou sanitários adequados.

Diante dessa realidade, torna-se essencial adotar soluções inovadoras para o tratamento de esgoto. As Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETARs) desempenham um papel fundamental nesse processo, ao utilizar uma combinação de métodos biológicos, físicos e químicos para garantir a remoção eficiente de contaminantes presentes nas águas residuais. Segundo Gusmão (2023), esses sistemas são capazes de purificar a água proveniente de diversas fontes, como descargas humanas, atividades industriais e outros serviços, visando minimizar os impactos ambientais e preservar o ecossistema local.

Entre as tecnologias emergentes que se destacam estão os reatores aeróbios, que se apresentam como uma alternativa promissora para o tratamento de esgoto. Esses sistemas permitem a remoção simultânea de carbono e nutrientes, otimizando a eficiência do processo de tratamento, como evidenciado por Begnini (2016) e Dos Santos (2007). A utilização de reatores de batelada sequenciais (RBS), que combinam reações biológicas com decantação, tem se mostrado eficaz na remoção de poluentes, reduzindo os custos operacionais e aumentando a sustentabilidade do processo.

Além disso, os sistemas de lodos ativados, amplamente utilizados no tratamento de águas residuárias, são altamente eficazes na remoção de compostos orgânicos e nutrientes como nitrogênio e fósforo. Esses sistemas, que formam uma biomassa floculenta composta por microrganismos heterotróficos e autotróficos, são capazes de metabolizar e degradar a matéria orgânica presente no esgoto. A otimização do projeto desses sistemas, como destacado por Santos *et al.* (2020), visa melhorar a eficiência na transferência de oxigênio e garantir a remoção robusta de compostos nitrogenados e orgânicos. Além disso, os processos de nitrificação, desnitrificação e acumulação biológica de fósforo são fundamentais para o tratamento eficiente dos efluentes. Rubino *et al.* (2003) observam que a utilização de diferentes tipos de biomassa

em sistemas de reator de batelada sequencial melhora ainda mais a eficiência, especialmente em operações com variação de carga.

Este estudo visa avaliar o desempenho de um reator biológico aeróbio, alimentado com efluente sanitário, analisando o impacto de uma crescente relação carbono/nitrogênio na produção de lodo sedimentável. O objetivo é otimizar o processo de partida e estabilização do reator, buscando melhorias na eficiência do tratamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O esgoto sanitário é constituído por águas residuais que contêm uma gama variada de poluentes, incluindo nutrientes, patógenos e compostos químicos, cuja concentração pode variar de acordo com a origem e o uso local da água (Rezende *et al.*, 2021). Essa diversidade de poluentes reflete-se na complexidade do tratamento sanitário, especialmente em áreas rurais, onde o acesso a sistemas de esgotamento sanitário é limitado. Há um grande desafio em relação ao saneamento básico, especialmente nas localidades rurais, um estudo feito por Lima (2021), corrobora destacando que 64% desta população usufruem de fossas sépticas rudimentares, enquanto apenas 13,6%, utilizam sistemas estruturados e eficazes.

A caracterização físico-química e microbiológica do esgoto sanitário é crucial para definir estratégias de tratamento e escolher tecnologias adequadas a cada localidade. Parâmetros como DBO, DQO, sólidos totais e nutrientes são indicadores-chave da carga poluente, influenciando o dimensionamento dos sistemas de tratamento. Em áreas urbanas, onde o efluente é mais complexo, tecnologias avançadas, como lodos ativados e reatores de membranas, são frequentemente necessárias. Em contrapartida, em regiões rurais, o efluente tende a ser menos complexo, permitindo que soluções mais simples, como filtros biológicos, sejam suficientes. Assim, essa caracterização orienta a escolha tecnológica e contribui para a sustentabilidade na gestão de efluentes, protegendo recursos hídricos e a saúde ambiental (Lobo e Pinheiro, 2021).

A qualidade da água é essencial para a preservação dos ecossistemas e para a saúde pública. A gestão inadequada do esgoto sanitário contamina os recursos hídricos e prejudica a biodiversidade aquática. Conforme destacado por Neves *et al.* (2015), o lançamento de efluentes ricos em nutrientes e patógenos acelera processos como a eutrofização, que reduz os níveis de oxigênio na água e favorece a proliferação de organismos nocivos.

Nesse contexto, a Lei nº 14.026/2020, que redefine as diretrizes nacionais para o saneamento básico, estabelece metas de universalização do acesso a sistemas adequados. Essa normativa introduz prazos e diretrizes rigorosos para melhorar a eficiência e a sustentabilidade das políticas públicas, fortalecendo a proteção dos recursos hídricos e a preservação ambiental.

A tecnologia de lodo granular aeróbio (LGA) é uma solução técnica promissora para ampliar o acesso ao saneamento básico no Brasil, especialmente em regiões desprovidas de sistemas eficientes de tratamento de esgoto. Essas características fazem do LGA uma opção economicamente acessível para municípios com recursos limitados, promovendo avanços significativos no tratamento de esgoto e na saúde pública, especialmente ao reduzir a incidência de doenças transmitidas pela água (Rollemberg *et al.*, 2020).

Ávila (2023) destaca em sua pesquisa que, após o processo de higienização, o lodo de esgoto é transformado em bio sólido, uma valiosa fonte de nutrientes para a agricultura. O estudo demonstrou que a aplicação desse material em solos não apenas enriquece a fertilidade, mas também contribui significativamente para a recuperação de áreas degradadas. A eficiência do bio sólido como fertilizante sustentável foi evidenciada, mostrando sua capacidade de melhorar as propriedades físico-químicas do solo e, conseqüentemente, aumentar a produtividade das culturas. Além disso, a autora enfatiza o potencial dessa prática como uma

alternativa ecológica aos fertilizantes químicos convencionais, ajudando a mitigar os impactos ambientais negativos associados ao uso excessivo de produtos sintéticos.

2.2 TRATAMENTO DE ESGOTO POR SISTEMAS DE LODOS ATIVADOS

Segundo Dos Santos (2007), o sistema de lodos ativados é amplamente utilizado no tratamento de águas residuárias domésticas e industriais devido à sua eficiência biológica e operacional. Baseado na ação de microrganismos aeróbios, o processo promove a degradação da matéria orgânica em presença de oxigênio, gerando efluentes de elevada qualidade.

Segundo Dos Santos (2007), uma estação de tratamento que emprega lodos ativados é composta por tanques de aeração, decantadores e sistemas de recirculação de lodo, cuja interação é fundamental para a eficiência do tratamento. Inicialmente, o esgoto passa por um pré-tratamento para remoção de sólidos grosseiros e materiais indesejados. Em seguida, o efluente é direcionado a um tanque de equalização, que regula a carga de poluentes, assegurando um fluxo contínuo e uniforme ao reator de lodos ativados.

No reator, o efluente é misturado ao lodo ativado, e a aeração garante o oxigênio necessário para a atividade microbiológica. Conforme apontado por Dos Santos (2007), durante esse processo, os microrganismos transformam a matéria orgânica em biomassa e dióxido de carbono. Após a etapa de aeração, a mistura segue para o decantador, onde ocorre a separação entre sólidos e líquido.

De acordo com Dos Santos (2007), O lodo sedimentado é parcialmente recirculado ao reator, mantendo a concentração adequada de microrganismos adaptados ao ambiente. O excedente de lodo passa por tratamento adicional, como digestão anaeróbia e desidratação, antes de ser descartado de forma ambientalmente segura. Por fim, o efluente tratado pode ser submetido a desinfecção para remoção de patógenos, garantindo sua adequação ao descarte ou reutilização. Esse sistema, não apenas trata o esgoto de forma eficiente, mas também contribui para a recuperação de recursos e redução de impactos ambientais.

De acordo com Oliveira (2023), o sistema de lodos ativados promove a decomposição da matéria orgânica, alcançando taxas de remoção de contaminantes próximas a 90%.

De forma complementar Bento *et al.* (2005) destacam a eficiência dos sistemas de lodos ativados no tratamento de esgoto sanitário, apontando remoções médias de 97% de DBO₅ e 80% de DQO em uma ETE com aeração prolongada, onde os autores evidenciam que a diversidade e a densidade da microfauna, especialmente organismos como Arcella e Euglypha, são fatores cruciais para o desempenho do sistema, estando diretamente associadas à estabilidade biológica e à eficiência na remoção de matéria orgânica. Além disso, processos como nitrificação e desnitrificação podem ser citados como vantagem desses sistemas.

Dufner *et al.* (2022) avaliaram o desempenho de uma estação de tratamento de esgoto doméstico alimentada por energia solar, utilizando um sistema de reator de batelada sequencial (SBR) de dois estágios, operando em regiões de clima tropical. O estudo evidenciou a alta eficiência do sistema na remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, alcançando taxas de remoção de $93 \pm 2\%$, $86 \pm 4\%$ e $93 \pm 6\%$, respectivamente. Além disso, destacou a relevância da gestão do lodo ativado e a flexibilidade operacional proporcionada pela redução das fases de aeração, fatores que ampliam a sustentabilidade econômica e a eficiência do tratamento, especialmente em contextos descentralizados.

2.3 OPERAÇÃO DE REATORES AERÓBIOS

A operação de reatores aeróbios tem se mostrado uma estratégia eficiente no tratamento de efluentes, especialmente em contextos industriais. Mello *et al.* (2021) indicam que sistemas compartimentados oferecem vantagens, como a alta eficiência na remoção de contaminantes e

a redução dos impactos ambientais com o descarte inadequado de subprodutos industriais. Para entender como esses sistemas funcionam, é importante considerar sua configuração.

Mello *et al.* (2021) explica que, sistemas compartimentados referem-se a reatores divididos em várias seções, cada uma com uma função específica no tratamento. Essa configuração permite otimizar o processo, ajustando as condições ideais de operação, como temperatura, pH e concentração de oxigênio, conforme necessário. Nos reatores anaeróbios/aeróbios, por exemplo, as câmaras anaeróbias realizam a decomposição da matéria orgânica sem oxigênio, enquanto a câmara aeróbia introduz oxigênio, favorecendo a atividade de microrganismos aeróbios que ajudam na oxidação dos resíduos. A separação das fases anaeróbias e aeróbias maximiza a remoção de contaminantes e minimiza a geração de lodo, aumentando a eficiência e sustentabilidade do sistema.

