



II- 243 - ESTUDO DA ESTABILIDADE DO SISTEMA FOTOGRANULAR EM SITUAÇÃO DE ELEVADAS CARGAS ORGÂNICAS E NITROGENADA

Brendha Ribeiro(1)

Discente do curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco. Bolsista de Iniciação Científica /UFPE.

Talita Marinho(2)

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

Henrique Cesar Guedes Campos(3)

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

Bruna S. Magnus(4)

Professora da Universidade Federal de Pernambuco, no Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências

Lourdinha Florencio(5)

Professora Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco

Endereço(1): Estr. dos Pintos, 185 - Sítio dos Pintos, Recife - PE, 52171-050 – Brasil – Tel: (81) 987456162 – email: brendhamacedor@gmail.com

RESUMO

A tecnologia de granulação aeróbia surgiu como resposta às limitações dos flocos aeróbios, demonstrando excelente eficiência no tratamento de águas residuárias. No entanto, ainda enfrenta desafios significativos na ampliação desta tecnologia em águas residuárias com oscilação na concentrações de nitrogênio. Esse desafio tem impulsionado pesquisas para otimização, incluindo a adição microalgas ao biofilme granular, com intuito de impulsionar a remoção de nitrogênio por processos simultâneos de nitrificação-desnitrificação-assimilação pela microbiota presente. Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar a aplicabilidade da biomassa fotogranular aeróbia na remoção de águas residuárias com elevadas concentrações de nitrogênio, em sua forma amoniacal. Para isso, dois estudos de cinética de 6 h foram realizados em um fotobioreator com volume útil de 5,0 L, com variação de N-NH₄⁺ de 50 e 100 mgN-NH₄⁺/L. Os resultados indicaram que a biomassa fotogranular aeróbia é capaz de remover altas concentrações de nitrogênio amoniacal, como por exemplo 100 mgN-NH₄⁺/L, em uma única batelada de 6 horas. Portanto, a pesquisa evidencia a promissora eficiência da biomassa fotogranular aeróbia na remoção de águas residuárias com altas concentrações de N-NH₄⁺.

PALAVRAS-CHAVE: Consórcio algal-bacteriano, fotogrânulos aeróbios, sistema aeróbio, tratamento de efluentes.

INTRODUÇÃO

As limitações inerentes ao floco aeróbio, incluindo a elevada demanda de oxigênio dissolvido, a sensibilidade a determinadas condições operacionais e a perda de atividade biológica, impulsionaram o desenvolvimento da tecnologia de granulação aeróbia (Weissbrodt et al., 2013). Esta tecnologia apresenta-se como uma alternativa catalítica altamente eficiente para o tratamento de poluentes em águas residuárias (Pronk et al., 2015). Contudo, diversos estudos têm se concentrado na manutenção da estabilidade granular por meio da inoculação de microalgas no sistema, promovendo o cultivo de fotogrânulos aeróbios (Huang et al., 2015; Sales et al., 2022; Zhu et al., 2022). Os fotogrânulos aeróbios são grânulos em consórcio com microalgas formados preferencialmente em reatores operados em bateladas sequenciais (RBS). A biomassa fotogranular é uma estrutura densa, compacta, regular, com diâmetro variando de 0,2 a 5,0 mm, formada pela autoagregação de microrganismos e substâncias poliméricas extracelulares (EPS). Essa tecnologia é promissora, pois não requer material suporte para o



crescimento do biofilme (Huang et al., 2015).

Embora a microbiota dos grânulos convencionais esteja bem elucidada, a dos fotogrânulos aeróbios ainda apresenta lacunas na literatura. As mudanças nas condições operacionais em sistemas com biomassa cultivada em consórcio de algas e bactérias podem resultar em impactos significativos, uma vez que as microalgas são mais sensíveis a alterações. Estudos demonstraram que tanto a aeração contínua (AC) quanto a aeração intermitente (AI) alcançam uma eficiência de nitrificação superior a 98% sob uma carga de $N-NH_4^+$ de 1,25 a 4,7 $g/(m^2 \cdot d)$. No entanto, a eficiência de remoção de nitrogênio total sofreu influência quando aplicado a condição AI com variação de cargas nitrogenadas, por exemplo cargas baixas apresentaram eficiência de remoção de $20,09 \pm 4,4\%$, enquanto cargas mais elevadas apresentaram eficiência de $8,77 \pm 1,35\%$ (Karmann et al., 2024).

