

Artigo

Avaliação das taxas de nitrificação e desnitrificação em sistema anóxico e aeróbio de leito móvel com biofilme (MBBR) utilizando efluente de laticínio

Evaluation of nitrification and denitrification rates in an anoxic and aerobic moving bed biofilm reactor (MBBR) system using dairy wastewater

Lindolaine Machado de Sousa^{1*}, Marcelo Rayn de Vargas Lube², Graciele Monteiro Campos³, Adão da Silva Oliveira⁴, Alberto Dresch Webler⁵

Citação: Sousa, L. M. de; Lube, M. R. de V.; Campos, G. M.; Oliveira, A. da S.; Webler, A. D. Avaliação das taxas de nitrificação e desnitrificação em sistema anóxico e aeróbio de leito móvel com biofilme (MBBR) utilizando efluente de laticínio. *RBCA* 2024, 13, 3. p.261-278.

Editor de Seção: Dra. Karen Janones da Rocha

Recebido: 11/07/2024

Aceito: 20/08/2024

Publicado: 02/09/2024

Nota do editor: A RBCA permanece neutra em relação às reivindicações jurisdicionais em sites publicados e afilições institucionais.



Copyright: © 2024 pelos autores. Enviado para possível publicação em acesso aberto sob os termos e condições da licença Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

- ¹ Universidade Federal de Rondônia - Engenharia Ambiental e Sanitária UNIR, Campus de Ji-Paraná. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9736-5342>. E-mail: lindolaine.sousa@gmail.com;
 - ² Universidade Federal de Rondônia - Engenharia Ambiental e Sanitária UNIR, Campus de Ji-Paraná. E-mail: marcelolube4@gmail.com;
 - ³ Universidade Federal de Rondônia - Engenharia Ambiental e Sanitária UNIR, Campus de Ji-Paraná. E-mail: gracielly_monteiro@hotmail.com;
 - ⁴ Universidade Federal de Rondônia - Engenharia Ambiental e Sanitária UNIR, Campus de Ji-Paraná. Email: adao.oliveira@unir.br;
 - ⁵ Universidade Federal de Rondônia - Engenharia Ambiental e Sanitária UNIR, Campus de Ji-Paraná. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2982>. E-mail: alberto.webler@unir.br Ana Lúcia Denardin da Rosa
- * Correspondência: lindolaine.sousa@gmail.com

Abstract: There are concerns about the waste generated in industrial processes, especially in the food industry. In the case of the dairy industry, this concern arises because milk and its derivatives have a high concentration of organic matter and nutrients, leading to the generation of polluting effluents. In this sense, the objective of this work is to evaluate the performance of aerobic and anoxic reactors in a test bench for nitrogen reduction associated with the technology of a moving bed biological reactor (MBBR). Additionally, the removal of organic load is also analyzed to determine the initial design parameters, such as hydraulic retention time (HRT) and removal rate, emphasizing that the use of this methodology aims to establish standards for the region where the reactors are implemented. This reduction in concentrations is observed through removal tests by adding known concentrations of 50 mg.L⁻¹ of N-NH₄⁺ and N-NO₂⁻. During the development process of the reactors, the removal of organic load from the reactors was observed by analyzing the chemical oxygen demand (COD). Based on these base concentrations for the tests, it was observed that the concentration of 50 mg.L⁻¹ of N-NH₄⁺ was reduced to 12.4 mg.L⁻¹ of N-NH₄⁺, and the concentration of 50 mg.L⁻¹ of N-NO₂⁻ was reduced to 0.1 mg.L⁻¹ of N-NO₂⁻. Therefore, the aerobic and anoxic reactors showed efficiencies of 74.5% and <95%, respectively, establishing a minimum HRT of approximately 5 days for the reactors when considering the nitrogen load in the influent. For the organic load concentration in the effluent, the removal exceeded 95%, decreasing from 2480 mg.L⁻¹ of COD to a concentration <50 mg.L⁻¹. The results obtained, even during the initial phase of biomass development in the reactors, were impressive in terms of their potential for real-scale treatment application. For this reason, it is highly recommended to conduct a more comprehensive and extended study in order to further improve the performance of the reactors. This extension would allow for continuous analysis and optimization of influent inputs, as well as efficient removal of organic and nitrogenous loads.

Keywords: Nitrogen removal; Organic load removal; Design parameters; Biological treatment.

Resumo: Há preocupações com os resíduos gerados nos processos industriais, principalmente na indústria alimentícia. No caso especial da indústria de laticínios, essa preocupação ocorre, pois o leite e seus derivados possuem alta concentração de matéria orgânica e nutrientes, levando à geração de efluentes poluentes. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de reatores aeróbios e anóxicos em uma bancada de testes para redução de nitrogênio associada à tecnologia de reator biológico de leito móvel (MBBR). Além disso, a remoção de carga orgânica também é analisada para determinar os parâmetros iniciais do projeto, como o tempo de retenção hidráulica (TRH) e a taxa de remoção, destacando que a utilização desta metodologia, tem como intuito apresentar padrões para a região de implantação dos reatores. Essa redução das concentrações é observada por meio de ensaios de remoção adicionando concentrações conhecidas de 50 mg.L⁻¹ de N-NH₄⁺ e N-NO₂. Durante o processo de desenvolvimento dos reatores, foi observada a remoção da carga orgânica dos reatores, por meio de análise da demanda química de oxigênio (DQO). A partir dessas concentrações base para os ensaios, observou-se que a concentração 50 mg.L⁻¹ de N-NH₄⁺ foi reduzida para 12,4 mg.L⁻¹ de N-NH₄⁺, já a concentração de 50 mg.L⁻¹ de N-NO₂⁻ foi reduzida para 0,1 mg.L⁻¹ de N-NO₂⁻. Sendo assim, os reatores aeróbio e anóxico apresentaram eficiência de 74,5% e <95%, respectivamente, estabelecendo TRH mínimo para os reatores de aproximadamente 5 dias de reator, quando analisada a carga nitrogenada de entrada do efluente; para a concentração de carga orgânica do efluente, a remoção foi superior a 95%, saindo de 2480 mg.L⁻¹ de DQO para concentração <50 mg.L⁻¹. Os resultados obtidos, mesmo durante a fase inicial de desenvolvimento da biomassa nos reatores, foram impressionantes em termos do potencial de aplicação em escala real de tratamento. Por essa razão, é altamente recomendado realizar um estudo mais abrangente e prolongado, a fim de aprimorar ainda mais o desempenho dos reatores. Essa extensão permitiria a análise e otimização contínuas da entrada de efluentes, bem como a remoção eficiente das cargas orgânicas e nitrogenadas

Palavras-chave: Remoção de nitrogênio; Remoção da carga orgânica; Parâmetros de dimensionamento; Tratamento biológico.

1. Introdução

A indústria de laticínios do Brasil é uma importante atividade econômica, gerando empregos e movimentando bilhões de reais todos os anos. A produção leiteira no Brasil tornou-se uma base na geração de empregos e renda. Segundo o valor bruto da produção (Brasil, 2022), a produção de leite e seus derivados vem representando 37% da produção pecuária até setembro de 2022. Apenas em 2021 a produção de leite no país foi 3,5 milhões de litros, gerando um valor bruto de produção de R\$ 54.009.000.000, com estimativa de aumento de 0,8% no ano de 2022 (IBGE, 2021).

A cadeia produtiva do leite envolve produção, transporte, industrialização e comercialização de leite em pó, queijo, iogurte e outros derivados lácteos. No Brasil, essa cadeia se caracteriza pela presença de diversos players, desde pequenos produtores até grandes empresas multinacionais, atuando em diferentes etapas do processo produtivo.

A produção anual de leite é liderada pela Índia, que produz mais de 190 milhões de toneladas do produto. Logo em seguida estão os Estados Unidos, a China, o Brasil e a Rússia. A produção anual de leite no Brasil foi de aproximadamente 38 milhões de toneladas apenas em 2022 (Brasil, 2022). O país tem grande potencial para a produção de leite devido à sua grande área e clima favorável para a criação de gado. Além disso, o Brasil é o maior exportador mundial de carne bovina, o que reforça a importância da produção de lácteos para a economia do país (Giehl et al, 2022).