O estudo de Santos *et al.* (2021) destaca a importância da recirculação nos reatores aeróbios, onde ela mantém a biomassa em suspensão, otimiza a oxidação da matéria orgânica e favorece a desnitrificação sob condições controladas, sendo, no entanto, aplicável também a reatores anaeróbios, dependendo do contexto operacional. O aumento da razão de recirculação, especialmente a 75% na fase II, demonstrou impactos positivos, como a maior concentração de biomassa, resultando em interações mais eficazes entre a biomassa e o efluente, o que contribuiu para maior eficiência na remoção de carbono e nitrogênio. Os processos de nitrificação e desnitrificação simultânea (NDS) foram favorecidos por condições aeróbias específicas, com baixo teor de oxigênio dissolvido, permitindo a coexistência de micro-organismos essenciais para o processo. O estudo apresentou dados de alta eficiência durante as fases aeróbias, com uma remoção de DQO de 91% e de nitrogênio de 50%, reforçando a eficácia dos reatores aeróbios em condições otimizadas para o tratamento de efluentes.

O Reator Sequencial em Batelada (RSB) apresentado no estudo de Chagas *et al.* (2020) operava com um ciclo que integrava fases aeróbias, anaeróbias e anóxicas, formando um sistema multifásico capaz de tratar eficientemente o esgoto sanitário. A combinação dessas condições foi essencial para a remoção de matéria orgânica e nitrogênio em etapas distintas do processo. Durante a fase aeróbia, o destaque foi o processo de nitrificação, que converte amônia em nitrato e contribuiu diretamente para uma eficiência de remoção de nitrogênio de 42%. Simultaneamente, o reator demonstrou eficiência de remoção de DQO de 70%, mesmo sem o acréscimo de uma fonte externa de carbono, evidenciando a importância das condições aeróbias na otimização do desempenho.

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE LODO

A produção de lodo em sistemas de lodos ativados está diretamente associada à interação de diversos fatores, especialmente aqueles relacionados ao equilíbrio de nutrientes e à disponibilidade de carbono, que desempenham um papel crucial no desempenho do processo de tratamento. Entre os fatores destacados, a relação adequada entre a demanda biológica de oxigênio (DBO) e a disponibilidade de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, é essencial. A correta adição desses nutrientes é determinante para promover o crescimento microbiano e garantir a eficiência do processo, uma vez que a ausência ou o desequilíbrio nutricional pode comprometer a formação de biomassa ativa e, consequentemente, a remoção de poluentes do efluente como destacado por Cordi *et al.* (2008).

A composição físico-química do melaço de cana, incluindo a concentração de açúcares, a presença de nutrientes, o pH e a presença de inibidores, desempenha um papel fundamental na quantidade e qualidade da biomassa formada em reatores aeróbios, impactando diretamente a produção de lodo. O melaço, rico em açúcares redutores, fornece uma excelente fonte de carbono para microrganismos, favorecendo o crescimento microbiano e, consequentemente, a formação de biomassa. Além disso, a presença de nutrientes essenciais como nitrogênio e fósforo pode otimizar a produção de biomassa, enquanto a acidez do melaço e o pH do meio de

cultivo podem influenciar a atividade enzimática e o crescimento das cepas microbianas. A presença de compostos inibidores, por outro lado, pode afetar negativamente o processo, resultando em uma biomassa de menor qualidade e uma produção de lodo menos eficiente. A qualidade da biomassa, por sua vez, impacta a eficiência do tratamento de esgoto e a disposição final do lodo produzido. Portanto, monitorar e ajustar as condições de cultivo conforme a característica do melaço utilizado é essencial para otimizar esses processos (Araújo, 2017).

Pires, Benatti e Nour (2021) analisam os principais fatores que influenciam a produção de lodo em reatores biológicos. Entre eles estão a velocidade de sedimentação, a carga orgânica, o tempo de sedimentação, a produção de substâncias exopoliméricas (EPS), as condições operacionais do reator e a composição do efluente. A interação entre esses fatores é determinante para a formação e a estabilidade do lodo granular. Os autores destacam que compreender essa dinâmica é essencial para otimizar a produção e a eficiência do lodo em sistemas de tratamento de águas residuais.

Fonseca *et al.* (2019) analisam os principais fatores que influenciam a produção de lodo no tratamento de esgoto. A composição do efluente, especialmente a concentração de matéria orgânica, impacta diretamente a formação de lodo. O tipo de reator utilizado, como reatores biológicos aeróbicos (RB), eletrolíticos (RE) e bioeletrolíticos (RBE), também é determinante, dado que cada sistema possui características que afetam a geração de biomassa. As condições operacionais, como a densidade de corrente elétrica e o tipo de eletrodo (aço inoxidável ou grafite), influenciam a eficiência do processo, enquanto o tempo de retenção regula a degradação de poluentes e a formação de biomassa.

2.5 MONITORAMENTO DE REATORES AERÓBIOS

De acordo com Silva (2022), a avaliação da eficiência do tratamento de esgoto e a produção de lodo em reatores aeróbios dependem do monitoramento de diversos parâmetros como físicos, químicos e biológicos, os quais são cruciais para compreender as condições operacionais e a performance do sistema de tratamento.

2.5.1 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO

A manutenção do potencial hidrogeniônico (pH) em níveis adequados é apontada como fator crucial para a eficiência dos sistemas de tratamento de esgoto. Soares *et al.* (2020) ressaltam que processos biológicos como a nitrificação e a desnitrificação dependem diretamente de um pH controlado, uma vez que esse equilíbrio potencializa a atividade de microrganismos responsáveis pela remoção de nutrientes e poluentes, assegurando a qualidade do efluente final.

Por sua vez, Gusmão *et al.* (2021) reforçam que o controle do potencial hidrogeniônico é determinante no tratamento de lodo granular aeróbio, pois influencia tanto a estabilidade do lodo quanto a eficiência na remoção de nutrientes, como o fósforo. O ajuste adequado do pH não apenas otimiza as reações bioquímicas envolvidas na degradação da matéria orgânica, mas também evita a desestabilização dos grânulos de lodo, que podem comprometer o desempenho do sistema. Diante disso, o monitoramento contínuo desse parâmetro se torna indispensável para garantir a eficiência e a longevidade dos processos de tratamento.

2.5.2 OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD)

O Oxigênio Dissolvido (OD) desempenha um papel fundamental no tratamento de esgoto, servindo como um indicador da eficiência dos processos de depuração biológica. Segundo Dos Santos (2007), sua presença é crucial para a atividade das bactérias aeróbias, que são responsáveis pela degradação da matéria orgânica nos efluentes. O monitoramento dos níveis de OD nas estações de tratamento é vital, pois assegura condições favoráveis para a atividade microbiana, evitando a formação de ambientes anaeróbicos que podem resultar em

odores desagradáveis e na liberação de gases tóxicos. Além disso, a manutenção de níveis adequados de OD não apenas melhora a qualidade da água tratada, mas também contribui para a preservação da vida aquática, promovendo um ecossistema saudável e equilibrado ao devolver a água tratada aos corpos hídricos.

2.5.3 TURBIDEZ

Dos Santos (2007) destaca que a turbidez é um parâmetro crucial no tratamento de esgoto, uma vez que indica a presença de sólidos suspensos capazes de comprometer a eficiência dos processos de depuração. O monitoramento contínuo desse indicador é essencial para assegurar a qualidade do efluente, permitindo ajustes nos sistemas de tratamento, especialmente nos processos anaeróbios, onde altos níveis de turbidez podem dificultar a sedimentação e a separação dos sólidos.

A redução da turbidez não apenas melhora a estética dos corpos d'água, mas também promove um ambiente propício para a microfauna, cuja presença é indicativa de um sistema de tratamento eficiente. Segundo Bento *et al.* (2005), a microfauna desempenha um papel crucial na manutenção da saúde dos ecossistemas aquáticos, contribuindo para um equilíbrio ecológico que protege a vida aquática e favorece a degradação eficaz da matéria orgânica. Assim, o controle rigoroso da turbidez se mostra indispensável para a operação eficaz dos sistemas de tratamento e para a minimização dos impactos ambientais.

2.5.4 SÓLIDOS

Silva (2022) discute a importância dos sólidos no tratamento de efluentes, alinhando-se com a análise de Dos Santos (2007), que discorre sobre a importância dos sólidos no contexto do tratamento de efluentes, destacando três categorias principais: Sólidos Totais, Sólidos Suspensos e Sólidos Sedimentáveis.

Os Sólidos Totais (ST) referem-se à quantidade total de matéria sólida presente em uma amostra de água ou efluente após a evaporação completa do líquido. Segundo o autor, essa medida é essencial para compreender a carga total de sólidos que pode influenciar tanto a eficiência dos sistemas de tratamento quanto a qualidade do efluente final. Os ST englobam tanto sólidos suspensos quanto dissolvidos, sendo sua quantificação indispensável para avaliar a eficácia dos processos de depuração e a conformidade com as normas ambientais.

Já os Sólidos Suspensos Totais (SST) correspondem às partículas sólidas que permanecem em suspensão na água e não se depositam naturalmente. Eles são determinados pela filtragem da amostra em um filtro de membrana, onde os sólidos retidos representam os SST. Dos Santos (2007) ressalta que esses sólidos podem conter matéria orgânica, sedimentos e diversos poluentes, os quais impactam diretamente a qualidade da água tratada. Além disso, a distinção entre Sólidos Suspensos Fixos (SSF) e Sólidos Suspensos Voláteis (SSV), obtida após o processo de secagem e calcinação, permite uma análise mais detalhada da composição dos sólidos.

Por fim, os Sólidos Sedimentáveis (SS) são aqueles que se depositam no fundo de um recipiente sob a ação da gravidade, em um intervalo de tempo pré-determinado. Essa medição, conforme destacado pelo autor, é uma ferramenta prática para avaliar a eficiência de processos de sedimentação, como a decantação, que é uma etapa comum no tratamento de esgotos. A quantidade de SS pode indicar a presença de poluentes sedimentáveis e a necessidade de etapas adicionais no tratamento do efluente.

2.5.5 MICROSCOPIA

Segundo Orlandi (2023), a microscopia desempenha um papel fundamental na análise da biomassa de microalgas, permitindo a observação detalhada de suas características morfológicas e de crescimento em diferentes condições de cultivo. A comparação de amostras de água de lago com efluentes inoculados revelou um aumento significativo na biomassa algal, evidenciando a eficiência do tratamento e proporcionando uma melhor compreensão das interações ecológicas envolvidas.

De acordo com Seidel *et al.* (2023), a microscopia eletrônica é igualmente essencial nos sistemas de tratamento de efluentes, pois permite a identificação detalhada de protozoários e bactérias, indispensáveis para a avaliação da atividade biológica do lodo. Essa técnica, que oferece uma resolução superior à da microscopia óptica, possibilita uma compreensão mais profunda da dinâmica microbiana, sendo a presença de determinadas espécies de protozoários um bioindicador valioso da eficácia dos processos de nitrificação e da qualidade do efluente tratado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo, realiza-se uma avaliação qualitativa e quantitativa da produção de lodo aeróbio em reatores aerados alimentados com esgoto doméstico proveniente da rede de esgotamento sanitário da cidade de Corrente, no estado do Piauí. Na Etapa I, investigou-se a influência da adição de carbono e nitrogênio em diferentes proporções sobre a produção de biomassa microbiana. À proporção que apresentou melhor desempenho na Etapa I foi posteriormente aplicada na Etapa II, conduzida em regime de bateladas repetidas aeradas, com o intuito de verificar o aumento na concentração de lodo aeróbio sedimentável sob condições contínuas de operação.