Contudo, os desafios persistem, como a necessidade de caracterização precisa da biomassa e estratégias para manter a eficiência ao longo do tempo em aplicações em larga escala. Considerando as regulamentações rigorosas relacionadas ao nitrogênio em efluentes, a biomassa fotogranular aeróbia surge como uma alternativa promissora para contribuir para o tratamento eficaz e ambientalmente sustentável de águas residuárias. Visto isso, este estudo buscou avaliar a performance de um sistema fotogranular na remoção de altas concentrações de $N-NH_4^+$.

OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a cinética de um fotobioreator aeróbio, com fotogrânulos aeróbios estáveis, na remoção de diferentes concentrações de nitrogênio-amoniaco (50 mg/L e 100 mg/L) no esgoto sintético com características de doméstico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar a possibilidade da utilização de sistemas granulares em consórcio com microalgas e bactérias na remoção de diferentes cargas nitrogenadas presentes nas águas residuárias.
2. Analisar se a relação C:N 10:1 é também eficiente no processo de nitrificação no tratamento de águas residuárias com alta carga nitrogenada.
3. Determinar a taxa de nitrificação dos sistemas.

METODOLOGIA

Delineamento experimental

Foram realizadas duas bateladas únicas de duração de 6 horas em um fotobioreator de acrílico transparente com dimensão de 80 mm de diâmetro (74 mm de diâmetro interno e 3 mm de espessura da parede), 1000 mm de altura total, resultando em um volume total de 5,0 L. As bateladas foram realizadas sob ciclos claros com iluminação artificial (lâmpada fluorescente), com intensidade luminosa de $140 \pm 20 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

O ciclo operacional adotado foi de 6 h, com alimentação lenta do tipo ascensional anaeróbia (60 min), reação aeróbia (279 min), reação anóxica (15 min), sedimentação (20 min) e descarte (1 min). Ao final do perfil, 50% do efluente tratado foi descartado (troca volumétrica de 50%), resultando em um tempo de detenção hidráulico (TDH) de 12 hrs. Na fase de aeração a distribuição de ar foi feita por duas pedras difusoras ($\phi=2cm$) com velocidade ascensional do ar de 0,5 cm/s.

Afluente sintético e biomassa

A composição do esgoto sintético foi adaptado de (Huang et al., 2015), e as principais características são: DQO ~ 500 e 1000 mgDQO/L com glicose como fonte de carbono e fósforo ~ 5 mgP- PO_3^-/L . A diferença entre os dois perfis atemporais foi a concentração de nitrogênio amoniaco (*Ciclo 1* – 50 mgN- NH_4^+/L e 500 mgCOD/L; *Ciclo 2* – 100 mgN- NH_4^+/L e 1000 mgCOD/L). Foi adicionado bicarbonato de sódio para manter pH inicial de 7,0. A tabela 1 mostra o detalhamento operacional dos perfis cinéticos.


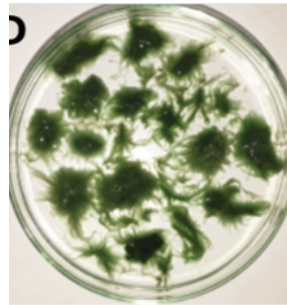


Tabela 1 – Detalhamento operacional dos perfis cinéticos

Parâmetros	Unidade	Ciclo 1	Ciclo 2
Velocidade superficial do ar	cm/s	0.5	0.5
Tempo de detenção hidráulico (TDH)	h	12.0	12.0
Velocidade de seleção de pressão	m.h ⁻¹	9	9
Relação C:N	-	10:1	10:1
Concentração N-NH ₄ ⁺	mgN-NH ₄ ⁺ /L	50	100
Concentração matéria orgânica	mgCOD/L	500	1000

O ciclo 1 foi realizado no dia 120° de operação, com biomassa estável, SSV de 3,8 mg/L, IVL₅ de 44 mL/g, e 50% dos fotogrânulos com granulometria superior a 2,0 mm. O ciclo 2 foi realizado no dia 240° de operação, com biomassa também estável, SSV de 3,5 mg/L, IVL₅ 60 de mL/g, e 65% dos fotogrânulos com granulometria superior a 2,0 mm. A tabela 2 mostra as características físicas da biomassa do reator durante os testes cinéticos (ciclo 1 e ciclos 2).