A produção de leite é uma atividade econômica muito importante para o estado de Rondônia, 9º maior produtor de leite do país (EMATER, 2021), localizado na região norte do Brasil. A pecuária leiteira responde por parcela significativa da produção agropecuária do estado, contribuindo para a geração de renda e emprego de milhares de famílias. Apenas em 2021 o estado de Rondônia produziu 741.053 litros de leite, gerando assim um valor de produção de R\$ 1,15 bilhões (IBGE, 2022).

Com a grande importância econômica da produção da indústria leiteira no país, a qualidade do leite tornou-se uma questão importante para a indústria de laticínios, pois afeta diretamente a segurança alimentar dos consumidores e a competitividade dos produtos nos mercados doméstico e internacional. Nesse sentido, surgiram esquemas de controle e certificação da qualidade do leite, como o Selo Mais Leite, que visa incentivar as boas práticas na produção e garantir a qualidade do produto final (Brasil, 2023).

Além disso, a indústria de laticínios enfrenta desafios, como o aumento da concorrência de produtos alternativos, tais como bebidas de soja e amêndoa, e a pressão para adotar métodos de produção mais sustentáveis e responsáveis, como o uso de energia renovável e a redução dos impactos da poluição ambiental (Gonçalves, 2018).

Apesar de todos os benefícios econômicos e sociais envolvidos nessa indústria, essa atividade gera grandes quantidades de águas residuárias, compostas principalmente por água, matéria orgânica e nutrientes. Se não forem tratados adequadamente, esses efluentes podem causar impactos ambientais, como contaminação do solo, águas superficiais e subterrâneas, emissão de gases de efeito estufa e odores desagradáveis (Naderloo & Baptist, 2018).

Segundo Sarava (2009), cada 1m³ de leite produzido pode gerar volume igual de efluente, já em laticínios que trabalham com diversos produtos, o volume pode chegar a 6m³. A composição dos efluentes da indústria de laticínios varia de acordo com o tipo de processo de fabricação do produto. Em geral, as águas residuais da produção de leite são ricas em proteínas, gorduras e lactose, enquanto as águas residuais da fabricação de queijos são ricas em sólidos totais e sais (Mishar et al., 2022).

Nesse sentido, diferentes tecnologias podem ser utilizadas para o tratamento de efluentes da indústria de laticínios, como lagoas de estabilização, reatores anaeróbicos, biofiltros, entre outros. Entre os reatores biológicos, destacam-se os reatores aeróbios e os reatores anóxicos, sendo que a combinação desses dois tipos tem mostrado uma eficiência ainda maior atualmente. A escolha do método mais adequado depende das características do efluente, das condições climáticas, dos requisitos legais e da exigência de mercado.

O tratamento adequado de efluentes da indústria de laticínios pode trazer diversos benefícios, como redução do impacto ambiental, melhoria da qualidade da água e do solo, recuperação de nutrientes utilizados na agricultura, redução dos custos de tratamento e melhoria da imagem corporativa perante a sociedade (Cecchetti et al, 2019).

No Brasil, as normas para o lançamento de efluentes de laticínios são regulamentadas pela legislação ambiental do CONAMA n.º 430/2011, que estabelece limites de qualidade e condições para o lançamento de efluentes em corpos hídricos.

No reator aeróbico, a oxidação do nitrogênio amoniacal pode ser realizada por bactérias do gênero *Nitrosomonas*, que convertem nitrogênio amoniacal em nitrito, e bactérias do gênero *Nitrobacter*, que convertem nitritos em nitratos. Essas bactérias, conhecidas como bactérias oxidadoras de amônia (BOA), são encontradas em diferentes tipos de ambientes, como solo, água doce e água salgada, e desempenham um papel crucial no que se refere ao tratamento de águas residuais ricas em nitrogênio (Machado, 2021).

A carga orgânica pode afetar a nitrificação. O excesso de matéria orgânica levará a uma diminuição da atividade das bactérias oxidadoras da amônia (BOAs), o que afeta a eficiência do processo de nitrificação. Por outro lado, baixas concentrações de matéria orgânica reduzem a disponibilidade de nutrientes para as bactérias nitrificantes, limitando sua atividade (Junior, 2020).

O reator anóxico é um sistema de tratamento de águas residuais que utiliza bactérias heterotróficas para remover o nitrogênio das águas residuais (Magri, 2009). Consiste em um tanque de reação deficiente em oxigênio, no qual as bactérias consomem carbono orgânico e nitrogênio, e depende de um tanque de reação aeróbico, em que as bactérias convertem nitrogênio amoniacal em nitrato ou nitrito, conforme descrito no tópico anterior.

As bactérias anaeróbicas usam o carbono orgânico presente nas águas residuais como fonte de energia e o nitrogênio como aceptor de elétrons para a respiração (Zhang & Zhou, 2007). Durante esse processo, denominado desnitrificação, o nitrato é reduzido a gás nitrogênio, que é liberado na atmosfera.

Para garantir uma desnitrificação efetiva, alguns parâmetros importantes que afetam a atividade das bactérias desnitrificantes durante o processo devem ser monitorados e controlados, como pH, temperatura, oxigênio dissolvido e nitrogênio

2. Materiais e Métodos

Nos tópicos a seguir apresenta-se a metodologia para o desenvolvimento do sistema de tratamento, desde a confecção dos reatores propriamente dita, até a metodologia analítica, apontando os cuidados necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

2.1 Desenvolvimento dos reatores

Para o desenvolvimento do sistema de tratamento em nível de bancada, foram confeccionados dois reatores e mantidos no Laboratório de Saneamento (SANEAM) da Universidade Federal de Rondônia (UNIR), campus de Ji-Paraná. Todo o processo de confecção, aclimação e período de tratamento com realização de análise foi realizado do mês de agosto de 2022 a abril de 2023.

O sistema de tratamento contava com dois reatores trabalhando de forma conjunta para a realização do tratamento, sendo o primeiro reator anóxico e o segundo reator, aeróbio; os reatores foram desenvolvidos em formato cilíndrico, com 30 cm de altura e 12 cm de diâmetro, cada um com volume útil 4 litros, sendo o volume útil de 3,2 litros e 1,6 litros de biomédias.

Os reatores contam com a tecnologia de MBBR, sendo assim, de leito móvel, utilizando biomédias de plásticas do tipo K1 da Marca Kaldness adquirido no mercado nacional, devido a sua densidade, permanecendo assim suspenso no reator com locomoção livre. O volume usado de leito móvel em cada reator foi de 1,6 litros. A Tabela 3 apresenta todas as características das biomédias.

Tabela 1 – Características do meio de suporte utilizados nos reatores

Característica	Valor	Unidade
Forma	Cilíndrica	-
Cor	Branco	-
Tamanho	10	mm
Material	Polietileno de alta densidade	
Densidade	0,96 – 0,98	g.cm-3
Superfície	>800	m ² .m-3
Porosidade	>85	%
Relação de dosagem	15-65	%
Tempo de Formação de membrana	3 – 15	dias
Temperatura aplicável	5 – 60	°C
Tempo de vida	15	anos

Fonte : Nihaowater (2023).

O leito móvel foi definido em razão de sua maior facilidade de operação, pois reduz as zonas mortas ou a colmatação, situações comuns em leitos fixos e que reduzem a eficiência dos reatores (Nocko, 2008). Nesse aspecto, a biomassa tem a possibilidade de se desenvolver tanto de forma aderida quanto de forma suspensa. Para melhor desenvolvimento da biomassa e maior eficiência no processo de nitrificação e desnitrificação, os reatores foram dispostos conforme a Figura 1, assim como o fluxo do efluente.