3.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram conduzidos em reatores aerados com volume útil de 1 litro, operados em duplicata e aerados continuamente. A estabilização do pH foi realizada com adição de $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de bicarbonato de sódio, garantindo condições favoráveis à atividade microbiana. A Figura 1 ilustra a montagem dos reatores utilizados na etapa I, evidenciando a configuração em duplicata.

Figura 1: montagem dos reatores utilizados na etapa I.



Legenda: 4 Reatores em duplicadas.

3.2 ETAPA I: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE FONTES DE CARBONO E NITROGÊNIO

Na Etapa I, foram realizados quatro experimentos independentes para avaliar o impacto das concentrações de carbono e nitrogênio sobre a produção de lodo aeróbio. As concentrações foram ajustadas com melaço de cana-de-açúcar como fonte de carbono e ração animal como fonte de nitrogênio, mantendo uma proporção fixa de (C: N) em 10:1 em todos os experimentos, exceto um lote de reatores controle que foi mantido sem adição de fontes de carbono e nutrientes, recebendo apenas efluente sanitário e bicarbonato de sódio. Os reatores foram alimentados uma única vez com o respectivo meio reacional e monitorados quanto ao potencial hidrogeniônico (pH), oxigênio dissolvido (OD), sólidos sedimentáveis, turbidez e microscopia ao longo de 14 dias. A configuração dos experimentos é apresentada na Tabela 1.

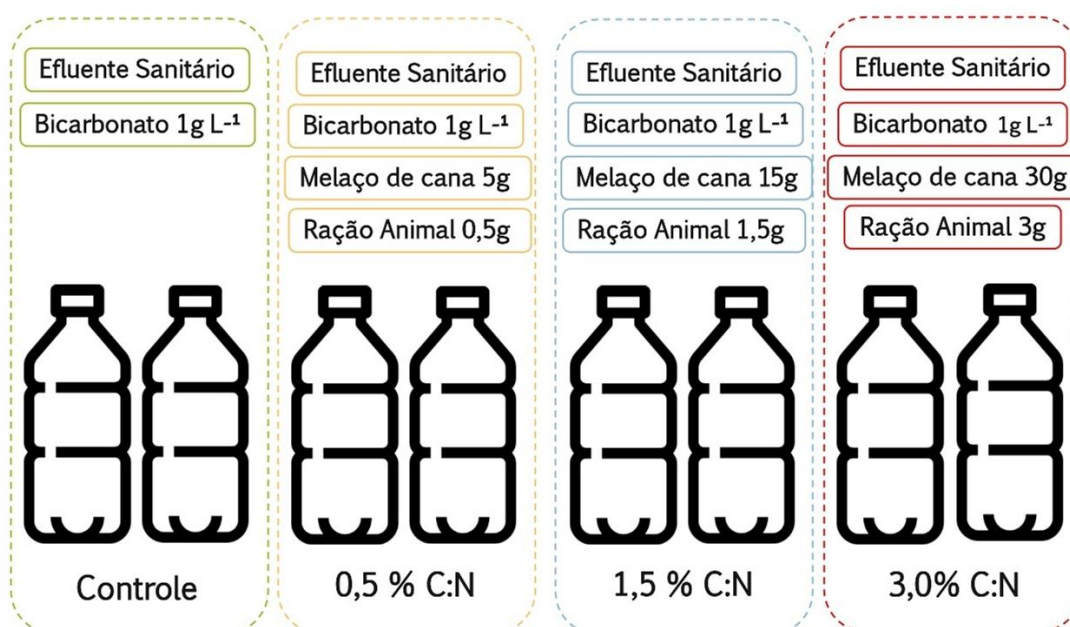
Tabela 1: Configuração operacional dos reatores.

Experimento	Porcentagem de Fonte de carbono adicionada	C:N	Bicarbonato de Sódio
Reator 1 (controle)	0% (p/v)	-	(1 g·L ⁻¹)
2	0,5% (p/v)	10:1	(1 g·L ⁻¹)
3	1,5% (p/v)	10:1	(1 g·L ⁻¹)
4	3,0% (p/v)	10:1	(1 g·L ⁻¹)

Legenda: (P/V) Peso por volume e (-) sem adição.

A Figura 2 apresenta a configuração detalhada dos tratamentos aplicados, evidenciando as variáveis de concentração utilizadas em cada reator.

Figura 2: detalhamento das concentrações.



Legenda: Reator 01 (Controle), Reator 2 (0,5% C:N), Reator 3 (1,5% C:N), Reator 4 (3,0% C:N)

3.3 ETAPA II: AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE LODO EM REGIME DE BATELADAS REPETIDAS

Na segunda etapa, os reatores foram operados em regime de bateladas repetidas, com tempos de operação final de 48 h, sendo monitoradas em tempos reacional de 0, 24 e 48 horas, realizando a sedimentação do lodo ao final das 48 h, mantendo a mistura de lodo sedimentado e líquido em 10% do volume reacional do reator e novamente alimentado para um novo ciclo reacional. Para essa etapa foram conduzidos dois experimentos:

- **Reator Controle:** Alimentado apenas com efluente sanitário e bicarbonato de sódio ($1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), sem adição de fontes de carbono e nitrogênio.
- **Reator Experimental:** Utilizou a proporção de carbono e nitrogênio que apresentou o melhor desempenho na Etapa I. Esta proporção foi baseada no desempenho superior do Reator 2, que apresentou os melhores resultados com a adição de 0,5% de fontes de carbono e nitrogênio.

Nesta etapa, os reatores foram monitorados pelos parâmetros de potencial hidrogeniônico (pH), sólidos sedimentáveis e oxigênio dissolvido (OD). Conforme e mencionado por Leite *et al.* (2021), a monitorização de parâmetros como pH, sólidos sedimentáveis e oxigênio dissolvido é essencial para avaliar a eficiência e a estabilidade dos reatores utilizados no tratamento de efluentes, destacando a importância desses fatores para o sucesso dos processos de tratamento.

3.4 MONITORAMENTO DO SISTEMA

O monitoramento dos reatores aeróbios foi conduzido nos laboratórios de Biologia, Química e Água e Saneamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), Campus Corrente. O desempenho dos reatores aeróbios foi acompanhado de perto, utilizando esgoto sanitário, o que permitiu uma avaliação precisa das condições operacionais.

Silva e Bastos (2021) enfatizam a relevância dos laboratórios acadêmicos na realização de análises ambientais, destacando sua competência técnica na avaliação detalhada das características das águas residuárias. A atuação dos laboratórios, portanto, é um componente essencial na gestão ambiental, oferecendo subsídios para a implementação de estratégias de mitigação eficazes.

O crescimento da biomassa do dolo foi avaliado de forma quantitativa por meio da análise de sólidos sedimentáveis. Esse teste mede o volume de sólidos que se sedimentam em um tempo definido (45 minutos – 1 hora) permitindo uma estimativa da fração sedimentável presente na amostra. Este parâmetro é indicador das características de decantação dos lodos.

As amostras de sólidos sedimentáveis (SS), assim como os demais parâmetros operacionais, foram analisadas em dias alternados para garantir a avaliação contínua da eficiência dos reatores aeróbios. O monitoramento dos parâmetros de potencial hidrogeniônico (pH) e oxigênio dissolvido (OD) foi realizado conforme as metodologias descritas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005), assegurando a conformidade com os padrões internacionalmente reconhecidos para análises em sistemas de tratamento de efluentes.

A estabilidade operacional dos reatores foi avaliada diariamente, enquanto a análise qualitativa do lodo foi conduzida por microscopia óptica, utilizando lentes com ampliações de 10 a 1000 vezes. Esse procedimento permitiu a caracterização da microbiana, fornecendo subsídios para a identificação de alterações na comunidade biológica e a eficiência do processo biológico.

As metodologias empregadas para as análises físico-químicas, bem como a frequência de monitoramento, estão detalhadas na (tabela 2).

Tabela 2: Métodos e Frequência das análise físico-químicas.

Parâmetro	Equipamento	Frequência
pH	pHmetro de Bancada AT 355	3 vezes por semana
OD (mg O ₂ /L)	Oxímetro portátil	3 vezes por semana
Turbidez (UNT)	Turbidímetro Plus Microprocessado	3 vezes por semana
Sólidos Sedimentar	Leitura visual com auxílio de proveta	3 vezes por semana
Microscopia	Microscópio óptico	1 vez por semana

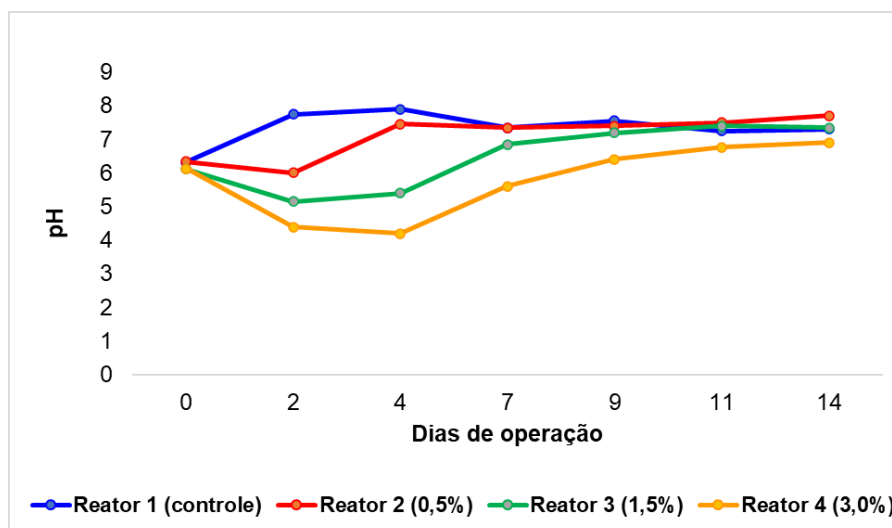
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Etapa I: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE FONTES DE CARBONO E NITROGÊNIO

Na Etapa I, avaliou-se a influência de diferentes proporções de carbono e nitrogênio na formação de biomassa sedimentável em quatro reatores: um controle e três com concentrações crescentes (0,5%, 1,5% e 3,0%). Os sistemas foram monitorados por 14 dias, analisando-se parâmetros como pH, oxigênio dissolvido, turbidez e sólidos sedimentáveis, para verificar a estabilidade microbiológica e o desempenho operacional.

