

II-376 - DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM REATOR DE LODO GRANULAR AERÓBIO HÍBRIDO COM FILTRO BIOLÓGICO (REATOR LGA-BF) NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

Tasso Jorge Tavares Ferreira

Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela Universidade de Fortaleza. Mestrando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos/Saneamento Ambiental) pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (DEHA/UFC).

Silvio Luiz de Sousa Rollemberg

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Ceará. Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos/Saneamento Ambiental) pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (DEHA/UFC).

André Bezerra dos Santos⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará. Doutor em Environmental Sciences pela Wageningen University, Holanda. Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Endereço⁽¹⁾: R. Prof. Armando Farias, 713, Pici – Fortaleza, Ceará, Brasil – CEP: 60440-900 – e-mail: andre23@ufc.br

RESUMO

O lodo granular aeróbio (LGA) é uma das tecnologias mais promissoras e eficientes do mercado de tratamento de efluentes. No entanto, apesar de apresentar várias vantagens em relação a aspectos de desempenho, pegada de carbono, demanda energética e custo operacional, os reatores de LGA apresentam limitações como a desintegração dos grânulos na operação de longo prazo, longos períodos de partida, baixas remoções de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT), problemas com acúmulo de nitrito e flotação dos grânulos e flocos. Com isso o presente trabalho visou avaliar o tratamento de esgoto sanitário em um reator LGA híbrido com adição de um filtro biológico (FB) na parte superior com biomédias de alta performance. Para isso, foram usados dois reatores em bateladas sequenciais (RBS) idênticos, com diâmetro de 100 mm, altura de 1000 mm e volume útil de 7,2 L. O reator R1 era um LGA convencional sistema que funcionava como um controle, enquanto R2 era um sistema LGA modificado. A biomédia usada foi confeccionada em espuma de poliuretano, denominada comercialmente Monera Bio Power®, com uma área superficial de 1000 m²/m³. O experimento foi dividido em quatro Períodos, variando o tempo de sedimentação: 20 min (Período I), 10 min (Período II), 5 min (Período III) e a redução do tempo de ciclo de 6 h para 4 h após o granulado maturação (Período IV). Observa-se claramente que em R2, foi encontrada uma redução significativa de sólidos do efluente devido à inclusão do compartimento FB. No entanto, a remoção de DBO foi alta em ambos os sistemas, com valores acima de 90% ao longo dos períodos. A menor eficiência de remoção de NH₄⁺-N foi encontrada no R1, que pode ser explicada pela menor concentração de sólidos suspensos no reator. Observou-se também uma tendência de acúmulo de nitrito em R1, que por sua vez impactou na remoção de nitrogênio total. Com isso, entende-se que o novo sistema LGA pode ser uma alternativa interessante para melhorar alguns aspectos dos reatores LGA convencionais, como desnitrificação e acúmulo de nitrito, concentração de SST no efluente e aumento da confiabilidade do sistema durante períodos de instabilidade e quebra dos grânulos, além da produção de água para reúso.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo Granular Aeróbio; Biofiltro; Reator Híbrido; Biomédias de alta performance.

INTRODUÇÃO

O lodo granular aeróbio (LGA) é uma das tecnologias mais promissoras e eficientes do mercado de tratamento de efluentes. Dentre as principais vantagens da tecnologia LGA estão a remoção simultânea de carbono,

nitrogênio e fósforo, alto potencial de bioissorção de metais e diversos poluentes, remoção de cor e recuperação de recursos do lodo de excesso (Ferreira et al., 2021; Wang et al., 2018; Lu et al., 2016).

Embora os sistemas LGA também tenham várias vantagens em relação a aspectos de desempenho, pegada de carbono, demanda energética e custo operacional, sua operação em escala piloto e real (especialmente no tratamento de efluentes de baixa carga) apresentam limitações como a desintegração dos grânulos na operação de longo prazo, longos períodos de partida, baixas remoções de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT), problemas com acúmulo de nitrito e flotação dos grânulos e flocos (Rollemberg et al., 2020; Franca et al., 2018; van Dijk et al., 2018).