Tabela 2 – Características físicas da biomassa do reator nos ciclo 1 e ciclo 2.

Parâmetros	Ciclo 1	Ciclo 2
Morfologia		
% de partículas entre 2,0 – 2,88 mm	35	15
% de partículas maiores que 2,8 mm	8	47
SSVLM (g/L)	3,8	3,5
Clorofila-a (mgchl-a/gSSV)	0,7	1,8

Análises físico-químicas

Os parâmetros analisados nos perfis atemporais foram: pH, Oxigênio Dissolvido, Temperatura, DQO solúvel, Nitrogênio Amoniacal (N-NH₄⁺) e Alcalinidade (CaCO₃).

As análises físico-químicas (DQO, nitrogênio amoniacal, alcalinidade), multiparâmetros e série de sólidos foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). A concentração de oxigênio dissolvido e pH foram medidos pela Sonda Multiparâmetro (Hach HQ40d).

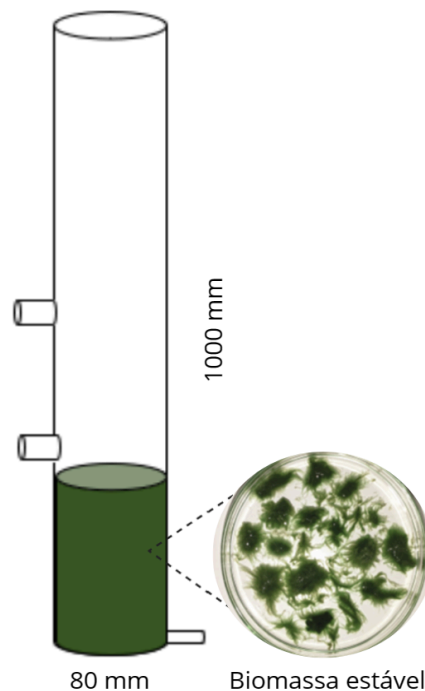


Figura 1 – Esquema do fotobioreator e morfologia da biomassa cultivada

RESULTADOS

A Figura 2 mostra (a) a variação do pH do sistema conforme variação da concentração de $N-NH_4$; (b) a performance do reator ao longo dos dois ciclos operacionais na remoção do material orgânico; e (c) a performance do reator ao longo dos dois ciclos operacionais na remoção do nitrogênio amoniacal. De modo geral, o sistema apresentou excelente performance na remoção de material orgânico e nitrogenado, sob diferentes concentrações.

Como pode ser observado na Figura 2 (b), o consumo da DQO foi mais acentuado durante os primeiros 30 minutos de operação, atingindo $\pm 84\%$ de eficiência de remoção em ambos sistemas. Ao final das 6 h de operação, o reator apresentou remoção de específica e eficiência de remoção de 20 e 40 mgDQO/gSSV.h, e 94 e 100 % para ciclo 1 e ciclo 2, respectivamente. Parece que a velocidade de remoção de DQO não foi afetada com o aumento da concentração da matéria orgânica.

A concentração de pH foi monitorada durante todo o ciclo operacional do Ciclo 1 e do Ciclo 2, pois é um ponto-chave no processo de nitrificação. Interessante notar que, com exceção dos primeiros 30 minutos do ciclo 1, o sistema se manteve com pH acima de 8,0 até o final do experimento. Esse fato pode estar atrelado a simultâneos processos na estrutura fotogranular (i) nitrificação – consumo de alcalinidade do meio; (ii) possível desnitrificação – produção de alcalinidade; (iii) ação das microalgas – produção de H^+ .

Durante o processo de nitrificação (remoção de $N-NH_4^+$), foi observado no ciclo operacional 1 – 50 mgN- NH_4^+ /L, que todo amoniacal foi consumido após 270 min de operação, o que não foi observado no ciclo 2, em que após 360 minutos de operação, a concentração de nitrogênio amoniacal no efluente era de 7,53 mgN- NH_4^+ /L. No entanto, no ciclo 2, o sistema apresentou taxa de nitrificação maior, comparado com o ciclo 1, na ordem de 8,3 e 14,9 gN- NH_4^+ /m³.h, para ciclo 1 e ciclo 2, respectivamente. Mesmo em condições de estresse (aumento brusco do nitrogênio amoniacal), o sistema respondeu de forma positiva e mostrou excelente performance na remoção do nutriente.

