

II-226 - CARACTERIZAÇÃO DE FOTOGRANULO AERÓBIO EM TRATAMENTO DE ESGOTO SINTÉTICO COM ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS VARIADAS

Izaias Marcelino de Lima Neto⁽¹⁾

Estudante do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental - CEAGRI – UFRPE, Bolsista de Iniciação Científica do CNPq.

Henrique Cesar Guedes Campos⁽²⁾

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / UFPE

Talita Marinho⁽³⁾

Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / UFPE.

Bruna Scandolara Magnus⁽⁴⁾

Docente/pesquisadora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– CTG – UFPE.

Maria de Lourdes Florencio dos Santos⁽⁵⁾

Docente/pesquisadora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– CTG – UFPE

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901 – Brasil – Tel: (81) 2126-8000 – e-mail: izaiasmarcelino022@gmail.com

RESUMO

Os resultados desta pesquisa basearam-se na hipótese de investigar a inoculação de microalgas em sistemas de lodo granular aeróbio para otimizar os processos de remoção de micronutrientes e matéria orgânica. O objetivo principal foi caracterizar e avaliar os aspectos morfológicos e funcionais do lodo granular aeróbio em simbiose com microalgas, cultivados no tratamento de esgoto sintético mediante distintas estratégias operacionais. Para abordar a hipótese proposta, operaram-se dois fotobiorreatores em bateladas sequenciais, empregando ciclos de alimentação e iluminação artificial. Os resultados evidenciaram a formação e desenvolvimento contínuo dos fotogranulos aeróbios ao longo do tempo, destacando eficiências estáveis na remoção de matéria orgânica e nitrogênio amoniacal. Sobressai o processo de granulação, completo, estável e eficiente, contribuindo significativamente para o avanço de tecnologias de tratamento mais eficazes e sustentáveis. Portanto, foi possível concluir que a inoculação de microalgas nos sistemas de lodo granular aeróbio representa uma estratégia promissora para o tratamento de efluentes domésticos, proporcionando não apenas uma melhoria na qualidade da água, mas também contribuindo para a preservação do meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Fotogranulos aeróbios, microalgas, tratamento de efluentes.

INTRODUÇÃO

A pesquisa na área de tratamento de efluentes tem experimentado notável progresso, concentrando esforços no desenvolvimento de métodos eficientes para a remoção de poluentes, visando à preservação dos recursos hídricos. Destaca-se, nesse contexto, o emprego do lodo granular aeróbio (LGA), cujas vantagens sobre os sistemas convencionais, como os de lodos ativados, são evidentes. Especificamente, o LGA demonstra superioridade na remoção de matéria orgânica e nutrientes, além de apresentar um perfil de produção de lodo mais reduzido e maior estabilidade operacional (Nancharaiah e Reddy, 2017; Schambeck *et al.*, 2020).

A estrutura distintiva do LGA, composta por agregados microbianos de forma compacta e arredondada, desempenha um papel fundamental em sua eficácia na remoção de poluentes. Esses agregados possuem microzonas internas que oferecem condições metabólicas específicas para diferentes grupos de bactérias (De Kreuk *et al.*, 2005; Liu e Tay, 2002) ampliando ainda mais a capacidade do LGA em lidar com uma variedade de contaminantes.

Apesar das promissoras características do LGA, sua aplicação em larga escala enfrenta desafios significativos, como a necessidade de caracterização precisa da biomassa granular e o desenvolvimento de estratégias para manter a eficiência ao longo do tempo (Rolleberg *et al.*, 2020).

Nesse cenário, uma abordagem inovadora ganha destaque: os fotogrânulos aeróbios. Formados em fotobiorreatores de bateladas sequenciais (FRBS), em consórcio com microalgas, esses sistemas demonstram uma eficiência notável na remoção de poluentes, superando os grânulos convencionais.

A biomassa fotogrgranular é uma estrutura densa, compacta, regular e com diâmetro que pode variar de 0,2 a 5,0 mm, formada a partir do auto agregação do consórcio de microrganismos e substâncias poliméricas extracelulares (EPS), considerado uma tecnologia bastante promissora, uma vez que não necessita de material suporte para o crescimento do biofilme (Huang *et al.*, 2015). Diversos estudos reportaram que os sistemas com fotogrânulos aeróbios são formados em um menor período de operação, conferem um maior período de estabilidade da biomassa e apresentam maiores eficiências de remoção de poluentes para as mesmas condições aplicadas aos grânulos convencionais (Liu *et al.*, 2017; Sales *et al.*, 2022; Ye *et al.*, 2018).