Para lidar com esses problemas, alguns autores propuseram modificações no projeto e na operação de sistemas LGA. Li et al. (2014) cultivaram LGA em escala piloto com efluentes sintéticos e uso de biomassa granular como inóculo em estações de tratamento de efluentes em grande escala. Embora esta metodologia tenha sido eficiente para estabilidade de grânulos, a sua aplicação em escala real é bem limitada. Para reduzir a concentração de sólidos em suspensão no efluente, Van Dijk et al. (2018) propuseram a instalação de defletores verticais na saída do reator LGA. Rollemberg et al. (2020) propuseram metodologias para o descarte de lodo visando aumentar a remoção de fósforo (controle de idade do lodo), além do descarte seletivo de biomassa floculante que melhorou a qualidade do efluente final em termos de sólidos em suspensão.

Essas alternativas apresentaram resultados importantes no conhecimento sobre a tecnologia LGA. No entanto, uma nova configuração de sistemas LGA pode ser a solução para lidar com os problemas relatados. Este trabalho propõe uma modificação inédita de um sistema LGA para operação em bateladas sequenciais (RBS), que consiste na implantação de um filtro biológico no topo do RBS (LGA-FB) usando uma biomódia de alta taxa de aplicação superficial ou alta performance.

MATERIAIS E MÉTODOS

Inóculo

O inóculo do reator foi um lodo floculento de um reator de lodos ativados em escala real. A concentração inicial de sólidos em suspensão voláteis no licor misto (MLVSS) foi em torno de 2,0 g/L com índice volumétrico de lodo em 30 min (IVL₃₀) atingindo um valor de aproximadamente 150 mL/g.

Configuração Experimental

Os reatores foram instalados em uma de tratamento de esgoto (ETE) de Fortaleza-CE, Brasil. O efluente sanitário utilizado nos sistemas em escala piloto passou por um tratamento preliminar com gradeamento grosseiro, desarenador e tanque de equalização. Foram usados dois RBS idênticos, com diâmetro de 100 mm, altura de 1000 mm e volume útil de 7,2 L. O reator R1 era um LGA convencional sistema que funcionava como um controle, enquanto R2 era um sistema LGA modificado pela aplicação de um compartimento de filtro biológico (FB) na zona superior. Para este reator, um fundo falso foi inserido para apoiar as biomódias de alta performance. O volume do compartimento do FB foi de aproximadamente 10% do volume útil do RBS. A biomódia usada foi confeccionada em espuma de poliuretano, denominada comercialmente Monera Bio Power®, com uma área superficial de 1000 m²/m³.

A taxa de aeração foi de 10,0 L/min, com uma concentração de oxigênio dissolvido (OD) no licor misto entre 2 e 3 mg/L. A razão de troca foi de 50% (tempo de detenção hidráulica, TDH = 12h) e a temperatura ambiente foi de cerca de 28±2°C. O ciclo inicial dos reatores RBS foi de 6h, consistindo em alimentação anaeróbia (60min), fase óxica (280–295min) e sedimentação (20–5min). Os sistemas foram operados em quatro períodos, variando o tempo de sedimentação: 20 min (Período I), 10 min (Período II), 5 min (Período III) e a redução do tempo de ciclo de 6 h para 4 h após a maturação dos grânulos (Período 4). Tal redução no tempo de ciclo, mantendo a relação de troca de 50%, resultou na diminuição do TDH para 8 h. O descarte de lodo excedente foi realizado de acordo com a metodologia proposta em Rollemberg et al. (2020).

Análises Físico-Químicas

As concentrações de DQO, pH, amônia, nitrito, nitrato, PT, SSV, SST, IVL₁₀ e IVL₃₀ foram determinadas de acordo com APHA (2012). O OD foi medido por um medidor YSI 5000. A aeração foi realizada através de um compressor de ar Yuting SUN, China. As substâncias poliméricas extracelulares (EPS, *extracellular polymeric substances*), ou seja, proteínas (PN) e polissacarídeos (PS), foram determinadas de acordo com

Rolleberg et al. (2020). Para a determinação dos íons NO_2^- , NO_3^- e PO_4^{3-} , utilizou-se cromatógrafo de íons Dionex™ ICS-1100.

Métodos estatísticos

O teste não paramétrico de Mann-Whitney foi utilizado para comparar o desempenho dos reatores a um nível de confiança de 95%, em que os grupos de dados foram estatisticamente diferentes quando $p \leq 0,05$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Embora os reatores tenham iniciado com condições semelhantes (MLVSS de 2000 mg/L; IVL_{30} de 180 mL/g), considerando que foi utilizado o mesmo inóculo (lodo ativado) e a mesma concentração, o comportamento dos sistemas durante o período experimental foi consideravelmente distinto (Fig. 1).