No contexto do tratamento de esgoto, o pH geralmente se mantém entre 6,7 e 7,5, sendo essa faixa considerada ideal para a eficiência dos processos biológicos. Nos reatores analisados, os valores de pH apresentaram diferentes comportamentos em função da carga orgânica aplicada, refletindo as condições de estabilidade de cada sistema, como é mostrado no (gráfico 1).

Gráfico 1: Variação do pH nos reatores durante o tratamento de esgoto.



O Reator 1 (Controle), operado sem suplementação de carbono e nitrogênio, manteve valores de pH estáveis ao longo do experimento. Essa estabilidade está associada à baixa atividade microbiana, limitada pela ausência de nutrientes adicionais, o que resultou em uma produção reduzida de ácidos orgânicos. Embora a estabilidade tenha sido alcançada, a eficiência

biológica (produção de lodo) do tratamento foi comprometida, evidenciando a importância de condições mais favoráveis ao metabolismo microbiano para maior eficiência do processo.

No Reator 2, a adição moderada de 0,5% de carbono e nitrogênio proporcionou um ambiente equilibrado, com o pH oscilando entre 6,8 e 7,4, faixa ideal para a atividade de microrganismos aeróbios. Essa condição permitiu que o sistema mantivesse estabilidade do início ao fim do experimento, favorecendo processos biológicos consistentes e eficientes. A carga orgânica moderada se mostrou suficiente para sustentar o metabolismo microbiano sem causar acidificação excessiva, servindo como um exemplo de operação otimizada em termos de estabilidade e desempenho.

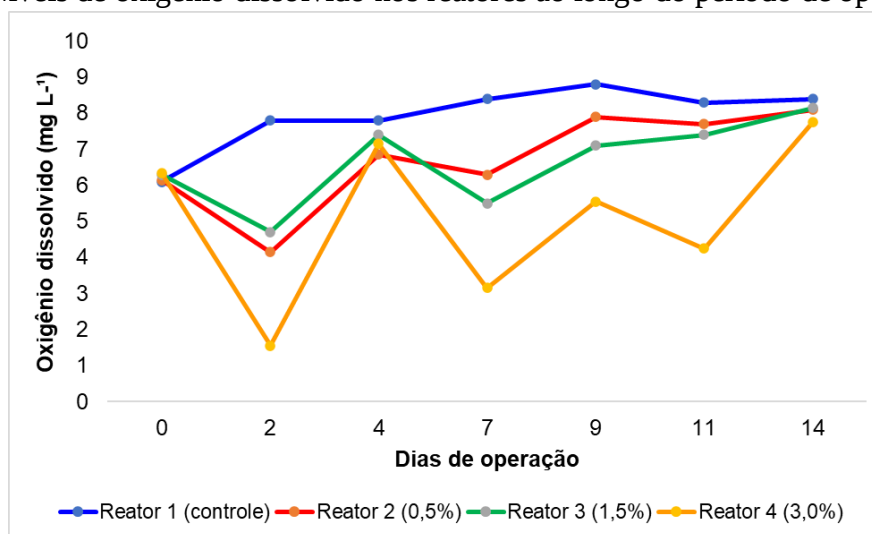
Já o Reator 3, operado com 1,5% de adição de carbono e nutrientes apresentou um desafio inicial de acidificação, com o pH atingindo 5,3 já no segundo dia operacional. Esse comportamento inicial reflete a maior produção de ácidos orgânicos em resposta à carga orgânica elevada. No entanto, o sistema demonstrou resiliência, estabilizando-se após o 4º dia e mantendo valores de pH em torno de 7,3 até o final do experimento. Essa recuperação indica a capacidade do sistema em se adaptar às condições desafiadoras, possivelmente devido ao tamponamento do meio e à evolução da comunidade microbiana para lidar com o excesso de nutrientes.

Na análise do Reator 4, operado com a maior concentração, 3,0% de adição de carbono e nutrientes, apresentou uma acidificação mais acentuada, com valores de pH abaixo chegando ao valor de 4,1 e dificuldade em alcançar estabilidade. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento significativo da carga orgânica, o que intensificou a produção de ácidos orgânicos devido à degradação microbiológica do substrato. Conforme destacado na literatura, altas concentrações de carbono podem promover uma rápida metabolização pelos microrganismos heterotróficos, gerando subprodutos como ácidos voláteis, que reduzem o pH (Cordi *et al.*, 2008).

Outro aspecto a ser considerado é a capacidade tampão do sistema. O meio reacional utilizado pode não ter oferecido alcalinidade suficiente para neutralizar os ácidos formados, exacerbando o desequilíbrio do pH. Esse fenômeno é frequentemente observado em sistemas com alta carga orgânica, onde a falta de tamponamento adequado impede a estabilização do pH, mesmo após períodos prolongados de operação.

Portanto, o comportamento do pH no Reator 4 evidencia a importância de um controle rigoroso da carga orgânica aplicada e da capacidade de tamponamento do sistema. Para evitar problemas semelhantes, seria recomendável otimizar a proporção de carbono e ajustar a alcalinidade do meio reacional, por exemplo, com a adição de bicarbonato de sódio em concentrações mais elevadas, conforme destacado por Silva (2022). Tais ajustes garantiriam um ambiente mais estável para os microrganismos, preservando a eficiência biológica do reator.

Além do pH também foi monitorado o oxigênio dissolvido dos reatores, o Gráfico 2 apresenta a variação dos níveis de oxigênio dissolvido (OD) ao longo do experimento, permitindo avaliar o equilíbrio entre a oferta de oxigênio e a demanda biológica gerada pelas diferentes cargas orgânicas aplicadas.

Gráfico 2: Níveis de oxigênio dissolvido nos reatores ao longo do período de operação

No Reator 1 (Controle), o OD inicial de 6,1 mg/L apresentou aumento contínuo, alcançando 8,8 mg/L no 9º dia e mantendo-se estável posteriormente. Essa estabilidade decorre da baixa atividade metabólica dos microrganismos, atribuída à ausência de nutrientes adicionais, resultando em equilíbrio entre consumo e reposição de oxigênio. A eficiência do tratamento em estações de lodos ativados está diretamente relacionada à manutenção de níveis adequados de oxigênio dissolvido, que é essencial para a atividade metabólica dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica (Pistorello e Benetti, 2024), reforçando que, mesmo com níveis elevados de OD, a ausência de biomassa ativa comprometeu a eficiência do sistema.

O Reator 2, com adição de 0,5% de carbono/nitrogênio, apresentou uma dinâmica inicial de crescimento seguida por flutuações antes de estabilizar-se. Entre os dias 2 e 4, o aumento de 4,1 para 7,6 sugere um rápido desenvolvimento da biomassa sedimentável, associado à adaptação inicial das comunidades microbiológicas ao meio. Contudo, a queda observada no dia 7, para 5,9, indica um possível desequilíbrio microbiológico, provavelmente causado por fatores como competição entre espécies. Após esse ponto, os valores estabilizaram-se em níveis ideais nos dias 9, 11 e 14, situando-se entre 8,0 e 8,2, o que evidencia o alcance de um equilíbrio operacional favorável.

O Reator 3, com adição de 1,5%, apresentou uma dinâmica oscilatória ao longo dos 14 dias de operação. Entre os dias 2 e 4, o aumento de 5,4 para 7,4 indica uma resposta inicial positiva, possivelmente ligada à adaptação microbiológica às condições impostas. A queda acentuada no dia 7, para 4,5, aponta para uma instabilidade que pode estar associada a limitações temporárias no ambiente, como flutuações nos níveis de oxigênio dissolvido ou competição entre microrganismos. A partir do dia 9, os valores se recuperaram, alcançando 7,4, e mantiveram estabilidade no dia 14, com 8,2.

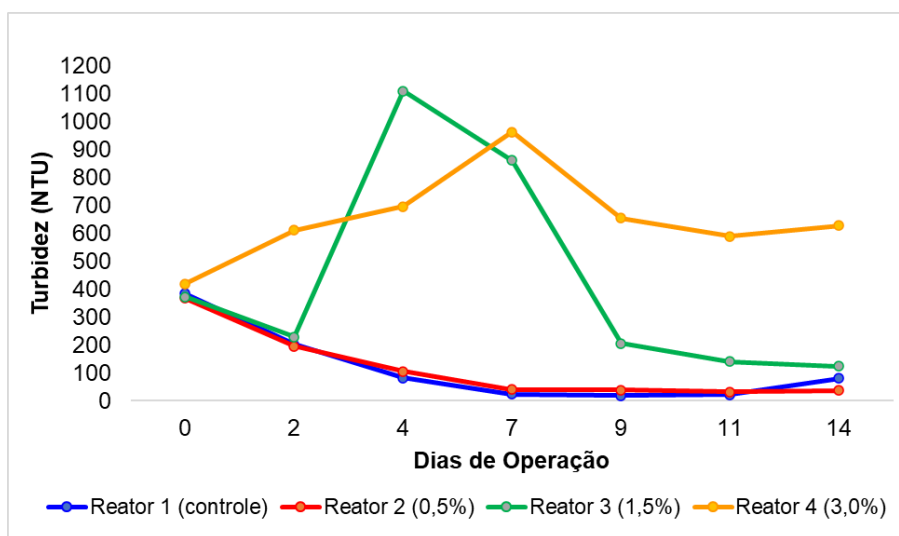
Esses comportamentos reforçam a importância do monitoramento contínuo das condições operacionais. Segundo Bueno *et al.* (2019), oscilações na concentração de oxigênio dissolvido (OD) influenciam diretamente a eficiência dos processos de nitrificação e desnitrificação. O estudo destaca que manter a OD em uma faixa controlada, ainda que em níveis baixos, é essencial para garantir a atividade de bactérias heterotróficas e autotróficas, fundamentais na remoção de matéria orgânica e nutrientes. Assim, as instabilidades observadas nos reatores, especialmente em maiores cargas orgânicas, refletem desafios na adaptação microbiológica e na gestão da OD, evidenciando a necessidade de controle rigoroso do sistema de aeração.

O Reator 4, com a maior adição de carbono e nitrogênio (3,0%), apresentou flutuações acentuadas durante o período analisado. No dia 2, o valor inicial foi de 1,5, evidenciando baixa atividade inicial. No dia 4, houve um aumento significativo para 7,3, indicando rápida adaptação microbiológica ao alto aporte de nutrientes. Contudo, no dia 7, ocorreu uma queda abrupta para 2,3, apontando instabilidades no sistema, possivelmente ligadas a limitações metabólicas temporárias ou dificuldades no equilíbrio microbiológico.