A estabilidade do sistema a situações de altas concentrações (1000 mgDQO/L e 100 mgN- NH_4^+ /L) mostrou que a microbiota presente no fotogranulo pode suportar situações adversas que alteram a composição do afluente.

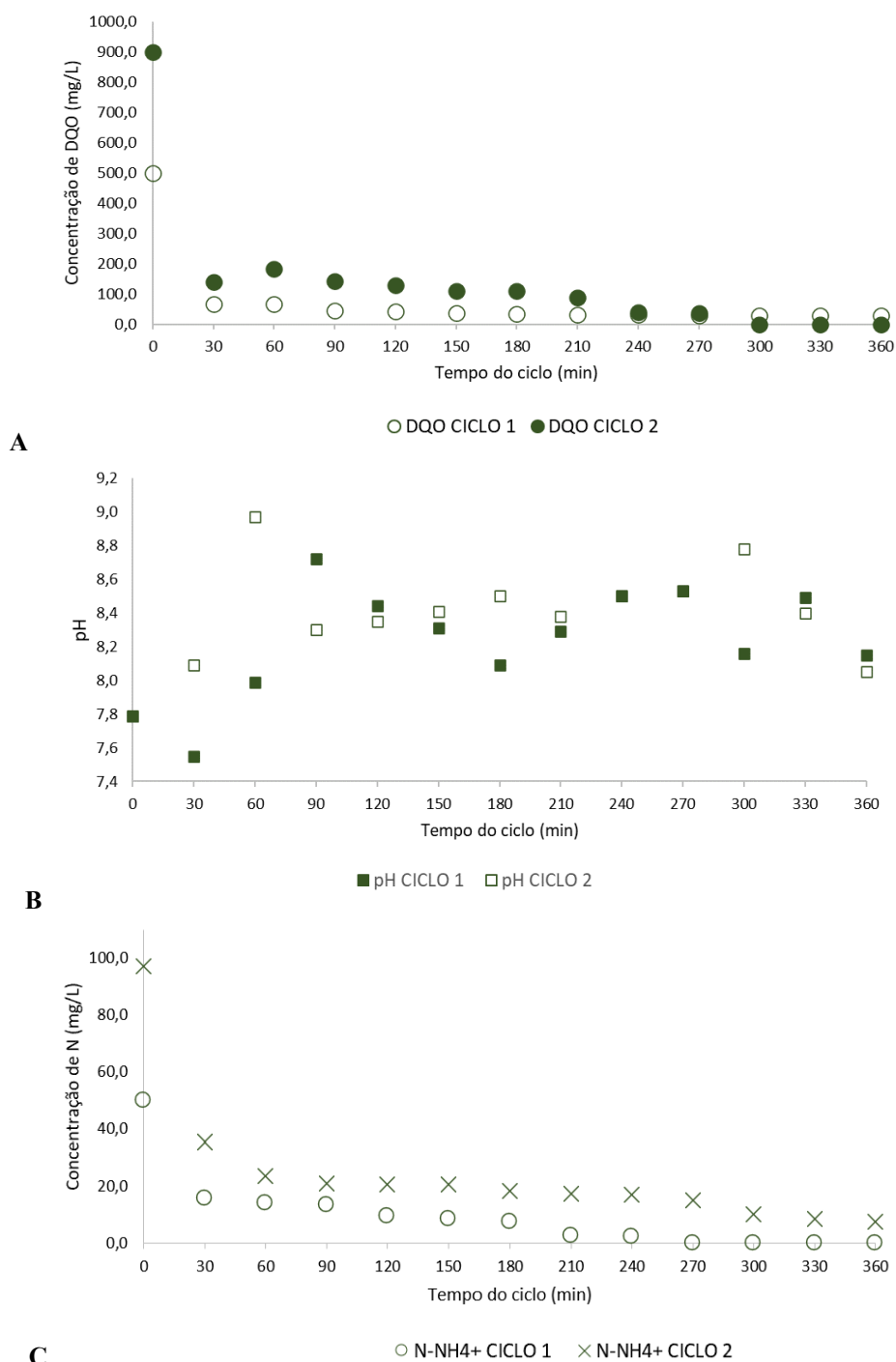


Figura 2 – Perfil atemporal do sistemas com relação a: (a) remoção do material orgânico; (b) pH dos sistemas; e (c) remoção do nitrogênio amoniacal.