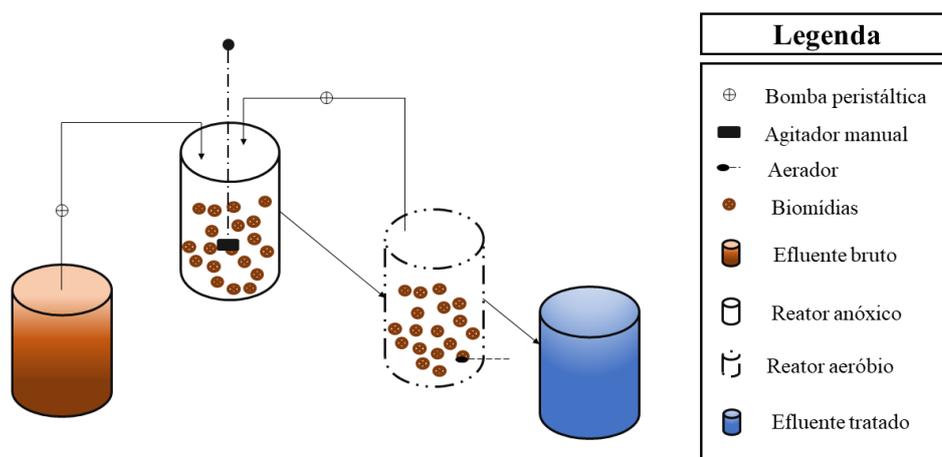


Figura 1 – Layout do sistema de tratamento.

Fonte: Sousa *et al.* (2024).

No reator anóxico foi instalado um agitador manual, devido à necessidade de a biomassa estar sempre em contato com o efluente, possibilitando assim a movimentação das biomédias no interior do reator. Já no reator aeróbio, a agitação das biomédias era proporcionada por meio da inserção de ar com um compressor. Apenas no período de ensaio, o reator aeróbio, contou com o auxílio de um agitador manual. Para manter a circulação do efluente dentro dos reatores, foram instaladas bombas peristálticas e essa circulação serviu como base para aclimação dos reatores.

2.2 Efluente sintético

O efluente sintético foi desenvolvido a partir do estudo de Silva *et al* (2013), considerando uma necessidade de adaptação do efluente sintético à realidade do efluente real coletado. Considerando uma necessidade de aclimação prévia dos reatores, adaptou-se o efluente sintético apenas para a formação e suporte de biofilme. A Tabela 2 apresenta os reagentes para a confecção de 20 litros do efluente sintético.

Tabela 1 – Reagentes utilizados para fabricar 20 litros de efluente sintético.

Reagente	Quantidade (g)
Leite em pó	28,8
Ureia	54,0
Cloreto de Amônio	11,666
Fosfato Monobásico de Potássio	18,0
Carbonato de Sódio	6,0
Bicarbonato de Sódio	15,6
Sulfato Magnésio Hepta-hidratado	12,0
Sulfato Ferroso Hepta-hidratado	0,48
Sulfato de Manganês Hidratado	0,48
Cloreto de Calcio Diidratado	0,720

Fonte: Silva, *et al* (2013).

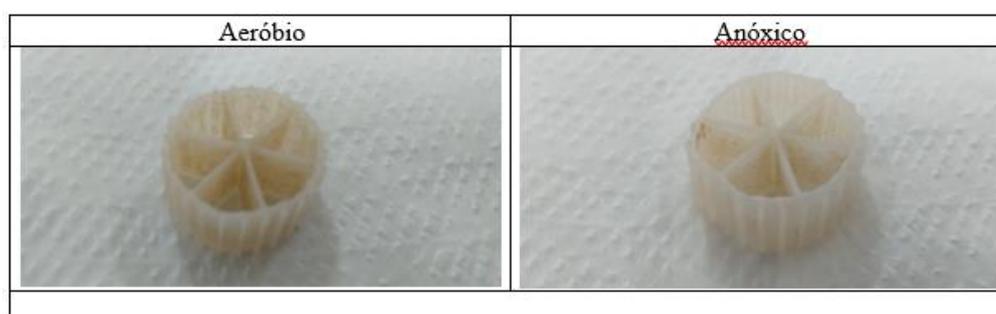
2.3 Aclimação

A aclimação do reator é um processo importante no tratamento de águas residuais, cujo objetivo é adequar a biomassa contida no reator às condições de operação. Isso é feito para aumentar a eficiência do processo e reduzir a possibilidade de erros do sistema.

Durante a aclimação, a biomassa é gradualmente exposta às condições operacionais do reator, como pH, temperatura, vazão, carga orgânica, concentração de nutrientes, entre outros parâmetros. Neste trabalho, o processo foi dividido em duas etapas, adaptando progressivamente a biomassa às condições de operação.

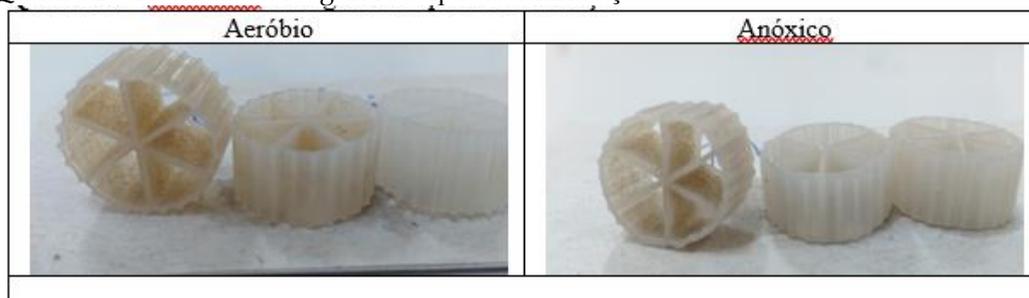
Os reatores foram alimentados com efluente sintético, produzido na proporção de 1:2 (um para dois). Tal processo deu suporte para o desenvolvimento de uma fina camada de biomassa nas biomédias, assim como biomassa suspensa no interior dos reatores. O Quadro 1 apresenta biomédias provenientes do reator aeróbio e anóxico, destacando as pequenas colônias de bactérias presentes no suporte. O quadro 1 apresenta as biomédias no primeiro estágio da aclimação.

Quadro 1 – Biomédias na primeira etapa de aclimação



A segunda etapa da aclimação ocorreu com a inserção do efluente sintético sem diluição pré-tratada, proveniente de um reator anaeróbio. Esse processo colaborou para maior desenvolvimento das biomassas tanto aderida quanto em suspensão. O Quadro 2 apresenta as biomédias no segundo estágio da aclimação.

Quadro 1 – Biomédias na segunda etapa de aclimação



O processo de aclimação durou nove meses, no entanto, os reatores não chegaram ao seu ponto máximo de eficiência de remoção, mas já apresentavam remoção considerada da carga de nitrogênio e carbono. Durante a aclimação, é importante monitorar regularmente a eficiência do processo de tratamento para detectar qualquer problema ou falha.

Nesse aspecto, os reatores passaram por adaptação no formato em três etapas distintas, buscando a melhor remoção, visto que nos dois primeiros formatos adotados foram observados problemas hidrodinâmicos, destacando a mistura do efluente e o contato com a biomassa. É importante destacar também que reatores em formato prismático detêm maior perda de carga, reduzindo assim a eficiência dos reatores. O

Quadro 3 apresenta o formato final dos reatores, o mesmo em que foram realizados os ensaios de remoção.

Quadro 2 – Aparências dos reatores durante o processo de ensaio de remoção



Além da necessidade de ajustes no formato do reator, realizando a troca das tentativas iniciais de mantê-lo em formato retangular, para forma cilíndrica para melhor distribuição do fluxo, reduzindo de forma mais significativa as zonas mortas, medidas corretivas de pH foram necessárias durante esse período, sendo utilizado como substância corretiva o bicarbonato de sódio (NaHCO_3) no reator aeróbio, devido ao baixo pH que era recorrente no início da aclimação. O pH mais ácido é um subproduto da decomposição da matéria orgânica, bem como da nitrificação presente no efluente de laticínio (Morais, 2022).