A partir do dia 9, o sistema recuperou-se e estabilizou-se, com valores de 7,8 no dia 9, 6,2 no dia 11 e 7,0 no dia 14. Esse comportamento sugere que, apesar das oscilações iniciais, a elevada concentração de carbono e nitrogênio sustentou o desempenho microbiológico, alcançando equilíbrio operacional na fase final do experimento. Esses dados demonstram que reatores submetidos a maiores cargas orgânicas (1,5% e 3,0%) enfrentaram períodos de instabilidade mais prolongados, enquanto reatores com cargas menores (0,5%) ou sem adição de nutrientes mantiveram maior estabilidade ao longo do experimento.

Os níveis de turbidez observados refletem a relação direta entre a carga orgânica aplicada, a atividade microbiana e a qualidade do efluente tratado. Freire e Santos (2018) destacam que a carga orgânica desempenha um papel central na eficiência dos processos de tratamento de esgoto, influenciando parâmetros como a turbidez e a estabilidade microbiológica do sistema Gráfico 3. Estes resultados permitem avaliar a eficiência de cada reator na remoção de partículas em suspensão, refletindo as condições específicas de operação de cada sistema.

Gráfico 3: Níveis de turbidez nos reatores ao longo do tempo.



O Reator 1 (Controle), que não recebeu suplementação de carbono e nitrogênio, registrou os menores níveis de turbidez durante todo o experimento. Inicialmente, a turbidez foi de 351,6 NTU, apresentando uma queda acentuada para 93,8 NTU no 4º dia e atingindo o valor mínimo de 7,4 NTU no 9º dia. Essa redução significativa reflete a limitada atividade microbiana, atribuída à ausência de nutrientes adicionais necessários para estimular a formação de biomassa. No 14º dia, observou-se um aumento para 56,5 NTU, indicando uma leve recuperação da turbidez, mas ainda em níveis baixos. Embora o parâmetro tenha demonstrado estabilidade em grande parte do período, o reator apresentou baixa eficiência no tratamento, especialmente na remoção de matéria orgânica e nutrientes. No entanto, a boa sedimentação de sólidos ao longo do experimento ressalta a importância de condições microbiológicas mais robustas para alcançar um desempenho operacional otimizado.

A turbidez do Reator 2, alimentado com 0,5% de carbono e nitrogênio, apresentou uma dinâmica de redução gradual e consistente ao longo do experimento. Iniciando com 368,1 NTU no primeiro dia, a turbidez caiu para 99,7 NTU no 4º dia e atingiu seu menor valor, 37,4 NTU,

no 11º dia, mantendo-se relativamente estável até o 14º dia com 38,7 NTU. Esses valores refletem um sistema operacional equilibrado, em que a adição moderada de nutrientes favoreceu a atividade microbiana sem gerar sobrecarga no sistema, promovendo uma boa sedimentação de sólidos e resultando em um efluente de alta qualidade. Conforme destacado por Leite *et al.* (2021), a diminuição da turbidez nos efluentes tratados está diretamente ligada à atividade microbiana e a processos de sedimentação de sólidos suspensos, indicando que condições equilibradas favorecem a eficiência do tratamento.

Por outro lado, os reatores 3 e 4, que receberam concentrações mais elevadas de carbono e nitrogênio 1,5% e 3,0%, demonstraram comportamentos distintos e menos estáveis. O Reator 3 iniciou com valores próximos ao do Reator 2 de 376,4 NTU, mas apresentou um aumento significativo no 4º dia, atingindo 1.060 NTU. Esse pico pode indicar um desequilíbrio microbiológico causado pelo excesso de nutrientes, que resultou na dispersão de biomassa e dificuldade na sedimentação. Apesar disso, o Reator 3 conseguiu reduzir gradualmente a turbidez nos dias subsequentes, alcançando 154,6 NTU no 11º dia e 122 NTU no 14º dia, mostrando uma recuperação operacional tardia. Esse comportamento reforça a capacidade adaptativa do sistema, que, mesmo após oscilações, foi capaz de melhorar a qualidade do efluente tratado, como observado na redução de sólidos em suspensão.

Já o Reator 4, com a maior adição de carbono e nitrogênio 3,0%, apresentou as maiores oscilações de turbidez durante o experimento. O valor inicial foi de 421,3 NTU, que subiu para 914,5 NTU no 7º dia, evidenciando uma instabilidade acentuada no sistema. Esse comportamento pode ser atribuído à sobrecarga de nutrientes, que potencializou a atividade microbiana, mas gerou dificuldades de sedimentação e aumento de sólidos em suspensão. Mesmo com uma redução no 14º dia, atingindo 624 NTU, os níveis de turbidez ainda se mantiveram muito elevados, indicando que o sistema não conseguiu alcançar um equilíbrio eficiente. Como sugerido por Leite *et al.* (2021), a sedimentação eficiente de sólidos é essencial para a redução da turbidez; no entanto, a sobrecarga de nutrientes nos Reatores 3 e 4 pode ter comprometido esse processo, resultando em elevados níveis de instabilidade e turbidez.

Essa análise destaca que o excesso de nutrientes nos reatores 3 e 4 levou a um aumento de turbidez e instabilidade operacional. Enquanto o Reator 3 demonstrou uma capacidade adaptativa ao reduzir a turbidez no final do experimento, o Reator 4 permaneceu com níveis altos e irregulares, sugerindo que a concentração de 3,0% de carbono e nitrogênio ultrapassou o limite de carga aceitável para o equilíbrio do sistema. Comparativamente, o Reator 2, com uma adição moderada de nutrientes, apresentou melhor desempenho no controle da turbidez, evidenciando que o equilíbrio na suplementação de carbono e nitrogênio é crucial para a eficiência do tratamento.

A Tabela 3 detalha as concentrações de sólidos sedimentáveis (SS) nos reatores durante os dias de operação, destacando não apenas as variações nos valores, mas também as falhas observadas em determinados sistemas. Enquanto os Reatores 1 e 2 mantiveram estabilidade ao longo do experimento, os Reatores 3 e 4 enfrentaram dificuldades notáveis em sedimentar os sólidos em momentos específicos.

Tabela 3: Concentrações de sólidos sedimentáveis nos reatores por dia.

Dias de operação	Reator 1 (controle)	Reator 2 (0,5%)	Reator 3 (1,5%)	Reator 4 (3,0%)
0	0 ml/L	0 ml/L	0 ml/L	0 ml/L
2	20 ml/L	60 ml/L	70 ml/L	40 ml/L
4	<10 ml/L	30 ml/L	*	60 ml/L
7	<10 ml/L	30 ml/L	*	90 ml/L
9	<11 ml/L	30 ml/L	60 ml/L	*

11	<12 mL/L	30 mL/L	60 mL/L	*
14	<13 mL/L	30 mL/L	70 mL/L	*

Legenda: (*) estourou.

A eficiência na sedimentação de sólidos em reatores biológicos está intrinsecamente relacionada à atividade microbiológica, a qual é diretamente influenciada pela disponibilidade de nutrientes essenciais, como carbono, nitrogênio e fósforo. Essa relação é de extrema relevância, uma vez que os microrganismos, ao metabolizarem a matéria orgânica presente nos efluentes, promovem a formação de biomassa sedimentável, caracterizada por partículas de maior densidade e dimensão. Conforme demonstrado por Pires, Benatti e Nour (2021) e corroborado por Benatti *et al.* (2020), a otimização das condições nutricionais é determinante para o desenvolvimento de uma microbiota ativa e funcional, capaz de potencializar os processos de sedimentação e, conseqüentemente, a eficiência geral no tratamento de efluentes.

No Reator 1 (Controle), operado sem suplementação de carbono e nitrogênio, observou-se concentrações consistentemente baixas de sólidos sedimentáveis (inferiores a 13 mL/L), comportamento que reflete a limitada atividade microbiológica causada pela ausência de nutrientes suplementares. Essa limitação resultou em uma formação insuficiente de biomassa, restringindo o potencial de sedimentação e, conseqüentemente, a eficiência geral do reator.

Já no Reator 2, que recebeu suplementação moderada de carbono e nitrogênio (0,5%), verificou-se uma sedimentação de sólidos consistente, estabilizando-se em 30 mL/L após os dois primeiros dias. Esse resultado confirma as observações de Pires, Benatti e Nour (2021), que associam a suplementação de nutrientes ao equilíbrio ideal para o desenvolvimento de biomassa ativa, capaz de melhorar a sedimentação e a eficiência do sistema. O desempenho do Reator 2 evidencia como condições nutricionais controladas favorecem a estabilidade microbiológica e o tratamento eficiente.

No Reator 3, suplementado com 1,5% de carbono, os picos de sólidos sedimentáveis registrados nos dias 4 e 7 podem ser atribuídos ao aumento inicial da atividade microbiológica, levando a um acúmulo transitório de biomassa em suspensão, conforme previsto pelos autores. Embora o sistema tenha demonstrado capacidade de recuperação, estabilizando os níveis de SS nos dias subsequentes, o comportamento inicial ressalta a importância de um controle rigoroso da carga orgânica para evitar instabilidades.

Por fim, o Reator 4, operado com a maior concentração de carbono (3,0%), enfrentou sobrecargas significativas, apresentando valores "estourados" nos dias 9, 11 e 14, corroborando as observações de Pires, Benatti e Nour (2021) sobre os impactos adversos de desequilíbrios nutricionais na sedimentação de sólidos e estabilidade operacional. A alta carga orgânica comprometeu a formação de biomassa eficiente, resultando em instabilidades severas, o que reforça a necessidade de monitoramento contínuo e condições nutricionais ajustadas para manter a eficiência do sistema.