Apesar das vantagens previamente destacadas, a maioria dos estudos sobre LGA e sua forma em consórcio com microalgas (LGAB) estão limitados a ambientes laboratoriais, utilizando esgoto sintético como fonte (Wagner e Da Costa, 2013; Ahmad *et al.*, 2017; Da Silva *et al.*, 2021). Além disso, enfrentam-se desafios significativos na otimização da remoção eficiente de fósforo e na fase de desnitrificação. Adicionalmente, há desafios consideráveis a serem superados na busca pela otimização da eficiência na remoção de fósforo e na fase de desnitrificação. Dessa forma, com o intuito de aprimorar a compreensão dos processos que impactam o desenvolvimento, a estabilidade e a eficiência de tratamento, este estudo buscou avaliar a influência de diferentes estratégias de mistura no desenvolvimento da biomassa granular e no consórcio algal-bacteriano em reatores de bateladas sequenciais, empregando esgoto sintético de baixa carga orgânica.

OBJETIVOS

Caracterizar e avaliar os aspectos morfológicos e funcionais no desenvolvimento do lodo granular aeróbio em consórcio com microalgas, cultivados no tratamento de esgoto sintético sob diferentes estratégias operacionais. Avaliando a eficiência de remoção de matéria orgânica carbonácea e nutrientes do sistema.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Investigar as características morfológicas iniciais e em desenvolvimento do lodo granular e das microalgas
2. Avaliar a eficiência do sistema na remoção de matéria orgânica carbonácea e nutrientes, considerando diversas fases de desenvolvimento e condições operacionais.
3. Realizar experimentos sob diferentes estratégias operacionais, incluindo variações na taxa de aeração, para compreender o impacto nas características morfológicas e funcionais do sistema.

METODOLOGIA

Utilizando dois fotobiorreatores de escala laboratorial, operando por 120 dias em bateladas sequenciais para tratar esgoto sintético. O experimento compreendeu duas fases: a inicial de *start-up* e a subsequente de maturação dos fotogrânulos aeróbios.

SISTEMA EXPERIMENTAL



Os fotobiorreatores possuem 1,0 m de altura, 74 mm de diâmetro e um volume útil de 4,0 L. Operando em ciclos de 6 horas, as fases incluíram alimentação anaeróbica ascendente (60 min), reação aeróbia (264-282 min), reação anóxica (15 min), sedimentação (20-2 min) e descarte (1 min). As condições operacionais estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo das condições operacionais

	Fase start-up			Fase de maturação		
	Var (cm/s)	VT (%)	TDH (h)	Var (cm/s)	TV (%)	TDH (h)
FRBS 1	0,3	50	12	0,5	50	12
FRBS 2	0,5	50	12	0,5	75	8,5

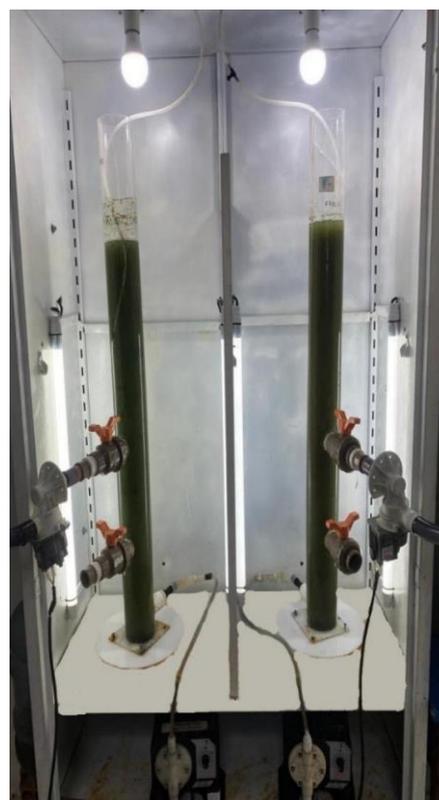
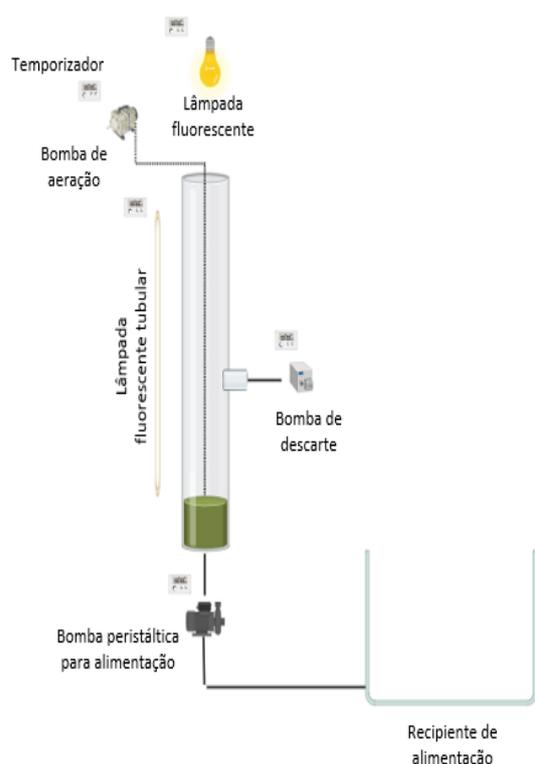