Se ocorrerem problemas, como uma queda na eficiência do tratamento, medidas corretivas podem ser tomadas para ajustar as condições de operação. Esses problemas foram acompanhados por meio da realização de análises periódicas do sistema, avaliando suas concentrações de nitrogênio e carbono. Nesse aspecto, a biomassa é exposta a condições suaves, como baixas concentrações de nutrientes e baixas cargas orgânicas. Isso permite que as bactérias presentes no reator se ajustem às novas condições e se proliferem. À medida que a biomassa se adapta, as condições de operação são gradualmente modificadas, aumentando a carga orgânica e a concentração de nutrientes.

Durante a aclimação, foram analisadas periodicamente as concentrações de nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal e demanda química de oxigênio, para determinar se os reatores poderiam receber cargas maiores desses elementos, chegando assim em estado adequado para a realização dos ensaios de remoção.

As análises de demanda química de oxigênio foram realizadas para determinar o comportamento dos reatores em relação ao consumo de matéria orgânica, sendo a carga orgânica uma fonte poluidora alta, o que pode ocasionar eutrofização no corpo receptor durante o lançamento do efluente pós-tratamento. Esses dados serão discutidos de forma individual em tópico seguinte, devido à sua importância.

2.4 Caracterização do efluente

O efluente base para o estudo é proveniente de um laticínio do estado de Rondônia, coletado em uma lagoa aeróbia, devido à presença de bactérias nitrificantes. In loco foram realizadas as análises de pH, condutividade e temperatura. Em laboratório, foram

realizadas as demais análises de nitrito, nitrato e nitrogênio amoniacal, a fim de compreender melhor as características do efluente.

Devido à necessidade de controle da carga orgânica de entrada nos reatores, bem como as concentrações de nitrogênio em cada etapa do desenvolvimento dos reatores, optou-se pela produção de efluente sintético, podendo assim ter maior controle da sua composição química e física, padronizando, então, as condições experimentais.

O efluente sintético passou por um tratamento prévio em reator anaeróbio. A Tabela 5 apresenta a caracterização do efluente sintético com tratamento prévio.

Tabela 2 – Caracterização do efluente sintético com tratamento prévio.

Parâmetros	Valores
Temperatura (°C)	28
pH	7,8
DQO (mg.L-1)	2480
NH ₄ ⁺ -N (mg.L-1)	1251,8
NO ₂ ⁻ -N (mg.L-1)	<0.1
NO ₃ ⁻ -N (mg.L-1)	8,4
NT inorgânico (mg.L-1)	1260,2

Como visto, o efluente é rico em carga orgânica, apresentando DQO de 2480 mg.L-1 e de nitrogênio, na forma de nitrogênio amoniacal, apresentando valores de 1251,8mg.L-1. Nesses casos, é preferível o processo biológico em detrimento do processo físico-químico, visto ser um efluente reconhecido com grande potencial de depuração por vias biológicas.

Dentre as tecnologias possíveis para o seu tratamento, o MBBR em reatores anóxico e aeróbios apresentam grandes vantagens, alta eficiência e um menor tempo em comparação a processos biológicos convencionais, como lagoas. A eficiência do processo MBBR é condicionada por condições operacionais, como a taxa de enchimento (FR) e oxigênio Dissolvido (OD). FR é a razão entre o volume ocupado pelos suportes e o volume total do reator — VS/VR (Santos et al., 2020).

Nesse aspecto, será observada a remoção de nitrogênio amoniacal e nitrito, por meio de ensaios de remoção com concentrações conhecidas, avaliando assim a eficiência dos reatores no processo de nitrificação e desnitrificação. Tal método foi adotado devido a diversas interferências ao longo do processo de aclimatação dos reatores, viabilizando, então, a determinação dos parâmetros.

2.5 Metodologia analítica

Para as metodologias analíticas, adotou-se aos parâmetros de pH, temperatura, condutividade, DQO, nitrogênio amoniacal e nitrito.

As análises de potencial hidrogeniônico, condutividade, oxigênio dissolvido e temperatura foram realizadas por meio do medidor multiparâmetro Hanna modelo NOVA e a AK88 da Marca AKSO. Para obter esses resultados, bastou colocar as sondas no efluente de estudo e aguardar sua estabilização.

A DQO representa a quantidade de oxigênio gasto na degradação de compostos orgânicos presentes na amostra. Para a determinação da DQO, utilizou-se o método descrito em APHA (2005), método de refluxo fechado (5220 D), que consiste na adição de solução digestora contendo dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) e sulfato de mercúrio (Hg₂SO₄); e solução catalítica, composta por sulfato de prata (Ag₂SO₄) e ácido sulfúrico (H₂SO₄), em uma alíquota da amostra em um tubo de ensaio. Após a adição dos

reagentes, a amostra foi levada à placa digestora a 150°C, da marca Dry-Block Modelo SL-16, por duas horas.

Após a digestão, as amostras foram retiradas da digestora e aguardou-se a perda de calor dessa amostra até alcançar temperatura ambiente; em seguida, foi realizada a leitura no espectrofotômetro em 600 nm, referente à DQO alta, e 420 nm, referente à DQO baixa; a partir da medição de absorvância no espectrofotômetro Vis modelo UV1100, foi possível determinar a concentração de DQO. Os resultados de absorvância obtidos no espectrofotômetro foram convertidos em concentração de DQO, por meio da curva de calibração feita a partir de Biftalato de Potássio (C8H5KO4).

Para a determinação da concentração de amônia (NH₄⁺) foi utilizado o Método Nesler 4500C (APHA, 1995), que consiste na adição do reagente Nesler, composto por iodeto de mercúrio-II (HgI₂), iodeto de potássio (KI) e hidróxido de sódio (NaOH), em uma amostra; após a adição do reagente Nesler, agitou-se a amostra e foram aguardados 10 minutos para reação e leitura no espectrofotômetro em 425 nm. Os resultados da absorvância obtidos nessa análise foram convertidos em concentração de amônia por meio da curva de calibração feita utilizando Cloreto de Amônio (NH₄CL).

Já para a determinação de nitrito, foi utilizado o Método Colorimétrico do Reagente NED 4500 NO₂ – B (APHA, 2012). A análise consistiu na adição dos reagentes sulfanilamida e reagente N-1-Naftil. Após o tempo de reação de 10 minutos, foi realizada a leitura da amostra reagida para Nitrito em 543 nm no espectrofotômetro. A curva de calibração para a determinação da concentração de Nitrito por meio dos resultados da Absorvância foi feita com nitrito de sódio (NaNO₂) e nitrito de potássio (KNO₂).

O método adotado para a determinação do Nitrato foi o Método Colorimétrico Brucina (352,1) (APHA, 1976). Tal análise utilizou soluções de ácido sulfúrico (H₂SO₄) e água destilada e soluções de brucina, compostas por sulfato de brucina ((C₂₃H₂₆N₂O₄)₂H₂SO₄·7H₂O), ácido sulfanílico (NH₂C₆H₄SO₃H) e ácido clorídrico (HCL).

Foi adicionado à amostra o reagente de Brucina e ácido sulfúrico e aguardados 10 minutos em ambiente desprovido de luz; adicionou-se água destilada e foram aguardados mais 20 minutos em ambiente desprovido de luz. Após esse período, foi realizada a leitura no espectrofotômetro em 410 nm. Para determinar a concentração de Nitrato por meio desse método, utilizou-se a curva padrão feita com Nitrato de Potássio.

2.6 Ensaio de remoção

Para os ensaios foram adotadas concentrações bases de remoção de 50 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N e NO₂--N. Na confecção do reagente de nitrito foi utilizado nitrito de sódio; para a solução de nitrogênio amoniacal, foi utilizado cloreto de amônio. Para a melhor remoção dessas concentrações, os reatores foram estabilizados nos seguintes parâmetros descritos na Tabela 5.

Tabela 4 – Parâmetros ideais para melhor remoção de nutrientes nos reatores

Parâmetro	Reator Aeróbio	Reator Anóxico
pH	7,2 a 8	7 a 7,5
Temperatura (C°)	30	30
Oxigênio Dissolvido (mg.L ⁻¹)	2 a 4	Próximo a zero
Agitação (RPM)	60	20

Fonte: Sant' Anna Jr (2013).