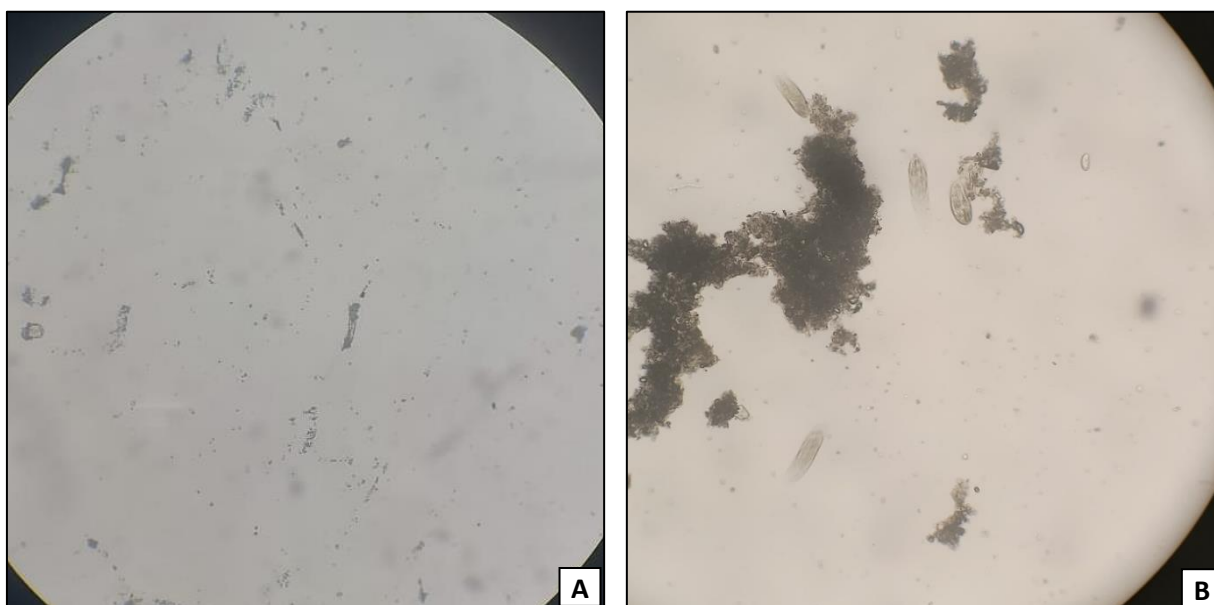
A análise microscópica revelou diferenças significativas nas características do lodo entre os reatores com e sem adição de carbono. Nos reatores suplementados com carbono, o lodo apresentou características ideais para sedimentação, com flocos aglutinados que promovem a separação eficiente de sólidos e resultam em melhor qualidade do efluente tratado. Em contrapartida, o Reator 1 (controle), que não recebeu suplementação, mostrou menor formação de flocos e maior dispersão, dificultando a sedimentação.

Bento *et al.* (2005) destaca que os copépodes são bioindicadores relevantes em sistemas de tratamento biológico, já que sua presença está associada a níveis adequados de oxigênio dissolvido, acima de 5-6 mg/L, essenciais para processos como a nitrificação e a eficiência geral do tratamento. Esses organismos, além de consumirem matéria orgânica, refletem a disponibilidade de oxigênio no meio líquido, sendo sua maior frequência nos reatores suplementados associada à maior concentração de carbono e nutrientes. Essa relação demonstra

que a suplementação de carbono não apenas favoreceu a formação de flocos sedimentáveis, mas também manteve condições adequadas para a eficiência do sistema.

Portanto, os resultados destacam que a adição de carbono nos reatores aprimorou a capacidade de sedimentação do lodo e assegurou um ambiente propício para o tratamento eficiente dos efluentes, evidenciando a importância de um equilíbrio nutricional adequado no processo de tratamento biológico como é evidenciado na Figura 3.

Figura 3: Microscopia dos Reatores



Legenda: Reator Controle (A) e Imagens de Flocos (B)

Na Etapa I, os reatores foram operados com diferentes proporções de carbono e nitrogênio, visando avaliar a produção de lodo aeróbio sedimentável e o comportamento dos sistemas sob condições variáveis de carga orgânica. Dentre os reatores avaliados, o Reator 2, suplementado com (0,5%) de carbono e nitrogênio, destacou-se como o sistema de melhor desempenho.

Os resultados demonstraram que a suplementação moderada de carbono e nutrientes foi capaz de promover a formação de biomassa ativa de maneira equilibrada, mantendo a estabilidade operacional e a eficiência no tratamento de efluentes. O Reator 2 apresentou valores consistentes de pH na faixa ideal (6,8 a 7,4), uma comunidade biológica diversificada, e excelente sedimentação de sólidos, atingindo 30 mL/L após os dois primeiros dias de operação. Esses indicadores confirmam que a proporção de 0,5% de carbono e nitrogênio representa uma condição otimizada para o início de operação de reatores aeróbios.

4.2 ETAPA II: AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE LODO EM REGIME DE BATELADAS REPETIDAS

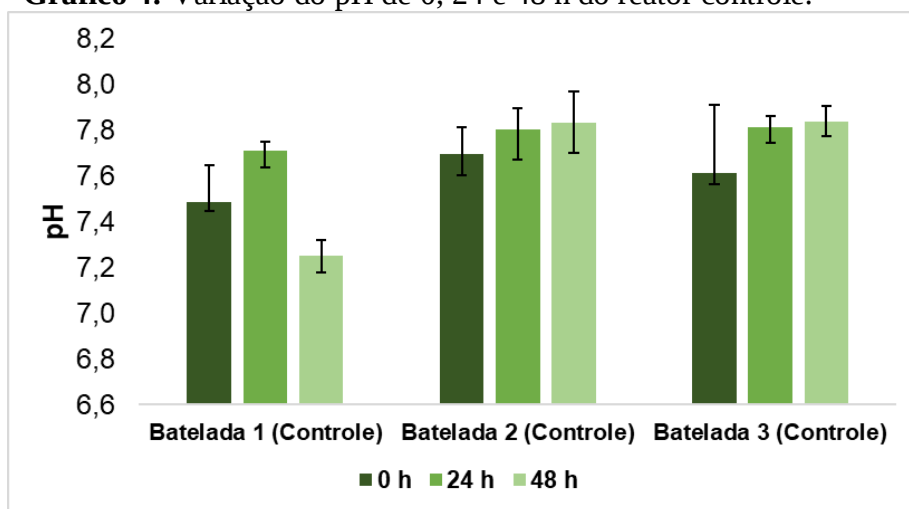
Com base nos resultados da Etapa I, na qual o Reator 2, suplementado em uma concentração de 0,5% de carbono e nitrogênio, demonstrou desempenho superior, a Etapa II foi projetada para validar a eficiência desse sistema em regime de bateladas repetidas. O objetivo foi avaliar o comportamento dos reatores sob condições contínuas de operação, simulando situações mais próximas de uma aplicação prática.

Nesta etapa, o monitoramento do potencial hidrogeniônico (pH) desempenhou um papel fundamental, pois o equilíbrio do pH é essencial para a manutenção da atividade microbológica e a eficiência dos processos de degradação da matéria orgânica. Conforme destacado por Santos

et al. (2021), a estabilidade do pH em reatores aeróbios é crucial para a manutenção da atividade microbiológica e a eficiência dos processos de degradação da matéria orgânica. A ausência de nutrientes suplementares pode limitar a atividade microbiana, resultando em uma produção negligenciável de metabólitos ácidos e, conseqüentemente, em um sistema que opera predominantemente sob controle químico, sem contribuições significativas de processos biológicos.

O Gráfico 4 apresenta o comportamento do pH no Reator Controle ao longo dos períodos de 0, 24 e 48 horas para cada ciclo de batelada na Etapa II. A análise dos dados revela que o reator, operado sem suplementação de carbono e nitrogênio, manteve uma estabilidade considerável no potencial hidrogeniônico, com variações mínimas ao longo dos ciclos.

Gráfico 4: Variação do pH de 0, 24 e 48 h do reator controle.



Na primeira batelada, o pH manteve-se próximo à neutralidade, com leve aumento após 24 horas devido a uma possível atividade microbiológica residual. Contudo, essa atividade foi insuficiente para alterar significativamente o equilíbrio químico, resultando em estabilidade completa às 48 horas, com atividade metabólica mínima no sistema.

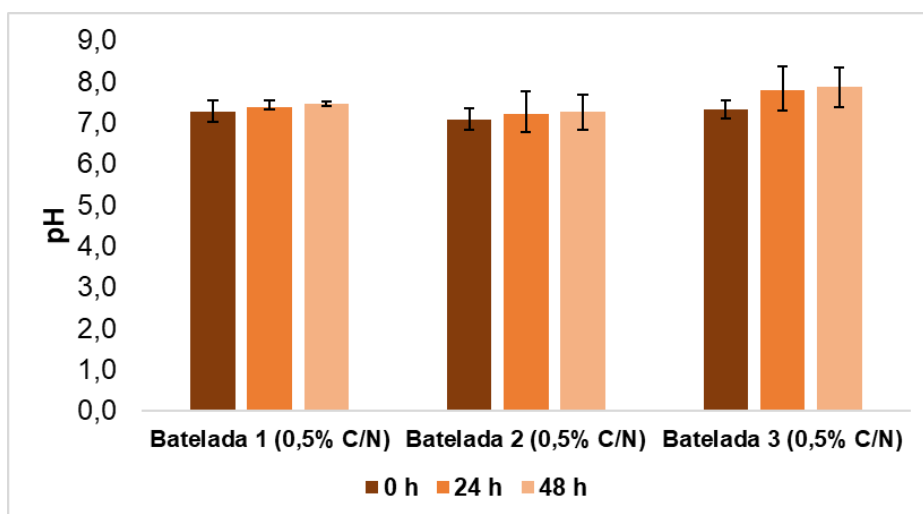
Na segunda batelada, o padrão de estabilidade do pH observado na primeira foi mantido, destacando a continuidade do controle químico no sistema devido à ausência de nutrientes suplementares.

Na terceira batelada, o pH seguiu o padrão das anteriores, com variações mínimas ao longo do tempo. Isso reforça a inatividade biológica do reator e a influência predominante das condições químicas limitadas.

Em síntese, os resultados do Gráfico 4 destacam a estabilidade do pH no Reator Controle, uma consequência direta da ausência de suplementação de nutrientes e da baixa atividade biológica do sistema. Embora essa estabilidade seja operacionalmente vantajosa, reflete a ineficiência do reator em termos de tratamento biológico, limitando a sua capacidade de realizar a degradação efetiva da matéria orgânica. Esse comportamento contrasta com reatores suplementados, como o Reator 2, cujo desempenho será discutido em seções posteriores.

O Gráfico 5 ilustra a variação do pH no reator suplementado com (0,5%) de carbono e nitrogênio durante os períodos de 0, 24 e 48 horas, avaliados em cada ciclo de batelada na Etapa II.

Gráfico 5: Variação do pH de 0, 24 e 48 h do reator com adição de (0,5%).