Figura 1 – Esquema (a) dos Fotobiorreatores e (b) FRBS em operação

INÓCULO MICROBIANO E AFLUENTE SINTÉTICO

A formação do consórcio do inóculo resultou da combinação de lodo ativado de um tanque de aeração da Estação de Tratamento de Esgoto do grupo Petrópolis, localizada em Pernambuco, com a seleção de microalgas. Baseado no experimento de Álvarez-díaz *et al.* (2017), que obteve resultados mais favoráveis no tratamento de esgoto usando biomassa algal com inóculo de *Chlorella vulgaris*, o inóculo de microalgas proveniente de uma lagoa de alta taxa de uma Estação de Tratamento de Esgoto, localizada próximo ao local de pesquisa, proporcionou diversidade de espécies. A inoculação dos reatores foi conduzida com uma mistura controlada, este inóculo junto, possuía 3,4 gSST/L. foi inoculado 1L de lodo ativado e 1L microalgas para promover diversidade microbiológica. A proporção exata foi determinada estrategicamente, sendo sua

proporção 1:2 (lodo:microalgas).

O afluente sintético, simulando esgoto doméstico com uma concentração inicial de DQO de 358,7 mg/L, foi preparado utilizando uma mistura de glicose como fonte de carbono. Este afluente foi formulado seguindo os padrões de Huang *et al.* (2015), com concentrações controladas de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P). Essa abordagem assegurou a reprodução controlada das condições encontradas em esgotos domésticos, proporcionando um ambiente propício para o desenvolvimento do consórcio microbiológico.

Essa formulação busca oferecer quantidades controladas desses micronutrientes para atender às exigências específicas do experimento. Além dos micronutrientes mencionados anteriormente, a composição do afluente também abrange macronutrientes expressos em gramas por litro (g/L). As concentrações específicas desses macronutrientes serão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Solução de macronutrientes

COMPONENTE	FÓRMULA MOLECULAR	CONCENTRAÇÃO (g/L)
Fosfato inorgânico	P-PO ₄ ³⁻ /L, KH ₂ PO ₄	0,86
Nitrogênio Amoniacal	N-NH ₄ ⁺ /L, NH ₄ C	6,0
Cálcio	Ca ²⁺ /L, CaCl ₂	0,1
Magnésio:	Mg ²⁺ /L, MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,1
Ferro	Fe ²⁺ /L, FeSO ₄ ·7H ₂ O	0,045
Bicarbonato de Sódio	NaHCO ₃	45,0

Fonte: HUANG *et al.* (2015).

MONITORAMENTO DOS REATORES

As amostras de afluente sintético (AF), licor misto (LC) e efluente (EF) foram coletadas bissemanalmente para monitoramento físico-químico e caracterização da biomassa. Análises de íons (nitrato e nitrito) ocorreram por meio de cromatografia de íons. As análises físico-químicas (DQO e nitrogênio amoniacal) foram conduzidas conforme as metodologias estabelecidas pelo "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater" (APHA, 2017) duas vezes por semana, contribuindo para a avaliação completa da eficiência do sistema, enquanto a série de sólidos foi semanal. Esse monitoramento amplo permitiu avaliar o desempenho do sistema em várias fases e condições operacionais.

A caracterização morfológica da biomassa foi realizada por meio de microscopia óptica, proporcionando perspectivas sobre o desenvolvimento do lodo granular e das microalgas ao longo do experimento. Análises de granulometria determinaram o tamanho das partículas nos reatores A Tabela 3 fornece detalhes sobre os parâmetros físico-químicos, método analítico, referência e a frequência de análise ao longo do experimento.

Tabela 3 - Parâmetros físico-químicos monitorados

Parâmetro	Método de análise	Referência	Frequência de análises



OD, T e pH	Sonda Multiparâmetro	Multiparâmetro Hach HQ40d	Bissemanal
DQO filtrada	Colorimétrico	SM 5220 D	Bissemanal
Nitrito (N-NO ₂ -)	Íons	SM 4500 NO ₂ - B	Bissemanal
Nitrato (N-NO ₃ -)	Íons	SM 4500 NO ₃ - E	Bissemanal
Nitrogênio Amoniacal (N-NH ₄ ⁺)	Titulométrico	SM 4500 N-NH ₃ C	Bissemanal
Fósforo total e ortofosfato	Vanadato-molibdato	SM 4500 P D	Bissemanal
Série de sólidos	Gravimétrico	SM 2540	Semanalmente

Legenda: OD – Oxigênio Dissolvido (mg/L), T – Temperatura (°C), pH – Potencial Hidrogeniônico

RESULTADOS

O desenvolvimento da biomassa nos fotobiorreatores em bateladas sequenciais (FRBS1 e FRBS2) mostrou uma evolução notável, fotogrânulos aeróbios começaram a se formar após 21 dias no FRBS1 e 40 dias no FRBS2, atingindo maturidade aos 84 dias em ambos os reatores conforme mostram as figura 2 e 3.