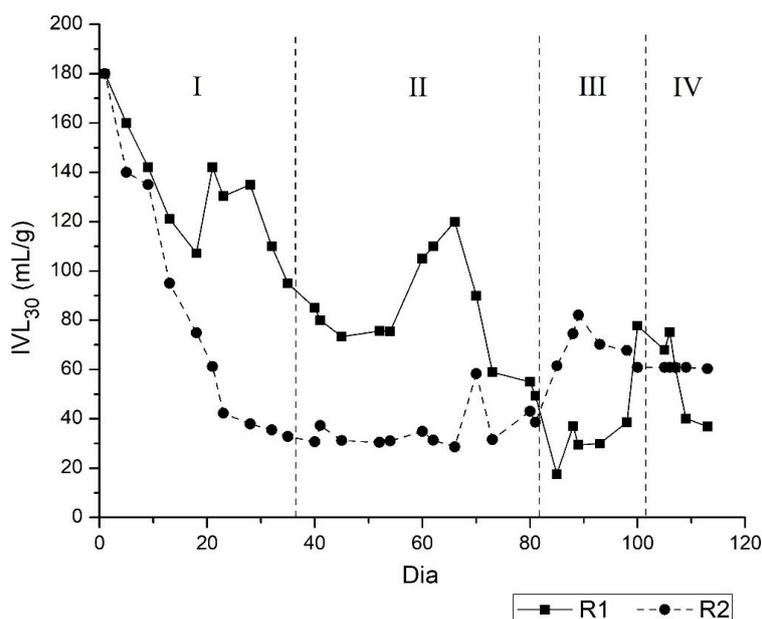


Figura 1: IVL_{30} obtido durante o experimento.

Inicialmente, ambos os reatores apresentaram redução significativa no IVL_{30} , o que é esperado uma vez que o processo de granulação aeróbia promove a melhoria da sedimentabilidade da biomassa ao transformar flocos de lodo ativado em grânulos aeróbios induzidos por diversas pressões de seleção (Rolleberg et al., 2018). As adotadas na atual pesquisa foram: (i) redução do tempo de sedimentação para manter apenas a biomassa com velocidade de sedimentação acima de 0,2 m/min; (ii) seleção de bactérias de crescimento lento que usam polihidroxialcanoato (PHA) armazenado intracelularmente através de um período anaeróbio seguido de períodos aeróbios com fome (*famine*) prolongada (ausência de substrato, que foi consumido em torno de 70-80% no período anaeróbio); (iii) descarte seletivo de lodo (Rolleberg et al., 2018).

Em relação aos sólidos em suspensão totais (SST) do efluente (Fig. 2), foram observados valores mais elevados em R1, principalmente durante o período de instabilidade. Por outro lado, em R2 não foi observada instabilidade, sendo encontrados baixos valores de SST no efluente (≈ 10 mg/L). As concentrações de SST do efluente foram estatisticamente diferentes ($p = 0,04$) (Tabela 2), com valores médios de $39,7 \pm 3,0$ mg/L em R1 e $15,4 \pm 4,0$ mg/L em R2. Portanto, observa-se claramente que em R2, foi encontrada uma redução significativa de sólidos do efluente devido à inclusão do compartimento FB.

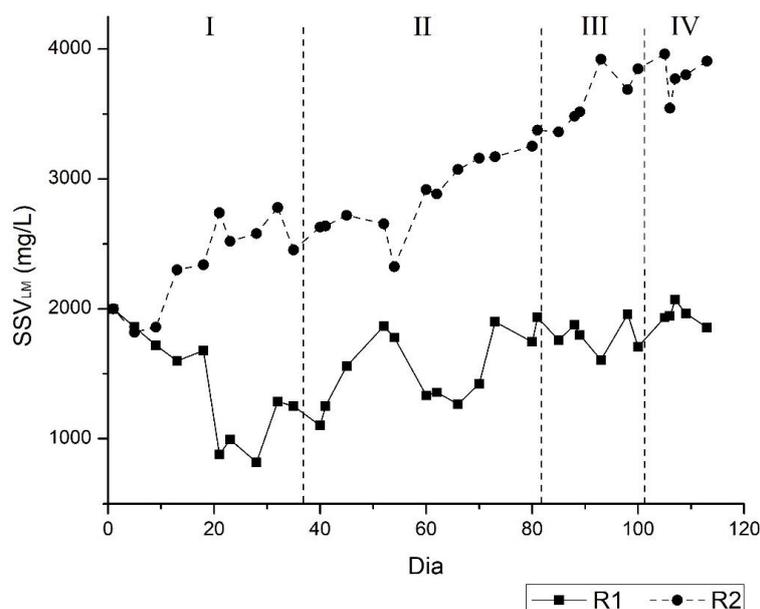


Figura 2: SSV no efluente dos sistemas LGA convencional (R1) e modificado (R2).