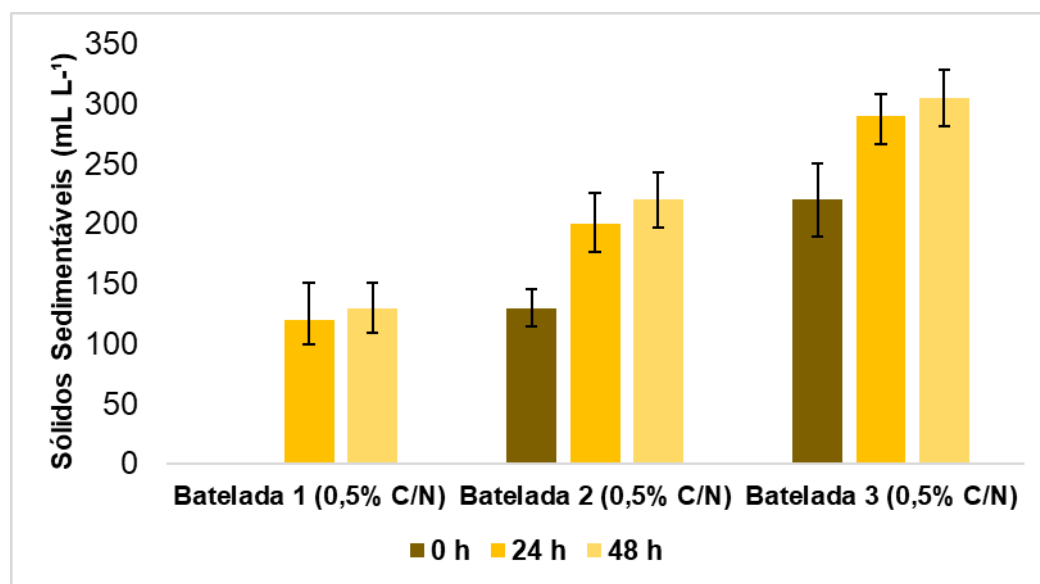
Na primeira batelada, os valores de pH apresentaram variações quase imperceptíveis entre os tempos analisados, indicando uma estabilidade inicial do sistema. Essa condição pode ser atribuída à adaptação dos microrganismos à carga orgânica introduzida e ao efeito do tamponamento promovido pelo bicarbonato de sódio (1 g/L). A ausência de flutuações significativas sugere que a atividade microbiológica ainda estava em estágio inicial, com baixa produção de ácidos orgânicos e estabilidade na composição do meio.

Na segunda batelada, houve um leve decréscimo do pH ao longo do período de 48 horas, evidenciando um aumento na atividade metabólica dos microrganismos, que passaram a metabolizar a matéria orgânica de forma mais intensa. Essa maior atividade resultou em uma produção moderada de ácidos orgânicos, o que contribuiu para uma acidificação sutil do meio. Essa variação reflete a adaptação progressiva da comunidade microbiológica às condições operacionais impostas, indicando o início da estabilização do sistema.

Já na terceira batelada, a variação do pH tornou-se mais evidente, com um padrão característico de maior produção de metabólitos ácidos ao longo de 24 horas. Esse comportamento indica que o sistema alcançou um estágio de maior maturidade, com a microbiota completamente adaptada às condições de operação. A atividade biológica robusta garantiu uma degradação eficiente da matéria orgânica e a formação controlada de ácidos orgânicos. Mesmo assim, os valores de pH permaneceram dentro da faixa ideal para processos biológicos, o que demonstra que o sistema manteve a estabilidade operacional, mesmo sob maior atividade metabólica.

O Gráfico 6 apresenta a evolução das concentrações de sólidos sedimentáveis no Reator 2, operado com a adição de 0,5% de carbono e nitrogênio, durante os períodos de 0, 24 e 48 horas ao longo das bateladas realizadas. Este reator, previamente identificado como o de melhor desempenho, demonstrou uma progressão consistente no desenvolvimento de biomassa sedimentável, evidenciando a eficácia da suplementação nutricional.

Gráfico 6: Concentrações de sólidos sedimentáveis nos reatores nos períodos de 0, 24 e 48 h.

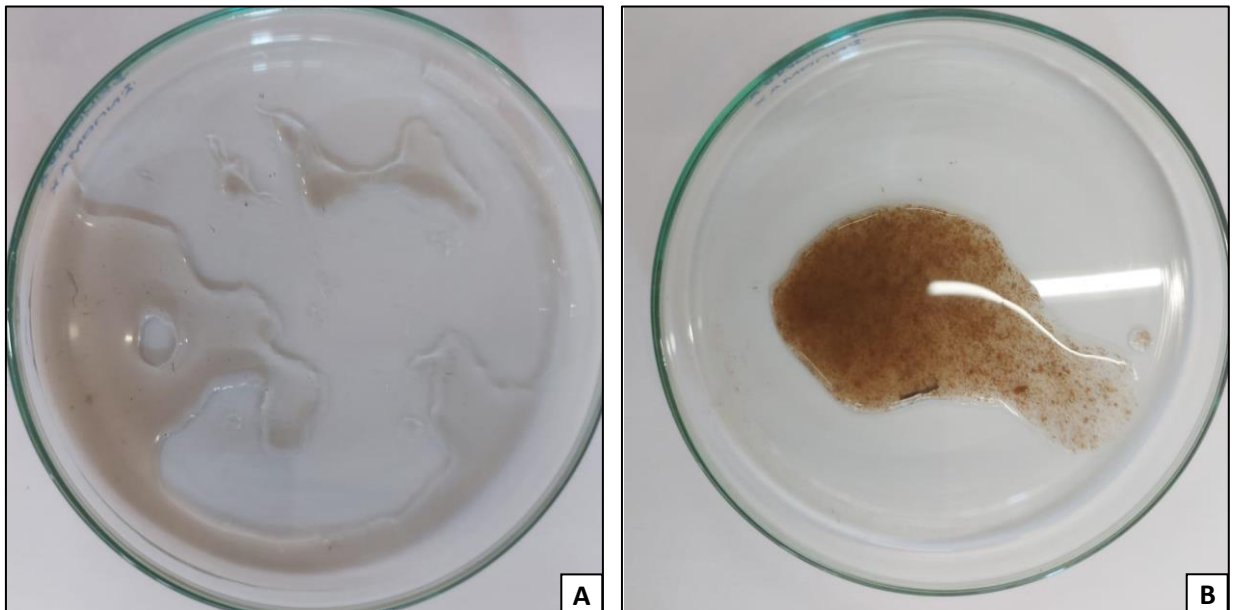


Em contraste, no reator controle, os sólidos sedimentáveis permaneceram entre 0 e 1 mL/L, mesmo ao final da terceira batelada, indicando uma baixa capacidade de formação de biomassa sedimentável devido à ausência de nutrientes adicionais. Essa limitação, entretanto, não foi observada no Reator 2, que apresentou resultados significativamente superior. Conforme ilustrado no (Gráfico 6), a adição de carbono e nitrogênio na concentração de (0,5%) promoveu um ambiente adequado para o crescimento microbiano, resultando em uma sedimentação eficiente e em concentrações elevadas de sólidos sedimentáveis.

No início da batelada 1, não foram observados sólidos sedimentáveis, indicando que, naquele momento, os microrganismos presentes ainda estavam dispersos e não haviam formado flocos suficientemente densos para sedimentação. Esse comportamento inicial é típico em sistemas em fase de partida, onde o metabolismo microbiano ainda está em processo de adaptação ao meio reacional.

Após 24 horas de operação, houve um aumento significativo na concentração de sólidos sedimentáveis, refletindo o início da agregação dos microrganismos em flocos biológicos coesos (Figura 4). Esses flocos, provavelmente, formados principalmente por bactérias heterotróficas que utilizam o carbono e o nitrogênio suplementados, começaram a sedimentar devido ao aumento da densidade. Ao final de 48 horas da batelada 1, o sistema já apresentava uma biomassa sedimentável consistente (Figura 5), comprovando a eficácia do fornecimento de nutrientes para o estímulo do crescimento microbiano.

Figura 4: Formação de lodo após o primeiro ciclo de bateladas sequenciais.



Legenda: Lodo formado no Reator Controle após o primeiro ciclo (A) e Lodo formado no Reator 0,5% C:N após o primeiro ciclo B.

Figura 5: Bioflocos com potencial de sedimentação sendo formados após o primeiro ciclo de bateladas sequenciais.



Legenda: Reator 0,5% C: N

Na batelada 2, diferentemente da anterior, já havia sólidos sedimentáveis no início (0 horas), o que demonstra que o sistema começou a operar com biomassa residual sedimentável, formada durante a batelada anterior. Esse comportamento reflete a continuidade e o acúmulo de biomassa ativa no sistema, evidenciando que os microrganismos estavam adaptados às condições nutricionais e ambientais do reator.

Durante as 24 horas subsequentes, observou-se um aumento progressivo e uniforme na concentração de sólidos sedimentáveis, com o sistema atingindo valores elevados ao final de

48 horas, embora ainda inferiores a 300 mL/L. Esse resultado indica que o reator estava em um estágio avançado de estabilidade microbiológica, sendo capaz de sustentar a formação de biomassa sedimentável de forma contínua e eficiente.

Na batelada 3, o reator operou em condições de maturidade microbiológica plena. Desde o início (0 horas), os sólidos sedimentáveis apresentaram valores elevados, reforçando a permanência da biomassa residual sedimentável acumulada. Durante as 24 horas subsequentes, o aumento foi consistente, e ao final de 48 horas, o sistema alcançou o valor máximo de 300 mL/L de sólidos sedimentáveis. Esse desempenho evidencia a plena capacidade do sistema de formar e sedimentar biomassa em condições otimizadas, consolidando a eficiência operacional do reator. Conforme apontado por Lamego Neto e Costa (2011), bactérias oxidadoras de amônio (BOA) e microrganismos desnitrificantes desempenham papéis fundamentais nesse processo, promovendo tanto a formação de flocos sedimentáveis quanto a estabilidade operacional do sistema, mesmo sob variações de carga orgânica.

Esse desempenho demonstra que, após os três ciclos de batelada, o Reator 2 estava apto para operar apenas com esgoto como alimentação, sem necessidade de suplementação adicional de carbono e nitrogênio. Isso representa uma vantagem operacional significativa, já que o sistema reduz custos e recursos, como energia e insumos, além de minimizar a produção de efluentes com baixa qualidade que precisariam ser recirculados para tratamento adicional.

5 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de um reator biológico aeróbio alimentado com efluente sanitário, analisando o impacto de diferentes proporções de carbono e nitrogênio na produção de lodo sedimentável e na estabilidade do sistema. Os resultados destacaram a importância do equilíbrio nutricional na eficiência dos reatores aeróbios e na melhoria do tratamento de esgoto.

Na Etapa I, a suplementação com 0,5% de carbono e nitrogênio no Reator 2 apresentou os melhores resultados, com pH estável entre 6,8 e 7,4, níveis adequados de oxigênio dissolvido (8,0 a 8,2 mg/L nos períodos finais), baixa turbidez (37,4 NTU mínima) e sedimentação consistente de sólidos (30 mL/L nos primeiros dias). Esses dados mostram que a suplementação moderada favoreceu o equilíbrio microbiano, formando flocos sedimentáveis e estáveis, enquanto maiores cargas orgânicas resultaram em acidificação e turbidez elevada.

Na Etapa II, o Reator 2 operou de forma eficiente em regime de bateladas repetidas, sem suplementação adicional de carbono e nitrogênio. Após três ciclos, o sistema se adaptou, operando apenas com esgoto como fonte de alimentação. A produção de sólidos sedimentáveis atingiu 300 mL/L ao final do experimento, evidenciando que a suplementação inicial estabilizou a microbiota e garantiu eficiência em operações contínuas.