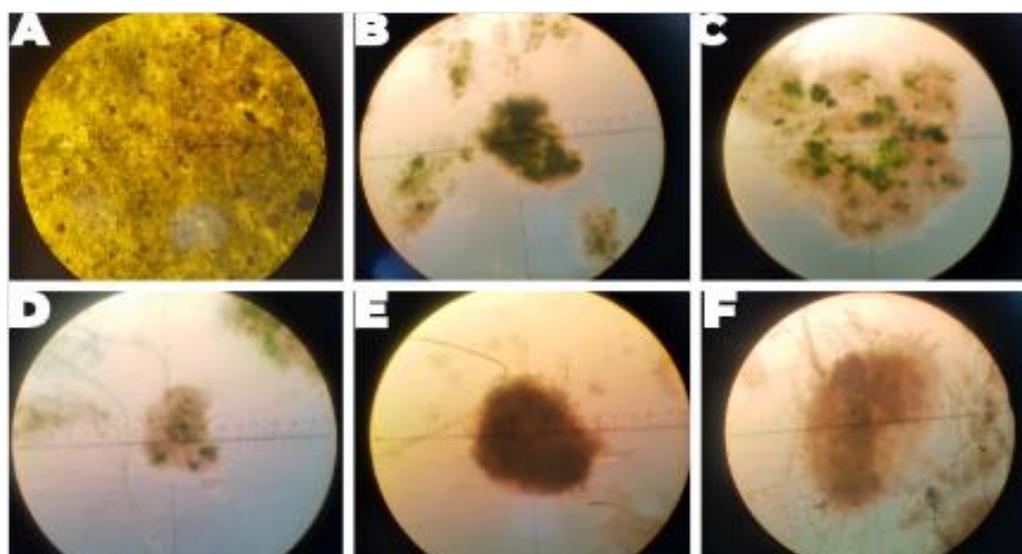


Figura 2- Desenvolvimento da biomassa do FRBS1 utilizando microscópio óptico com ampliação de 100x.

(A) inóculo; (B) 21 dias; (C) 40 dias; (D) 55 dias; (E) 69 dias; (F) 84 dias.

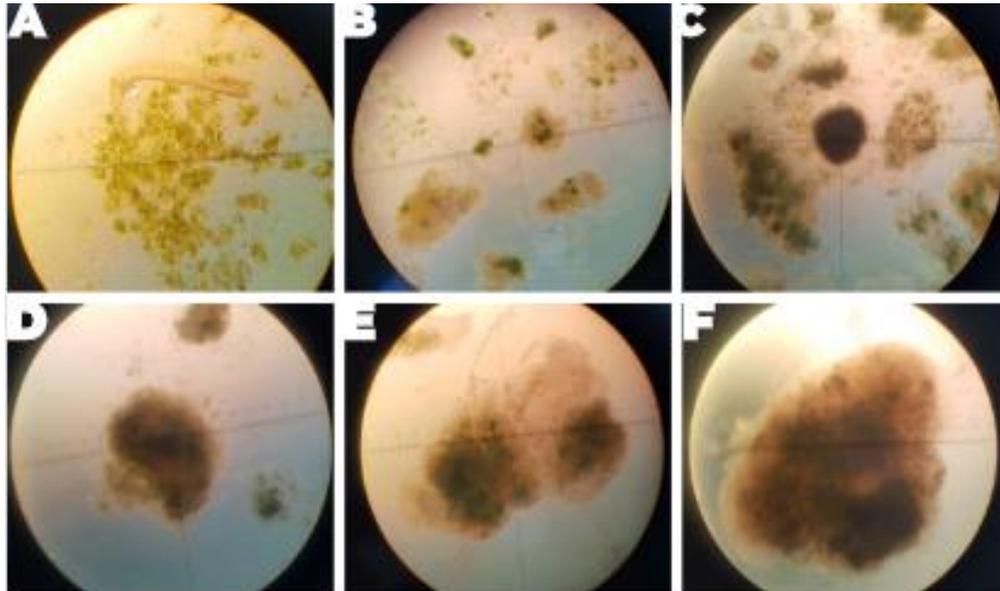


Figura 3- Desenvolvimento da biomassa do FRBS2 utilizando microscópio óptico com ampliação de 100x.

(A) inóculo; (B) 21 dias; (C) 40 dias; (D) 55 dias; (E) 69 dias; (F) 84 dias.

A Granulometria revelou grânulos adaptados, predominantemente superiores a 2,8 mm ao final do experimento, indicando eficiente sedimentação. Nos FRBS1 e FRBS2, os grânulos tomaram-se mais densos e esféricos após 69 dias, culminando em biomassa majoritariamente composta por grânulos maduros e compactos conforme mostram as Figuras 4 e 5.