Durante os ensaios, as sondas multiparâmetros ficaram inseridas nos reatores para a verificação da estabilização dos parâmetros mencionados na tabela acima. Ambos os

reatores foram mantidos em banho-maria para controle de temperatura; já o controle de pH foi realizado mediante soluções de bicarbonato de sódio 1N e ácido sulfúrico 1N.

Após a estabilização desses parâmetros nos reatores, uma alíquota de 10 ml foi retirada para análise das concentrações iniciais inseridas. Ao longo do ensaio de remoção foram retiradas alíquotas de 10 ml a cada 60 minutos de ensaio de ambos os reatores e, a partir dessas amostras, foram analisadas novamente as concentrações de nitrogênio amoniacal e nitrito.

Visando atender a demanda por matéria orgânica, adicionou-se 0,65 ml de metanol (CH₃OH) no reator anóxico para obter a quantidade ideal de matéria orgânica para a desnitrificação, visto que a remoção da matéria orgânica já estava em seu máximo de eficiência. Isso ocorre devido à alta taxa de crescimento das bactérias removedoras de matéria orgânica

3. Resultados e Discussão

Nessa etapa do trabalho serão apresentados os resultados encontrados por meio das metodologias aplicadas no tópico anterior, assim como discussões a respeito dos valores obtidos.

3.1 Remoção de nitrogênio amoniacal

Devido às dificuldades na utilização das baixas vazões, foram verificadas vantagens nas aplicações de teste em batelada para retirar as taxas de remoção dos nutrientes, visto que essas limitações operacionais geraram dezenas de problemas (bomba com ausência de entrada, mangueira cortada pelo atrito, rompimento, volume maior que estipulado e afins), assim buscou-se fazer para retirar parâmetros de eficiência do processo, como será discutido neste tópico e nos outros.

A nitrificação é um processo com elevado tempo de crescimento celular se comparado aos organismos heterotróficos, que removem a DBO, devido ao baixo crescimento das bactérias nitrificantes. Isso fez o período de aclimação de nove meses ser ainda sem condições de excelência, sendo necessário um maior tempo, em que a faixa de remoção de nitrogênio amoniacal variou entre 60 a 90%.

Segundo Von Sperling (2005), para lagoas de estabilização, a taxa de nitrificação está entre 0,03 e 0,2 kg N.ha⁻¹.d⁻¹, comparando com estudos de autores que tratam do processo de nitrificação em reatores aeróbios que encontram taxas semelhantes e/ou superiores a esses valores. Vale ressaltar que ambos os processos são biológicos, o que os diferenciam é a eficiência no que se refere ao tempo de detenção hidráulico e o espaço necessário para a realização do tratamento.

Tal remoção ocorre no interior do reator aeróbio, responsável pela conversão de nitrogênio amoniacal em nitrito e em seguida nitrato. Segundo Liu et al. (2019), os reatores aeróbios podem alcançar altas taxas de remoção de nitrogênio, podendo chegar a 90%, no entanto, esses valores são determinados pela estabilização dos parâmetros de condições ótimas do reator e da concentração de nitritos e nitratos e seu interior.

Durante o ensaio de remoção de nitrogênio amoniacal, as condições ótimas foram asseguradas e mantidas em constância (pH 7,2, temperatura de 30°C e OD>4mg.L⁻¹), conforme presentes na Figura 2, proporcionando assim as melhores condições de remoção, mesmo a biomassa do interior do reator sendo jovem e não estando em sua total eficiência. Outra característica importante observada no reator foi a maior concentração de biomassa em forma suspensa do que aderida, apontando mais uma vez a jovialidade do reator.

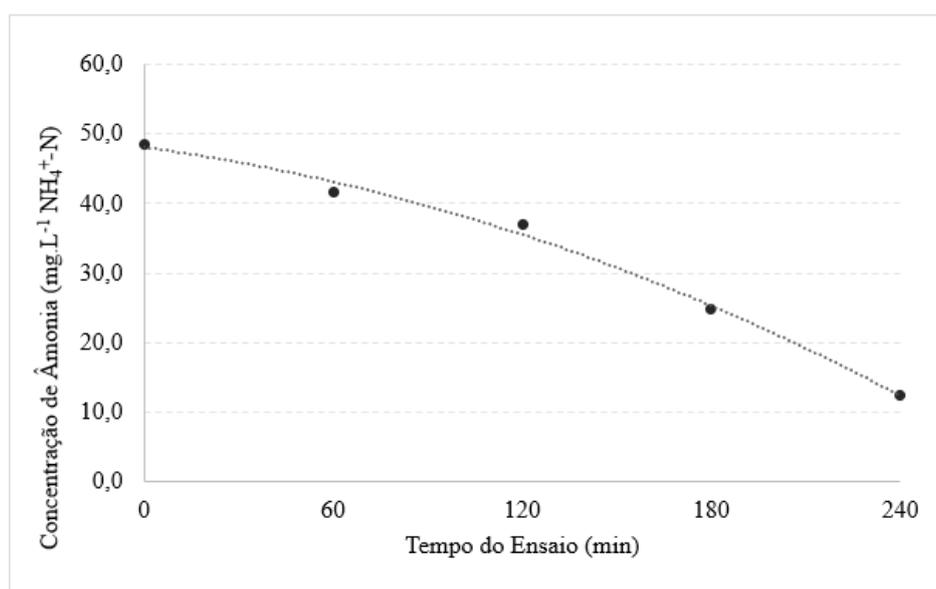


Figura 2 – Ensaio de remoção de Nitrogênio Amoniacal no Reator Aeróbio.
Fonte: Sousa *et al.* (2024).

Com tais características, o reator apresentou a taxa de remoção de 9,025 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N por hora ou 216,6mg por dia por litro de reator. Esses valores apresentam conformidade com os estudos realizados Gonçalves (2017), que encontrou valor de 72%, saindo de concentração de nitrogênio amoniacal de 30 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N para 7 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N. Valores semelhantes foram encontrados no estudo de Nonaka *et al.* (2019), que foram valores de 17 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N após o tratamento que contém concentração de 47 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N. Foram esses valores obtidos na Fase I dos respectivos experimentos, que são descritos como período de desenvolvimento inicial dos reatores, essencial para o desenvolvimento primário da biomassa.

Já Oliveira (2015) apresenta em duas fases de estudo o decréscimo de eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal, saindo de uma eficiência de 71% para 54%. Segundo a autora, essa redução é derivada da redução na concentração de oxigênio dissolvido. Na fase I, a concentração adotada foi de 4,5 mg.L⁻¹ de OD e na fase II, 2,4 mg.L⁻¹ de OD, mostrando assim a importância das condições ótimas mesmo em fase inicial do desenvolvimento do reator.

Diante do exposto, ao analisarmos o estudo de Rodrigues (2016), sobre a taxa de remoção de lagoas de estabilização em seu estado ótimo de remoção, observa-se uma remoção total de nitrogênio amoniacal de 60%, ou seja, saindo de 32 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N para 16 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N.

A partir dos valores encontrados, é possível determinar a taxa de remoção, bem como o TRH necessário para remoção de cargas nitrogenadas reais, considerando a remoção de 9,025 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N por hora. A Tabela 5 apresenta parâmetros iniciais para dimensionamento.

Tabela 3 – Parâmetros para dimensionamento inicial do reator aeróbio

Parâmetro	Valor
Taxa de Remoção (mg.L ⁻¹ .dia ⁻¹ de NH ₄ ⁺ -N)	216,6
Tempo de Retenção Hidráulica (dia)	5,78

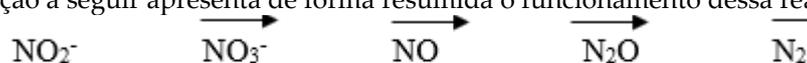
Diante da seguinte taxa de remoção, para o efluente estudado observou-se a necessidade de TRH de 5,78 dias para a nitrificação total de nitrogênio amoniacal de entrada, sendo a entrada de 1251,8 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N, considerando a remoção diária de 216,6 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N. Para esse valor de TRH, Silva (2010) apresenta uma redução para 3 mg.L⁻¹ de NH₄⁺-N, com 5 dias de TRH para concentrações de entrada semelhantes ao do presente estudo, apresentando assim a eficiência do reator.