O desempenho dos sistemas em termos de remoções de C, N e P foi avaliado. As concentrações de DQO, DBO, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ e $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ e as eficiências de remoção são mostradas na Tabela 1. Conforme mencionado, o experimento foi dividido em quatro Períodos, variando o tempo de sedimentação: 20 min (Período I), 10 min (Período II), 5 min (Período III) e a redução do tempo de ciclo de 6 h para 4 h após o granulado maturação (Período IV). A remoção de DBO foi alta em ambos os sistemas, com valores acima de 90% observados em todos os períodos, sem diferenças significativas ($p = 0,06$) entre os reatores. Os valores encontrados são semelhantes aos de vários outros estudos que observaram altas remoções de DBO ($> 90\%$) em sistemas LGA tratando efluentes sanitários/municipais (Rollemberg et al., 2020).

Tabela 1: Concentração de matéria orgânica e nutrientes nas fases do experimento.

Parâmetros	Período I		Período II		Período III		Período IV	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
DBO_{af} (mg/L)	341 ± 53	327 ± 45	349 ± 34	319 ± 40	338 ± 76	385 ± 81	396 ± 53	427 ± 49
DBO_{ef} (mg/L)	19 ± 13	14 ± 8	16 ± 7	11 ± 4	17 ± 8	9 ± 3	13 ± 9	9 ± 3
DBO_{rem} (%)	92 ± 6%	91 ± 5%	90 ± 4%	95 ± 4%	91 ± 4%	96 ± 3%	93 ± 5%	95 ± 3%
DQO_{af} (mg/L)	809 ± 45	867 ± 39	773 ± 112	805 ± 91	721 ± 63	705 ± 27	719 ± 61	682 ± 49
DQO_{ef} (mg/L)	48 ± 21	26 ± 7	41 ± 9	22 ± 5	33 ± 10	17 ± 6	24 ± 10	19 ± 8
DQO_{rem} (%)	89 ± 7%	96 ± 7%	90 ± 2%	94 ± 2%	90 ± 7%	95 ± 4%	91 ± 5%	95 ± 4%
PT_{af} (mg/L)	9 ± 3	8 ± 3	9 ± 2	9 ± 2	9 ± 2	9 ± 1	9 ± 1	9 ± 1
PT_{ef} (mg/L)	3 ± 2	3 ± 1	3 ± 2	2 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	2 ± 1
PT_{rem} (%)	64 ± 7	63 ± 3	69 ± 2	74 ± 3	75 ± 3	72 ± 3	73 ± 2	71 ± 3
$\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{af}}$ (mg/L)	63 ± 9	59 ± 15	48 ± 7	46 ± 5	52 ± 9	53 ± 7	61 ± 6	65 ± 3
$\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{ef}}$ (mg/L)	11 ± 7	5 ± 4	7 ± 3	6 ± 3	4 ± 2	5 ± 2	6 ± 2	7 ± 3
$\text{NO}_2^-\text{-N}_{\text{ef}}$ (mg/L)	8 ± 8	2 ± 3	8 ± 5	3 ± 1	9 ± 4	4 ± 3	10 ± 3	3 ± 1
$\text{NO}_3^-\text{-N}_{\text{ef}}$ (mg/L)	1 ± 2	1 ± 2	2 ± 2	3 ± 2	5 ± 2	3 ± 1	2 ± 2	1 ± 1
$\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{rem}}$ (%)	82 ± 4	91 ± 3	83 ± 3	88 ± 3	93 ± 2	91 ± 2	91 ± 3	90 ± 1
NT_{rem} (%)	75 ± 5	86 ± 2	77 ± 4	85 ± 5	78 ± 3	85 ± 5	76 ± 2	86 ± 3

Semelhante à remoção de DBO, a remoção de DQO também foi alta em ambos os sistemas. No entanto, em alguns períodos de operação, menores remoções foram alcançadas em R1, principalmente nos períodos I e II, onde foi observada instabilidade do sistema. No geral, foram encontradas remoções de DQO próximas a 90%.