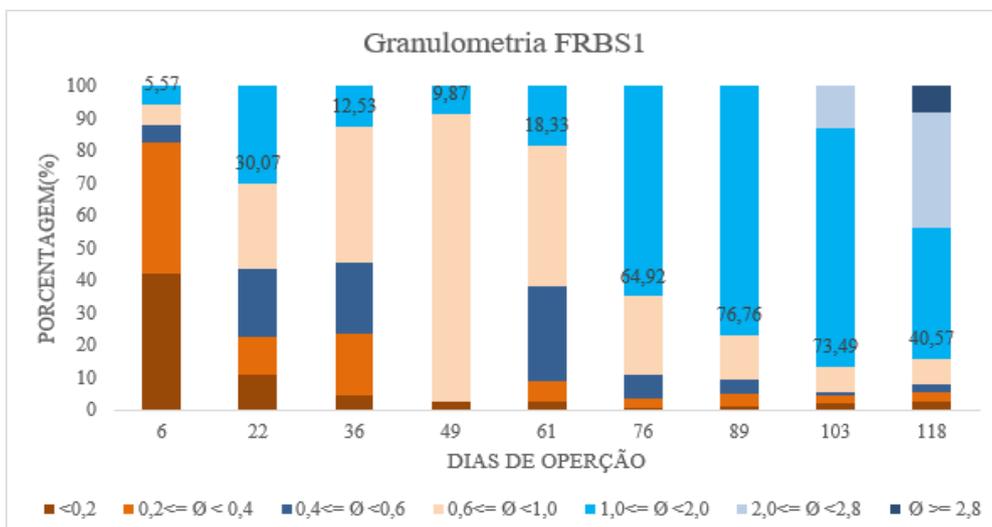


Figura 4- Classificação granulométrica do FRBS1 (o número em evidência representa o percentual de grânulos com diâmetro acima de 1mm)

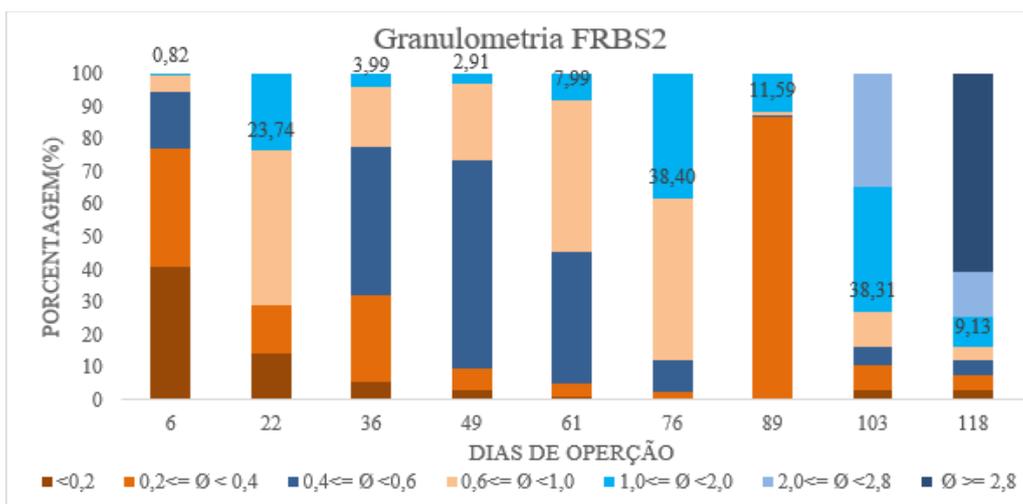
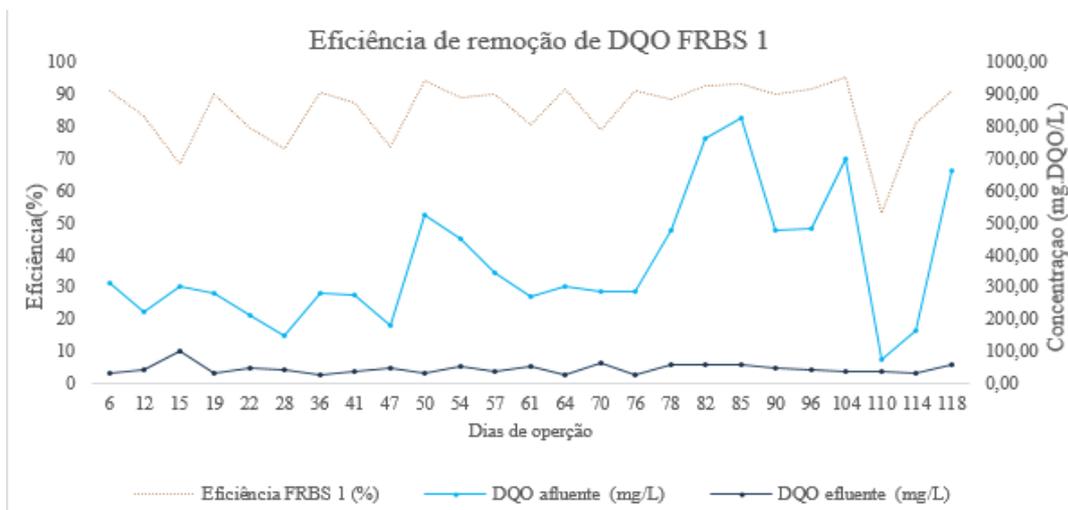