DISCUSSÃO

O sistema fotogranular apresentou estabilidade nos processos de remoção de material orgânico e nitrogenado com variação da concentração do esgoto sintético (Figura 2(a) e (c)), indicando que o sistema mostrou excelente performance no tratamento de esgoto sob relação C:N de 10. Interessante observar que os substratos foram



consumidos rapidamente nos primeiros 30-60 minutos de operação, em que o reator foi submetido a condições de anaerobiose. Alguns processos podem ocorrer no interior do fotogranulo aeróbio: (i) difusão do material orgânico e nitrogenado pela biomassa granular (Li & Liu, 2005); (ii) produção de oxigênio fotossintético ao longo do biofilme fotogranular (Cai et al., 2018); granulometria variando entre 2,0 e 2,8 mm (Tabela 2), favorecendo a aderência de bactérias heterotróficas na parte superior do grânulo, resultando em consumo mais rápido do material orgânico (Lopez-Vazquez et al., n.d.; Picioreanu et al., 2016).

Além da remoção de >90% do conteúdo orgânico, o sistema apresentou excelente taxa de nitrificação, principalmente no ciclo 2, com alta concentração de nitrogênio. É sabido que o pH do sistema é de extrema importância pois controla alguns processos biológicos fundamentais. O pH do sistema tem relação com a atividade fotossintética das microalgas. Durante o processo de fotossíntese, ocorre o consumo de H⁺, resultando em um aumento considerável da concentração desse parâmetro.

CONCLUSÕES

A pesquisa explorou a aplicação promissora da biomassa fotogranular aeróbia para a remoção de águas residuárias com elevadas concentrações de N-NH₄⁺. Ao abordar as limitações do floco aeróbio e os desafios da tecnologia granular aeróbia, foi observado que o sistema fotogranular apresentou excelente desempenho na remoção de esgoto sintético com alta concentração de nitrogênio amoniacal.

- Os resultados positivos, evidenciados pelos experimentos no fotobioreator em batelada sequencial, revelaram a capacidade da biomassa em remover até 100 mgN-NH₄⁺/L em um ciclo de 6 horas. A estabilidade granular alcançada, aliada à eficiência na remoção de nitrogênio, ressalta o potencial impacto ambientalmente responsável dessa abordagem.
- A relação C:N 10:1 demonstrou eficácia no processo de nitrificação, proporcionando condições favoráveis para a remoção de nitrogênio.
- Taxa de nitrificação maior foi encontrada no sistema com maior concentração de nitrogênio amoniacal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, and WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 22th ed. Baltimore: Port City Press, 2012.
2. Cai, W., Jin, M., Zhao, Z., Lei, Z., Zhang, Z., Adachi, Y., & Lee, D. J. (2018). *Influence of ferrous iron dosing strategy on aerobic granulation of activated sludge and bioavailability of phosphorus accumulated in granules*. *Bioresource Technology Reports*, 2, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.03.004>
3. 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. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.024>
4. Karmann, C., Mágrová, A., Jeníček, P., Bartáček, J., & Kouba, V. (2024). *Advances in nitrogen removal and recovery technologies from reject water: Economic and environmental perspectives*. In *Bioresource Technology* (Vol. 391). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129888>
5. Pronk, M., de Kreuk, M. K., de Bruin, B., Kamminga, P., Kleerebezem, R., & van Loosdrecht, M. C. M. (2015). *Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment*. *Water Research*, 84, 207–217. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.07.011>
6. 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*. *Science of the Total Environment*, 828. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154402>
7. Weissbrodt, D. G., Schneiter, G. S., Fürbringer, J. M., & Holliger, C. (2013). *Identification of trigger factors selecting for polyphosphate- and glycogen-accumulating organisms in aerobic granular sludge sequencing batch reactors*. *Water Research*, 47(19), 7006–7018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.08.043>
8. Zhu, J., You, H., Li, Z., Xie, B., Chen, H., Ding, Y., Qi, S., Li, W., Ma, B., Qu, X., Tan, H., Liu, F., & Yong NG, H. (2022). *Comparison on the photogranules formation and microbial community shift between the batch and continuous-flow mode for the high saline wastewater treatment*. *Chemical Engineering*