A menor eficiência de remoção de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ foi encontrada no R1, que pode ser explicada pela menor concentração de SST no reator. Além disso, a instabilidade e a perda de biomassa podem estar relacionadas à

retenção de bactérias oxidadoras de amônia. Após a estabilidade e maturação dos grânulos, foram observadas remoções de amônia acima de 90%, sem efeito significativo na redução do tempo de ciclo (Período IV).

Observou-se uma tendência de acúmulo de nitrito em R1, que por sua vez impactou na remoção de NT. Outros reatores LGA enfrentaram problemas com acúmulo de nitrito (nitrificação parcial) (Coma et al., 2012), quando há pouca DQO disponível para desnitrificação (Derlon et al., 2016). A melhor desnitrificação no R2 foi explicada por dois mecanismos: (i) No período aeróbio, a concentração de OD na zona LGA foi de 2,0 mg/L, mas abaixo de 0,5 mg/L no FB (zona superior), promovendo o mecanismo de nitrificação e desnitrificação simultâneas, e melhorando a remoção de NT; (ii) durante um período anaeróbio foi encontrada uma alta atividade desnitrificante de lodo nos dois estágios (lodo granular aeróbio e zonas FB); (iii) maior concentração de lodo no R2, devido à maior retenção de biomassa e recirculação do lodo, potencializando a desnitrificação.

Ao contrário das remoções NT, as remoções PT não foram afetadas pela configuração do reator. Após a estabilização dos sistemas, foram observados valores de remoção próximos a 70%. Vários fatores impactam na remoção do PT, sendo os principais: controle de idade do lodo, tipo de substrato e (iii) configuração do ciclo (Rollemberg et al., 2018).

CONCLUSÕES

O reator LGA híbrido (R2) que continha biomédias de alto desempenho forneceu um efluente de alta qualidade em termos de SST e turbidez, além de terem sido encontradas excelentes remoções de NT. Como esperado, não foi encontrado nenhum aumento na demanda de energia em R2. Assim, o novo sistema LGA pode ser uma alternativa interessante para melhorar alguns aspectos dos reatores LGA convencionais, como desnitrificação e acúmulo de nitrito, concentração de SST no efluente e aumento da confiabilidade do sistema durante períodos de instabilidade e quebra dos grânulos, além da produção de água para reúso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto (INCT ETEs Sustentáveis), e da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22. ed. Washington, DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2012.
2. COMA, M. et al. Enhancing aerobic granulation for biological nutrient removal from domestic wastewater. *Bioresource Technology*, [S.L.], v. 103, n. 1, p. 101-108, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.014>.
3. DERLON, Thomas et al. Extracellular polymeric substances of biofilms: suffering from an identity crisis. *Water Research*, [S.L.], v. 151, p. 1-7, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.020>.
4. FERREIRA, Tasso Jorge Tavares et al. Integrated review of resource recovery on aerobic granular sludge systems: possibilities and challenges for the application of the biorefinery concept. *Journal of Environmental Management*, [S.L.], v. 291, p. 112718, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112718>.
5. FRANCA, Rita D.G. et al. Stability of aerobic granules during long-term bioreactor operation. *Biotechnology Advances*, [S.L.], v. 36, n. 1, p. 228-246, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.11.005>.
6. LI, Jun et al. Aerobic Sludge Granulation in a Full-Scale Sequencing Batch Reactor. *Biomed Research International*, [S.L.], v. 2014, p. 1-12, 2014. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/268789>.
7. LU, Haiying et al. Periphytic biofilm: a buffer for phosphorus precipitation and release between sediments and water. *Chemosphere*, [S.L.], v. 144, p. 2058-2064, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.10.129>.
8. ROLLEMBERG, Silvio Luiz de Sousa et al. Pilot-scale aerobic granular sludge in the treatment of municipal wastewater: optimizations in the start-up, methodology of sludge discharge, and evaluation of resource recovery. *Bioresource Technology*, [S.L.], v. 311, p. 123467, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123467>.

9. VAN DIJK, Edward J.H. et al. Controlling effluent suspended solids in the aerobic granular sludge process. *Water Research*, [S.L.], v. 147, p. 50-59, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.052>.
10. WANG, Bing et al. Novel biochar-impregnated calcium alginate beads with improved water holding and nutrient retention properties. *Journal Of Environmental Management*, [S.L.], v. 209, p. 105-111, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.041>.