Figura 5- Classificação granulométrica do FRBS2 (o número em evidência representa percentual de grânulos com diâmetro acima de 1mm)

No âmbito da remoção de carga orgânica e nutrientes, o sistema de lodo granular aeróbio algal-bacteriano (LGAB) demonstrou uma eficiência notável, superando os sistemas convencionais de lodo ativado. Durante a fase inicial de *start-up*, embora as eficiências de remoção de DQO em ambos os reatores tenham apresentado instabilidade, as concentrações no efluente foram mantidas em níveis reduzidos.



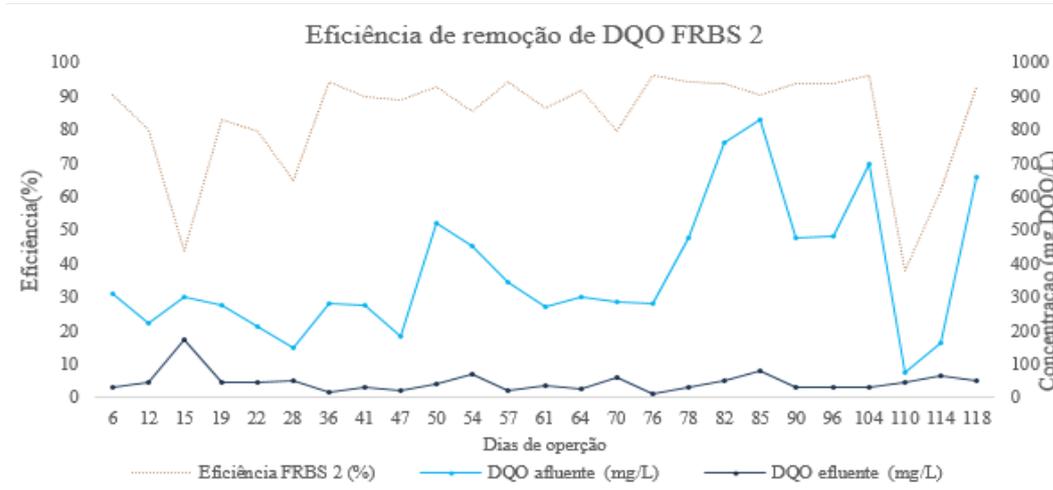
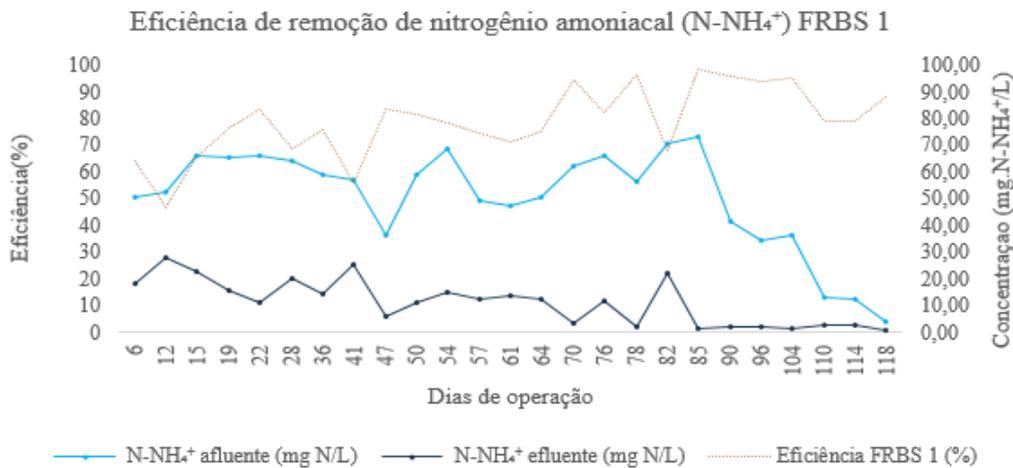


Figura 6– DQO afluente, efluente e eficiência de remoção no FRBS1 (acima) e FRBS2 (abaixo).

Além disso, destaca-se a notável eficiência dos reatores na remoção de nitrogênio amoniacal ($N-NH_4^+$) presente no afluente, alcançando em média $76,3 \pm 13,1\%$ para o FRBS1 e $70,4 \pm 19,8\%$ para o FRBS2. Esses resultados evidenciam a robustez do sistema, demonstrando sua capacidade eficiente no tratamento da matéria orgânica e nutrientes, sendo o $N-NH_4^+$ um dos principais componentes removidos.