O desempenho superior do Reator 2 deve-se ao equilíbrio proporcionado pela suplementação de 0,5% de carbono e nitrogênio, que evitou tanto a limitação quanto o excesso de nutrientes. Isso confirma a importância do controle preciso da carga orgânica para sistemas de reatores aeróbios.

Conclui-se que a suplementação moderada de carbono e nitrogênio é uma estratégia eficaz para otimizar a produção de lodo sedimentável e melhorar a eficiência do tratamento de efluentes sanitários. Estudos futuros podem investigar a aplicação em escalas maiores e em outras configurações de reatores, visando maior eficiência e sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Luan Maia de. **Avaliação físico-química de melaço e melado**. 2017. Trabalho de Conclusão do Curso (Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) - Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.
- ÁVILA, Átala Rebeca da Silva. **Aproveitamento dos nutrientes contidos em esgoto e lodo tratados para produção de óleos essenciais**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.
- BEGNINI, João Felipe. **Reator operado em bateladas sequenciais aplicado para nitrificação de efluente agroindustrial**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2016.
- BENATTI, J. C. B.; PRADO, P. M. A.; NOUR, E. A. Desenvolvimento de lodo granular aeróbio em reatores em batelada sequencial utilizando esgoto sanitário e baixas taxas de aeração. *Revista DAE*, v. 68, n. 227, p. 06-19, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.078>.
- BENTO, Alessandra Pellizzaro et al. Caracterização da microfauna em estação de tratamento de esgotos do tipo lodos ativados: um instrumento de avaliação e controle do processo. *Engenharia sanitária e ambiental*, v. 10, p. 329-338, 2005.
- Brasil**. Lei nº .14.026, de 15 de julho de 2020. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: [L14026](#). Acesso em: 25/10/2024.
- BUENO, R. DE F.; PIVELI, R. P.; CAMPOS, F.. Lodo ativado com aeração prolongada operado sob baixa concentração de oxigênio dissolvido: comportamento cinético das bactérias heterotróficas e autotróficas nitrificantes. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 24, n. 5, p. 939–947, set. 2019.
- CHAGAS, H. C. de A.; CALLADO, N. H.; DAMIANOVIC, M. H. R. Z. Remoção De Matéria Orgânica E Nitrogênio Em Reator Híbrido Anaeróbio/Aeróbio/Anóxico Operado Em Bateladas Sequenciais. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 1–14, 2020. DOI:10.9771/gesta.v8i2.36947. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/36947>. Acesso em: 23 nov. 2024.
- CORDI, Livia et al. Montagem, partida e operação de um sistema de lodos ativados para o tratamento de efluentes: parâmetros físico-químicos e biológicos. *Rev Eng Ambiental*, v. 5, n. 1, p. 97-115, 2008.
- DE MELLO, B. S.; RODRIGUES, B. C. G.; DUDA, R. M.; SARTI, A. Uso do melaço de soja como substrato para a digestão anaeróbia/aeróbia em reator compartimentado / Use of soybean molasses as a substrate for anaerobic/aerobic digestion in baffled reactor. *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 7, n. 10, p. 95432–95454, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n10-046. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/37000>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- DIAS, L. P.; COLEN, F.; PEREIRA, S.; SILVA, J. F. da; QUEIROZ, C. M. Avaliação da eficiência de ETEs para cidades de pequeno porte do Norte de Minas Gerais. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, [S. l.], v. 17, n. 10, p. e12078, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.10-425. Disponível em:

<https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/12078>. Acesso em: 17 dez. 2024.

DOS SANTOS, André Bezerra. **Avaliação técnica de sistemas de tratamento de esgotos**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2007. 206 p.

DUFNER, L, Selvam TSS, Otto N, Neuffer D, Santos HR dos. Performance evaluation of a solar-powered wastewater treatment plant (two-stage SBR) operated in tropical climate regions. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 6, p. 1123–1132, nov. 2022.

FONSECA, Ariela Araujo. Ginoris, Yovanka Pérez. Gontijo, Norma Mendes Pinheiro. Souza, Marco Antonio Almeida de. Removal of organic matter from pre-treated domestic sewage in anaerobic biological reactor by a combined system of electrolytic and biological aerobic treatment. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 4, p. e2349, 2019.

FREIRE, L. L.; SANTOS, Y. T. da C. Estimativa das contribuições de carga orgânica doméstica e impactos ambientais das ligações inadimplentes de esgoto em Juazeiro do Norte – Ceará. **Ciência e Sustentabilidade**, Juazeiro do Norte, v. 4, n. 2, p. 5-24, jul./dez. 2018.

GONÇALVES, M. V. P. Desigualdades sócio-espaciais no acesso ao saneamento básico e às ameaças à saúde da população do Baixo Sul da Bahia, Brasil. **Conjecturas**, [S. l.], v. 23, n. 1, p. 255–281, 2023. DOI: 10.53660/CONJ-2316-23B30. Disponível em: <https://www.conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/2316>. Acesso em: 12 abr. 2024.

GUSMÃO, A. R. B. de; PIVELI, R. P.; NUNES, A. C. Tecnologia de lodo granular aeróbio: caracterização, desafios e perspectivas para o tratamento de esgoto sanitário. **Revista DAE**, v. 69, n. 230, p. 87-107, jun. 2021.

GUSMÃO, Andressa Griebler. **Caraterização química e biológica de lammas de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR´ s)**. 2023. Tese de Doutorado.

LAMEGO NETO, L. G.; COSTA, R. H. R. DA .. Tratamento de esgoto sanitário em reator híbrido em bateladas sequenciais: eficiência e estabilidade na remoção de matéria orgânica e nutrientes (N, P). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 411–420, out. 2011.

LEITE, Paulo Fernando Araújo Feitosa; VICH, Daniele Vital; CALLADO, Nélia Henriques. Tratamento de dejetos de suinocultura em reator anaeróbio com pós-tratamento aeróbio/anóxico. **Engenharia Sanitária E Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 567-576, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200009>. Acesso em: 19. nov. 2024.

LIMA, Marcelle Maria Gois. **O PMSB e os desafios da universalização do saneamento em áreas rurais**. 2021. 1 recurso online (123 p.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1640983>. Acesso em: 19 nov. 2024.

LOBO, Isadora Vitali; PINHEIRO, J. H. P. A. Esgoto sanitário: caracterização, tratamento e ecotoxicidade. **Periódico Eletrônico–Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 17, n. 5, 2021.

NEVES, C. S. et al. Partida de reator anaeróbio compartimentado em série com um reator anaeróbio de manta de lodo, utilizando parâmetros de sedimentabilidade para formação da biomassa. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 4, p. 623–634, out. 2015.

OLIVEIRA, Guilherme Feltrin de. **Análise e estudo de ETE's com sistema cíclico de lodos ativados e reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo**. 2023. 125 f. TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri, 2023.

ORLANDI, Vinícius Pereira. **Utilização de microalgas para pós tratamento de efluente de fossa séptica biodigestora**. 2023. Trabalho de conclusão de curso – (Graduação em Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de São Carlos, Buri, SP, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/17770>>. Acesso em: 01/12/2024.

PASTRE, FAUSTON et al. Evolução dos serviços de coleta e tratamento de esgoto no cenário brasileiro: uma análise para alcançar as metas do Novo Marco Legal do Saneamento Básico. **XI SINGEP-Simpósio Internacional de Gestão, Projetos, Inovação e Sustentabilidade**, n. 1, p. 1-15, 2023.

PIRES, D. P.; BENATTI, J. C.; NOUR, E. A. A.. Desenvolvimento de lodo granular aeróbio em reatores em batelada sequencial com baixa velocidade de sedimentação. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 6, p. 1015–1024, nov. 2021.

PISTORELLO, J.; BENETTI, A. D. Simulação do co-tratamento de resíduo de tanque séptico e esgoto doméstico em processo de lodos ativados. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 94–117, 2024. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2024.17.1.84296. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/84296>. Acesso em: 20 nov. 2024.

REZENDE, D. C. V.; MOREIRA, D. A.; REZENDE, S. D. C. V.; SOUZA, J. A. R.; SILVA, É. L.. Tanque de evapotranspiração no tratamento de esgoto sanitário na propriedade rural. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.3, p.627-639, 2021.

ROLLEMBERG, S. L. DE S. et al. Tecnologia de lodo granular aeróbio no tratamento de esgoto doméstico: oportunidades e desafios. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 3, p. 439–449, maio 2020.

Rubino, F.F., Araújo, O.Q.F., & Coelho, M.A.Z. (2003). **Remoção Biológica de Nutrientes em Reator Batelada Sequencial**. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SANTOS, Elivânia Vasconcelos Moraes; SILVA FILHO, Heraldo Antunes; VAN HAANDEL, Adrianus Cornelius; SOUSA, José Tavares. Capacidade metabólica de bactérias heterotróficas de sistemas de lodo ativado em ambientes aeróbios e anóxicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 41-50, 2020.

SANTOS, M. V. A. DOS. et al. Reatores híbridos anaeróbio e aeróbio para remoção de matéria orgânica e nitrogênio em esgoto doméstico diluído. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 591–600, maio 2021.

SEIDEL, L. B. et al. Microfauna in the activated sludge treatment of the effluent from a soybean processing industry: a form of evaluation and control of the process. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 28, p. e20220102, 2023.

SILVA, Anthony Jeff Correia. **Análises dos parâmetros físicos-químicos e microbiológicos do efluente da ETE localizada no município de Rio Formoso**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Licenciatura em Química – Instituto Federal de Pernambuco, Barreiros, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/1244>>. Acesso em: 20 out. 2023.

SILVA, F. Z. da; BASTOS, I. C. IMPLEMENTAÇÃO DA NORMA 17025 EM LABORATÓRIO ACADÊMICO DE ANÁLISES AMBIENTAIS. **Revista Brasileira de Meio Ambiente & Sustentabilidade**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 339–359, 2021. Disponível em: <https://rbmaes.emnuvens.com.br/revista/article/view/22>. Acesso em: 16 nov. 2024.

SINISA, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2023) ano base 2022 **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgotos Visão Geral**, publicado em dezembro de 2023, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília.

SINISA, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2023) ano base 2022 **Painel de Regionalização dos Serviços de Saneamento Básico no Brasil-Indicadores de Esgoto-2022**, Publicado em 2023, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília.

SOARES, L. A.; SANTOS, M. S.; BORGES, L. M.; SALEH, B. B.; FELIX, M. V.; MANSO, R. T. Avaliação do PH no tratamento de esgoto doméstico com fossa séptica e lagoa de aguapés / PH evaluation in the treatment of domestic sewage with septic dent and aguapés pond. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 15586–15591, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n3-437. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/8169>. Acesso em: 2 dec. 2024.