Na reação completa de nitrificação ocorre o consumo de oxigênio na proporção para cada grama de N-NTK afluente, consome-se 4,57 g de O₂ para a conversão de g N-NO₃⁻ (Lima, 2014). A nitrificação completa é observada quando a concentração de nitrogênio amoniacal está inferior a 2 mg.L⁻¹ e nitrito 0,5 mg.L⁻¹, situação que o reator alcançou com quatro horas de ensaio.

Nesse aspecto, os resultados obtidos para a remoção de nitrogênio amoniacal durante o estudo são altamente significativos e estão em total conformidade com os limites exigidos pelo CONAMA 430/2011. Ao alcançar os limites estabelecidos, demonstra-se que o tratamento aeróbio em conjunto com a tecnologia MBBR é eficiente na remoção de nitrogênio amoniacal presente nos efluentes industriais.

3.2 Remoção de nitrito

O ensaio de remoção de nitrito foi realizado no interior do reator anóxico com concentração inicial estimada de 50mg NO₂⁻-N, devido ao seu potencial de converter no nitrito em nitrogênio gasoso por meio da desnitrificação, liberando assim o nitrogênio de forma não poluente para a atmosfera, visto que a presença de nitrato e nitrito pode ser prejudicial ao meio ambiente, bem como para a saúde humana (Gomes et al. 2021). A equação a seguir apresenta de forma resumida o funcionamento dessa reação.



Na Figura 3 é observado o ensaio de remoção de nitrito, que após 4 horas apresentou remoção total de nitrito (<0,1mg.L⁻¹). Sendo assim, consolidados os valores de material orgânico adicionado (metanol no volume de 0,1625mL.L⁻¹ com concentração de 60mg.L⁻¹ C-CH₃OH), sendo que a relação razão entre carbono e nitrogênio é, em geral, 1:1 para desnitrificação (Santos, 2003).

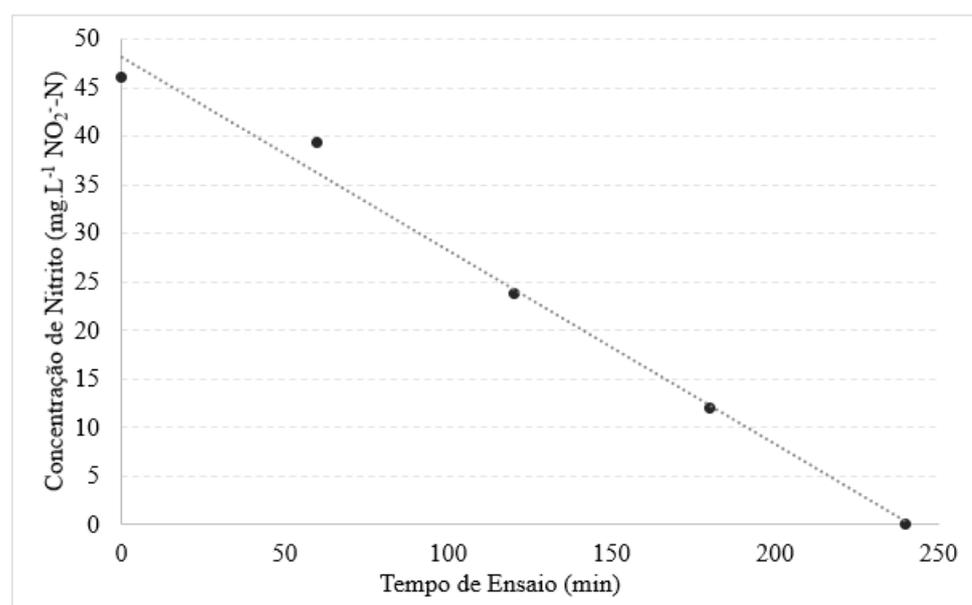


Figura 3 – Ensaio de remoção de Nitrogênio Amoniacal no Reator Aeróbio.

Fonte: Sousa *et al.* (2024).

Considerando que ao converter todo valor do nitrogênio amoniacal (1251,8 mg.L-1) na etapa anterior (tópico 3.3) em nitrito, seria necessário um TRH de 4.43 dias, inferior ao volume do tanque aeróbico, que foi de 5,78 dias. A Tabela 6 apresenta parâmetros de dimensionamento essenciais para o reator anóxico, considerando a aplicação de entrada de efluentes reais.

Tabela 4 – Parâmetros para dimensionamento inicial do reator anóxico

Parâmetro	Valor
Taxa de Remoção (mg.L ⁻¹ .dia ⁻¹ de N-NO ₂ ⁻)	282
Tempo de Retenção Hidráulica (dia)	4,43

Vale ressaltar que, apesar de ser fundamental a remoção de nutrientes nos efluentes industriais, a CONAMA 430/2011 não determina tal remoção. Assim, a taxa de remoção ficou em 11.75mg.L-1 por hora e 282 mg.L-1.dia. Essa remoção condiz com o estudo de Wagner, et al (2015), que em um ensaio de 6 horas a redução de nitrito saiu de 40 mg.L-1 de NO₂--N para 7,8 mg.L-1 de NO₂--N.

Outro aspecto na escolha da ordem dos reatores é aproveitar o material orgânico no próprio efluente para a desnitrificação que, segundo os autores Cao (2014), por sua vez, mostra que essa relação depende das características do sistema e em seu estudo a relação C/N variou de 4,28 gDQO/gN a 9,45 gDQO/gN. Assim, no efluente estudado há uma limitação de carbono, com uma relação de 1,92 gDQO/gN, e Matsumoto, Terrada e Tsuneda (2007) relatam que a eficiente remoção simultânea de C e N, mais de 80% foram obtidas com a relação C:N de 3,0.

Considerando as características do reator anóxico, é notável o seu alto desempenho na remoção de nitrito. O TRH (Tempo de Retenção Hidráulica) e a taxa de remoção do reator asseguram um tempo adequado de contato entre os contaminantes e os microrganismos presentes, resultando em uma remoção eficiente dos poluentes. É importante destacar que, mesmo a CONAMA 430/2011 não estabelecendo valores limite específicos para nitrito em efluentes industriais tratados, o valor obtido após o ensaio de remoção está abaixo do limite permitido para nitrogênio amoniacal total.

Isso indica que o reator anóxico é capaz de atingir níveis de remoção satisfatórios, contribuindo para a melhoria da qualidade dos efluentes tratados. Esses resultados demonstram a eficácia e a adequação do reator anóxico como uma solução viável para o tratamento de nitrito em diferentes setores industriais.

3.3 Remoção de matéria orgânica

Devido à alta carga orgânica encontrada em efluentes de laticínio, observou-se a concentração de DQO durante o período de aclimação dos reatores, avaliando assim a remoção dessa carga orgânica. Os dados aqui discutidos são referentes a 13 semanas de aclimação, sendo analisado o efluente de saída dos reatores. A Figura 4 apresenta tais dados de DQO, descrevendo a remoção obtida.