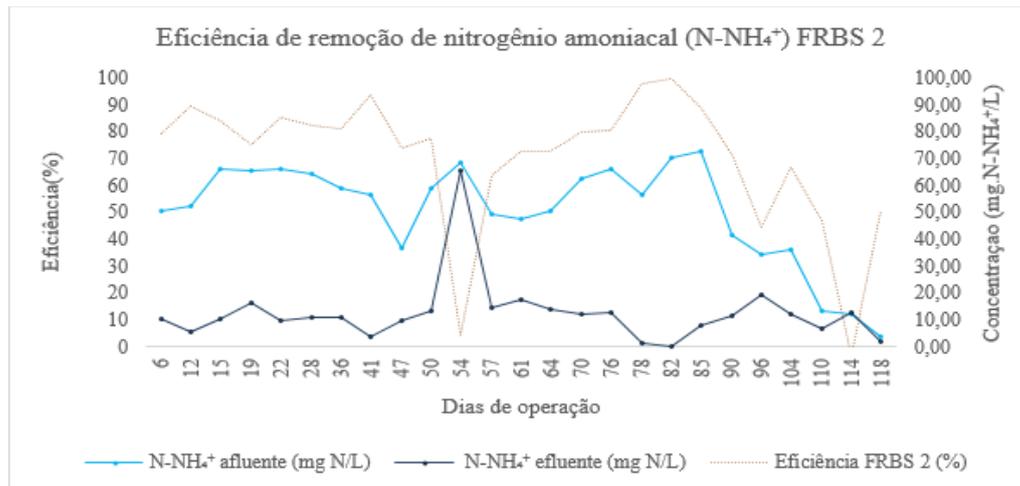


Figura 7 – Afluente, efluente N-NH₄⁺ e eficiência de remoção para o FRBS1 (acima) e FRBS2 (abaixo).

DISCUSSÃO

Nos primeiros 30 dias, inicia-se a formação dos grânulos. Entre 30 e 60 dias, a formação continua, indicando progressão na maturação dos grânulos aeróbios. No intervalo mais extenso de 60 a 200 dias, observa-se uma fase avançada, caracterizando o estágio em que os grânulos atingem maturidade ou estabilidade. Adicionalmente, também demonstrou habilidades de nitrificação e desnitrificação, contribuindo de maneira substancial para a remoção de nutrientes dos efluentes.

Segundo De Kreuk *et al.*, 2005, o tamanho mínimo dos grânulos deve ser aproximadamente de 0,2 mm para assegurar a separação adequada dos flocos durante a sedimentação. Esta afirmação corrobora com o encontrado durante o experimento. O modo operacional empregado nos reatores possibilitou a formação de agregados algal-bacterianos com diâmetro superior a 0,2 mm ao longo da fase de inicialização. Ao término desse período, foram obtidos grânulos com uma estrutura morfológica regular e bem definida.

Os resultados evidenciam eficiência superior aos sistemas convencionais de lodo ativado, confirmando a eficácia do LGAB. Ali *et al.* (2021) destacam a formação eficiente de grânulos aeróbios em reatores, reforçando a superioridade do Lodo Granular Aeróbio sobre os métodos tradicionais de lodo ativado. A eficiência na formação de grânulos aeróbios desde as fases iniciais valida a afirmação de que o LGAAB é uma alternativa mais eficaz e promissora para o tratamento de águas residuais.

Durante a fase de *start-up*, a variabilidade nas eficiências de remoção de matéria orgânica pode ser atribuída ao período de adaptação da biomassa ao novo ambiente, o que é comum nesse estágio inicial. De maneira análoga à remoção de DQO, as eficiências de N-NH₄⁺ foram instáveis durante esse período. Isso é evidenciado por Winkler *et al.* (2018), que salientam a importância da adaptação de sistemas operacionais às condições locais de águas residuais para promover uma interação metabólica eficiente dentro da comunidade microbiana, otimizando assim o desempenho do tratamento. Com a maturação do sistema, observou-se uma estabilização e aumento da eficiência de remoção de matéria orgânica.

No que tange à remoção de N-NH₄⁺, reatores com fotogrânulos aeróbios demonstram eficácia. Como indicado por Liu *et al.* (2018) que cultivaram microalgas dos gêneros *Chorella sp.* e *Scenedesmus sp.*, em consórcio com LGA, resultando em uma remoção expressiva de nitrogênio (50,2%). García *et al.* (2018) também contribuem, inoculando microalgas em fotobiorreatores e alcançando remoção de nitrogênio superior a 82%, reforçando a eficácia na mitigação de impactos adversos. Vale ressaltar que a remoção de nitrogênio assume relevância significativa no contexto do tratamento de esgoto, uma vez que a presença de nitrogênio nos efluentes pode ocasionar problemas ambientais, como a eutrofização de corpos d'água.