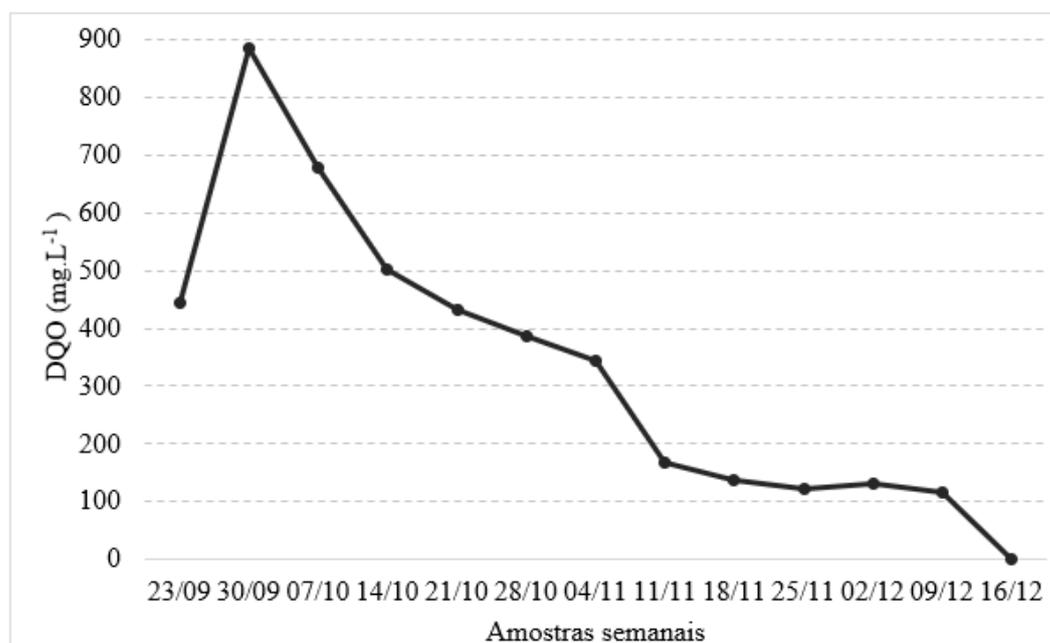


Figura 4. Demanda química de oxigênio durante o processo de aclimação.
Fonte: Sousa *et al.* (2024).

Como apresentado na figura, após 13 semanas de desenvolvimento dos reatores, a concentração obtida de DQO do afluente foi inferior a 50 mg.L⁻¹, observando que a DQO de saída é inferior à de entrada do reator, que é de 2480 mg.L⁻¹ de DQO.

Embora a Conama 430 de 2011 não estabeleça valores para DQO, ela delimita padrões de carga orgânica para efluentes industriais em forma de demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Sendo determinada “remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor” (Brasil, 2011).

Segundo Melo (2022), a diferença entre a DBO e DQO é dada pela forma de oxidação da matéria orgânica. Enquanto a DBO utiliza de meios biológicos para o processo de oxidação, a DQO utiliza de compostos químicos, que degrada também matéria inorgânica, incluindo compostos químicos.

As altas taxas de remoção orgânica em processos de tratamento biológico podem ser atribuídas em parte ao desenvolvimento de espécies bacterianas responsáveis pela degradação de compostos orgânicos. Conhecidas como bactérias decompositoras, essas bactérias têm habilidades metabólicas superiores às bactérias nitrificantes e bactérias desnitrificantes, e são explicadas por terem alta eficiência na remoção de matéria orgânica mais rapidamente (Maia, 2022).

Bactérias oxidadoras de matéria orgânica podem usar uma variedade de compostos orgânicos como fontes de carbono e energia para o metabolismo. Essas bactérias são metabolicamente versáteis e possuem enzimas especializadas capazes de quebrar uma variedade de substratos orgânicos complexos, como proteínas, carboidratos e lipídios.

A remoção da carga orgânica por meio da DQO no período inicial de análise chegou a 82,6 % no primeiro mês de aclimação, que é uma remoção considerada aceitável, encontrando valores semelhantes nos estudos de Alberti (2020), que obteve taxa remoção de 90% na Fase I do seu estudo. Ao acompanhar o desenvolvimento do reator, obteve-se, na última análise, remoção superior a 97%. Tal valor é corroborado por meio do estudo de Silva (2018) e Alberti (2020), que obtiveram taxa de remoção de 94% e 96%, respectivamente, na Fase III desenvolvimento de seus reatores.

Apesar de os parâmetros estabelecidos pela CONAMA 430/2011 para a matéria orgânica serem baseados na demanda bioquímica de oxigênio (DBO), as concentrações de

demanda química de oxigênio (DQO) encontradas foram consideradas satisfatórias, levando em conta que os reatores não estavam operando em sua condição ideal. Esse sistema integrado de tratamento demonstrou sua eficiência ao remover completamente a matéria orgânica presente nos efluentes. Esses resultados ressaltam a capacidade do sistema aeróbio-anóxico em remover de forma efetiva e completa a matéria orgânica, contribuindo para a preservação do meio ambiente e a obtenção de efluentes tratados de alta qualidade.

4. Conclusão

Por meio da análise de remoção das concentrações de nitrogênio amoniacal e nitrito, pode-se observar que os reatores apresentam eficiência considerável de remoção, com 4 horas de ensaio, chegando a concentrações aceitáveis pela legislação vigente. Isso se estende à concentração de matéria orgânica, que também foi removida de forma considerável.

O sistema MBBR para tratamento de efluente de laticínio apresenta grande potencial, porém o processo de aclimatação deve ser acelerado. Apresentou taxas de remoção de nitrogênio amoniacal próximas de 220 mg.L⁻¹.dia de reator, e com taxas de desnitrificação de 282mg.L⁻¹.dia, em que toda a matéria orgânica pode ser removida no processo anóxico, apresentando assim TRH de aproximadamente 5 dias, mesmo não estando em seu estado ótimo de operação.

Processos como esse devem ser implementados visando a nitrificação e desnitrificação, o favorecimento de um ambiente equilibrado e a remoção de matéria orgânica para atender a normativas, visto que os resultados obtidos demonstram a viabilidade e eficácia do tratamento aeróbio em reatores MBBR para remoção de nitrogênio amoniacal, oferecendo uma solução promissora e confiável para a indústria em conformidade com as regulamentações ambientais aplicáveis.

Recomenda-se que seja conduzido o referido estudo com a implementação da aclimatação acelerada, com o intuito de maximizar a eficiência dos reatores. É proposto realizar o experimento mediante a introdução tanto de efluente sintético quanto de efluente real, a fim de viabilizar a sua aplicação em indústrias do ramo laticinista. Tal abordagem permitirá uma análise mais abrangente dos parâmetros de desempenho, garantindo a obtenção de resultados robustos e de maior relevância científica para o setor industrial em questão.

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referência bibliográfica

- APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association. 14th Edition, Washington, USA, 1976.
- APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association. 18th Edition, Washington, USA, 1992.
- APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association. 21th Edition, Washington, USA, 2005.
- APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association. 22st Edition, Washington, USA, 2012.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução Nº 357/2005. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em 10/06/2022 http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf. Acesso em: 10 junho 2022.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2023.

- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011. Seção 1, p. 81-84. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/res43011.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2023.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano Mais Pecuária: estratégias para o crescimento sustentável da pecuária no Brasil. Brasília: MAPA, 2018.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Selo Mais Leite. Brasília: MAPA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/selo-mais-leite>. Acesso em: 03 abr. 2023.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Selo Mais Leite. Brasília: MAPA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/selo-mais-leite>. Acesso em: 03 abr. 2023.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Valor Bruto da Produção Agropecuária (VBP - 2022). Disponível em: [http://www.reformaagraria.mg.gov.br/images/documentos/VBP_10_2022\[1\].pdf](http://www.reformaagraria.mg.gov.br/images/documentos/VBP_10_2022[1].pdf). Acesso em: 11 de maio de 2023.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/leite>. Acesso em: 03 de abril de 2023
- DEZOTTI, M; SANT'ANNA JR, G; BASSIN, J, P. Processos Biológicos Avançados: para tratamento de efluentes e técnicas de biologia molecular para o estudo da diversidade microbiana. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.
- FILHO, E, N, G. Análise Da Eficiência De Um Sistema Com Reatores De Leito Móvel Com Biofilme (MBBR) Na Remoção De Matéria Orgânica E Nitrogênio De Um Efluente De Laticínio. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Engenharia Ambiental. Fundação Universidade Federal de Rondônia.
- GIEHL, A. L.; MARCONDES, T.; MONDARDO, M. Proporção de Bezerros Machos e Fêmeas Nascidos em Santa Catarina: dimensionamento e efeitos de praticas de manejo da pecuária leiteira sobre os resultados. XV Encontro de Economia Catarinense, 2022.
- GOMES, Larissa Coelho Auto et al. Nitrite build-up effect on nitrous oxide emissions in a laboratory-scale anaerobic/aerobic/anoxic/aerobic sequencing batch reactor. *Revista Ambiente & Água*, v. 16, 2021.
- GONÇALVES, V. J. L.; SILVA, L. R.; OLIVEIRA, L. S. Sustentabilidade na indústria leiteira brasileira. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 7, n. 3, p. 211-228, 2018.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Pecuária Municipal: Tabela 7 - Produção de origem animal, por tipo de produto, segundo o Brasil, as Grandes Regiões e as Unidades da Federação. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=resultados>. Acesso em: 08 de abril de 2023
- JÚNIOR, M. A. V.; DE AZEVEDO, F. G.; FERREIRA, F. G. D. Tratamento de Efluentes Proveniente de Indústria de Bebidas Através da Associação de Reatores Aeróbios. *Revista Eletrônica da Estácio Recife*, 2020.
- LIMA, F. Biorreator Combinado Anóxico-Aeróbio De Leito Fixo Para Remoção De Matéria Orgânica E Nitrogênio De Efluente Lácteo. Dissertação apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas. Universidade Federal De Alfenas UNIFAL. Poços de Caldas. Minas Gerais. 2014.
- Liu, Y., Ye, L., Zhu, X., Hu, Z., Zhang, H., & Huang, J. (2019). Nitrogen removal performance and microbial community of a sequencing batch reactor treating real municipal wastewater. *Bioresource Technology*, 289, 121722.
- MACHADO, Paula Thainá Rodrigues. Avaliação da aplicação da espécie *Bacillus subtilis* no tratamento de meio sintético com alta carga nitrogenada. Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2021.
- MAGRI, M, E. Nitrificação e pré-desnitrificação de esgoto sanitário no sistema: tanque anóxico + decanto-digestor + biofiltro aerado submerso com cascas de ostras como meio suporte. Dissertação: Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.
- MAIA, Fernanda Cunha. A Avaliação Da Influência Da Intermitência Na Aeração Sobre A Remoção De Nitrogênio De Um Reator De Bateladas Sequenciais Contendo Lodo Granular Aeróbio Tratando Esgoto Sanitário. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2022.
- MATOS, Antônio Teixeira de. *Poluição Ambiental: impactos no meio físico*. Editora UFV, 2020.
- MATSUMOTO, S.; TERADA, A.; TSUNEDA, S. (2007). Modeling of membrane-aerated biofilm: effects of C/N ratio, biofilm thickness and surface loading of oxygen on feasibility of simultaneous nitrification and denitrification. *Biochemical Engineering Journal*, v. 37, n. 1, p. 98-107.
- MELO, G. B. Determinação e correlação dos parâmetros demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio e carbono orgânico total em águas superficiais. 2022. Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Bacharelado em Química da Universidade Federal do Ceará, 2022.

- METCALF e EDDY. Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse. New York: McGraw-Hill, 1334 p, 2003
- MISHRA, A. K.; DASH, R. R.; YADAV, R. K.; NATH, S. K. Dairy wastewater treatment and reuse: A review. *Journal of Environmental Management*, v. 303, p. 115-130, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.117150.
- MORAES, Alessandra Stephany Bezerra de. Correlação entre os três métodos de quantificação de matéria orgânica: demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio e carbono orgânico total, para análise de biofertilizantes derivado da biodigestão anaeróbica. Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Química Bacharelado da Universidade Federal do Ceará 2022.
- MORAIS, Juliana Cardoso de. Remoção de Matéria Orgânica e Nitrogênio em Reator Compartimentado Anaeróbio/Anóxico e Aeróbio Tratando Esgoto Doméstico. Tese apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE, 2015.
- NADERLOO, L.C.; BAPTISTA NETO, J.A.; RAMOS, A.M. Impactos ambientais do descarte de efluentes de laticínios: um estudo de caso no município de Ubá/MG. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 22, n. 1, p. 224-233, 2018.
- NIHAOWATER. Meios filtrantes MBBR. Disponível em: <https://www.nihaowater.com/product/mbbr/>. Acesso em: 04 de abril de 2023.
- NOCKO, L, M. Remoção de carbono e nitrogênio em reator de leito móvel submetido à aeração intermitente. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- OLIVEIRA, Daniel Vieira Minegatti de. Avaliação da remoção de nitrogênio via nitrificação e desnitrificação simultânea em um reator biológico com leito móvel (IFAS). 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- OLIVEIRA, J. C. V.; SANTOS, J. S. S. Leite no Brasil: um setor em transformação. Brasília: Embrapa, 2019. (Documentos, 114).
- RODRIGUES, Valéria Antônia Justino. Influência do sedimento no processo de remoção de nitrogênio por nitrificação/desnitrificação em lagoas de polimento. Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- SAAVEDRA FLORES, Rosa Yoreli; TEJADA REYES, Claudia Elizabeth. Efecto del tiempo de residencia en el tratamiento de aguas residuales domesticas en un UASB cilíndrico. 2023.
- SANTIAGO, V. M. J. COELHO, ELOISA, B. A. P. C; ZANETTE, C. L; ALMEIDA, J. H. C. Nitrificação em biodisco. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Foz do Iguaçu, Paraná, 1997.
- SANTOS, E, D. Influência da Relação Carbono/Nitrogenio e da Fonte de Carbono no Processo de Nitrificação Desnitrificação Simultanea em Reator de Leito Estruturado. Dissertação – Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- SANTOS, S. G. (2003). Utilização de metanol, etano e metano como doadores de elétrons para a desnitrificação. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- SARAIVA, C. B.; MENDONÇA, R. C. S.; SANTOS, A. L.; PEREIRA, D. A. Consumo de água e geração de efluentes em uma indústria de laticínios. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, v. 64, n. 367, p. 10-18, 2009.
- SILVA, Ana Cristina Ferreira Moreira da Tratamento de resíduos líquidos de laticínios em reator anaeróbio compartimentado seguido de leitos cultivados / Ana Cristina Ferreira Moreira da Silva. -- Campinas, SP: [s.n.], 2010.
- SILVA, F.K. ; EYNG. J. O tratamento de águas residuais de indústria de laticínios: um estudo comparativo entre os métodos de tratamento com biofiltro e com o sistema convencional de lagoas. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*. Florianópolis, v. 1, n. 2, p. 4 – 22, out.2012/mar.2013.
- SILVA, N. T. M. Remoção de Carbono e Nitrogênio de Efluente de Matadouro em Reator Anaeróbio-Aeróbio de Leito Fixo. 2018. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.
- TEIXEIRA, Ruan Otavio; BARRETO, Jherysya Barros; DANTAS, José. Avaliação De Sistema De Lagoas De Estabilização No Semiárido Brasileiro. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 1, p. 295-311, 2021.
- TEOBALDO, M. C. S. Avaliação do Desempenho de Reatores Combinados Anaeróbio-Aeróbio na Remoção de Matéria Carbonácea Utilizando Diferentes Meios Suportes. (Trabalho de Conclusão de Curso). Departamento Acadêmico de Ambiental, Universidade Tecnológica Federal de Paraná. Campo Mourão. Paraná, 2017.
- VAN HAANDEL, A.C.; MARAIS, G. O comportamento do sistema de lodos ativados – Teoria e aplicações para projetos e operação. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, 1999.
- Von Sperling, M. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

-
- WAGNER, Jamile; COSTA, Rejane Helena Ribeiro da. Reator em bateladas sequenciais de grânulos aeróbios: estudo da formação dos grânulos e do efeito da duração do ciclo na remoção de carbono, nitrogênio e fósforo de esgoto doméstico. *Eng. Sanit. Ambient.*, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 269-278, Jun. 2015.
- ZHANG, P;; ZHOU, Q. Simultaneous Nitrification and Denitrification in Actited Sludge System Under low Oxygen Concentration. *Environmental Science Engineering*, v. 1, n. 1, p49-52, fev. 2007.