A observação da formação e desenvolvimento dos grânulos aeróbios por meio da microscopia óptica revelou-se essencial para o sucesso do processo. A possibilidade de presença de microzonas com diferentes atuações metabólicas nos fotogrânulos pode explicar a progressiva melhoria na eficiência de remoção de matéria orgânica e nutrientes ao longo do tempo.

CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa ressaltam o potencial significativo da tecnologia de lodo granular aeróbio algal-bacteriano (LGAB) no tratamento de efluentes domésticos com baixa concentração ao longo das diferentes fases de desenvolvimento do sistema de tratamento de esgoto. A análise morfológica durante o *start-up* revelou adaptações iniciais, enquanto o período de maturação evidenciou estabilidade nos fotogrânulos aeróbios, cujos diâmetros, ao término do experimento, excederam 2,8 mm, evidenciando uma adaptação eficaz da biomassa às condições do reator.

A eficiência do sistema na remoção de matéria orgânica e nutrientes, avaliada ao longo do experimento, demonstrou desempenho progressivamente positivo. As taxas de remoção de matéria orgânica ultrapassaram 90%, indicando uma eficácia notável na eliminação de DQO. Os resultados numéricos corroboram a eficácia do lodo granular aeróbio em consórcio com microalgas evidenciados em estudos anteriores.

Com base nesses resultados, compreende-se que os fotogrânulos aeróbios apresentam uma morfologia apropriada para o tratamento de águas residuais e proporcionam uma compreensão mais profunda das potencialidades do LGAB para o tratamento de efluentes, indicando possíveis direções para aplicações práticas futuras. Entretanto, é necessário ressaltar que esses resultados são específicos para as condições experimentais deste estudo e podem variar em diferentes sistemas e contextos operacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALI, Nur Shahidah Aftar *et al.* Initialization, enhancement and mechanisms of aerobic granulation in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 260, 1 April 2021
2. DE KREUK, M. K.; PRONK, M.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperatures. **Water Research**, v. 39, p. 4476–4484, 2005.
3. GARCÍA, D. *et al.* Evaluation of the dynamics of microalgae population structure and process performance during piggery wastewater treatment in algal-bacterial photobioreactors. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 120–126, 2018.
4. HUANG, W., LI, B., ZHANG, C., ZHANG, Z., LEI, Z., LU, B., ZHOU, B., 2015. Effect of algae growth on aerobic granulation and nutrients removal from synthetic wastewater by using sequencing batch reactors. **Bioresource Technology**. 179, 187–192.
5. LIU, Y.; TAY, J. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge. **Water Research**, v. 36, p. 1653–1665, 2002.
6. LIU, L. *et al.* Characteristics and performance of aerobic algae-bacteria granular consortia in a photo-sequencing batch reactor. **Journal of Hazardous Materials**, v. 349, n. January, p. 135–142, 2018.
7. NANCHARAI, Y. V.; REDDY, G. K. K. Aerobic granular sludge technology: mechanisms of granulation and biotechnological applications. **Bioresource Technology**, 2017.
8. ROLLEMBERG, S. L. DE S. *et al.* Tecnologia de lodo granular aeróbio no tratamento de esgoto doméstico: oportunidades e desafios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 3, p. 439–449, maio 2020.
9. SALES, M., MARINHO, T., MARINHO, I.C., GAVAZZA, S., KATO, M.T., MAGNUS, B.S., FLORENCIO, L., 2022. Start-up strategies to develop aerobic granular sludge and photogranules in sequential batch reactors. **Sci. Total Environ.** 828, 154402.



10. SCHAMBECK, Cássio Moraes *et al.* Chemical and physical properties of alginate-like exopolymers of aerobic granules and flocs produced from different wastewaters. **Bioresource technology**, v. 312, p. 123632, 2020.
11. WAGNER, J.; DA COSTA, R. H. R. Aerobic Granulation in a Sequencing Batch Reactor Using Real Domestic Wastewater. **Journal of Environmental Engineering**, v. 139, p. 1391–1396, 2013
12. WANG, F.; YANG, F.L.; ZHANG, X.W.; LIU, Y.H.; ZHANG, H.M.; ZHOU, J. (2005) Effects of cycle time on properties of aerobic granules in sequencing batch airlift reactor. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**, v. 21, n. 8-9, p. 1379-138.
13. Winkler, M.K.H., Meunier, C., Henriot, O., Mahillon, J., Suárez-Ojeda, M.E., Del Moro, G., De Sanctis, M., Di Iaconi, C., & Weissbrodt, D.G. (2018). An integrative review of granular sludge for the biological removal of nutrients and recalcitrant organic matter from wastewater. **Chemical Engineering Journal**, 336, 489-502.