

REMOÇÃO BIOLÓGICA DE FÓSFORO EM SISTEMA DE LODO ATIVADO: MECANISMOS E CONFIGURAÇÕES

Kely Dayane Silva do Ó¹
José Tavares de Sousa²
Maria Virginia da Conceição Albuquerque³
Wilton Silva Lopes⁴

RESUMO

A remoção biológica de fósforo em sistema de lodo ativado é uma tecnologia promissora para qual tem-se a importância de conhecer o mecanismo que regi a existência de bactérias heterotróficas organismos acumuladores de fósforo (PAO) capazes de armazenar dentro da célula quantidades em excesso de fósforo, e remover substratos fermentados produzidos na zona anaeróbia e assimilá-los como produtos de reserva dentro de suas células, na zona aeróbia. Esta revisão objetiva descrever o mecanismo de remoção biológica de fósforo, parâmetros operacionais que aprimorem a predominância dos organismos acumuladores de fósforo em sistema de lodo ativado, nesse contexto também foram discutidas o desempenho e eficiências das configurações mais usuais na remoção biológica de fósforo em águas residuais como os sistemas Bardenpho, UCT, Reatores em Bateladas Sequenciais RBS. Nos trabalhos aqui abordados, deu-se ênfase as eficiências dos sistemas, Bardenpho: obteve eficiências de 83, 5% e 90% e, UCT modificado obtiveram eficiências de 84,4% e o RBS de 81%, 82% e 96%.

Palavras-chave: Remoção biológica de fósforo, Organismos acumuladores de fósforo, Lodo ativado.

¹ ¹ Doutoranda do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade estadual - PB, kely.dayane@hotmail.com;

² ² Doutor do Curso de Ciencia e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual - PB, tavaresuepb@gmail.com

¹ ¹ Doutoranda do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade estadual - PB, virginia.albuquerque@yahoo.com.br; (83) 3322.3222

² ² Doutor do Curso de Ciencia e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual - PB, wiltonsilva@ig.com.br
contato@conapesc.com.br
www.conapesc.com.br

INTRODUÇÃO

Os problemas desencadeados com a eutrofização dos corpos hídricos é causado pelo lançamento exacerbado de nitrogênio e fósforo com as concentrações de fósforo sob a forma de ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico, sendo o ortofosfato mais disponível para o metabolismo biológico é considerado o fator limitante mais significativo da eutrofização, pois um excesso de fósforo no corpo d'água causa diretamente o crescimento de algas e cianobactérias, o problema torna-se especialmente preocupante, em face da potencialidade de produção e liberação de substâncias tóxicas destes organismos ao meio, com graves consequências para o meio ambiente e à saúde pública (METCALF; EDDY, 2003; MANSOURI e ZINATIZADEH, 2017; TIAN et al., 2017).

Porém apesar do despejo do excesso de nutrientes causarem problemas para o meio ambiente, os nutrientes podem ser recuperados por tecnologias viáveis, principalmente o fósforo por ser um nutriente limitante é relevante a recuperação do mesmo, podendo ser uma fonte valiosa na utilização de produção de fertilizantes agrícolas (PANTANO et al., 2016). Entre as tecnologias viáveis para remoção de fósforo destaca-se os sistemas de lodo ativado, que com o passar dos anos vem se aprimorando sendo utilizada para proporcionar mais de 80% de remoção biológica de fósforo (METCALF E EDDY, 2016).

As configurações dos sistemas de lodo ativado para remoção biológica de fósforo vem passando por modificações ao longo do tempo a exemplo o sistema Phoredox proposto por Barnard (1976) que era constituído de dois reatores em serie um anaeróbio seguido do aeróbio, depois o sistema foi se aprimorando com a introdução dos sistemas Bardenpho, UCT, RBS, foram feitas modificações necessárias de acordo com as desvantagens que cada configuração apresentava com o objetivo de minimizar tais desvantagens como presença de nitratos, na zona anaeróbia disponibilidade de substrato solúvel suficiente para a predominância da população de organismos acumuladores de fósforo. Mediante o avanço das configurações também foram aprimorados o mecanismo que rege todo o processo de remoção de fósforo, pois é extremamente complexo devido à maioria das reações serem intracelulares. Esse mecanismo pode acontecer em condições de anaerobiose na qual há uma liberação de fósforo na forma de ortofosfato com acúmulo de ácidos graxos voláteis que ocorrerá, e posteriormente (novo ambiente ou condição aeróbia ou anóxica) haverá absorção desse nutriente (SANTOS, 2014). Diante do exposto este trabalho tem como objetivo descrever o mecanismo de remoção biológica de fósforo, parâmetros operacionais que aprimorem a predominância dos organismos acumuladores de fósforo em sistema de lodo ativado, nesse contexto também foram discutidas o desempenho e eficiências das configurações mais usuais na remoção biológica de fósforo em águas rессudarias como os sistemas Bardenpho, UCT, Reatores em Bateladas Sequenciais RBS.

METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão bibliográfica sobre produção científica no tema "Remoção biológica de fósforo no sistema de lodo ativado". Foram considerados banco de dados SciELO (Scientific Electronic Library Online acessado no período de abril a maio de 2019 com publicações dos últimos 10 anos. Foi discutido sobre o mecanismo de remoção biológica de fósforo, sobre os aspectos operacionais que regem uma eficiente remoção de fósforo e as configurações de lodo ativado projetadas para remoção de fósforo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mecanismo de remoção biológica de fósforo é baseado na existência de bactérias heterotróficas (PAO) presentes na biomassa ativa dos lodos ativados capazes de armazenar dentro da célula quantidades em excesso de fósforo como polifosfato, essas bactérias são capazes de remover substratos simples produzidos na zona anaeróbia e assimilá-los como produtos de reserva dentro de suas células, na zona aeróbia, a energia é produzida pela oxidação dos produtos de reserva, aumentando o armazenamento de polifosfatos nas células (HENRIQUE et al., 2010; CHOI et al., 2013; SANTOS, 2014).

De acordo com Barnard, Dunlap, Steichen, (2017), e Division ;Wastewater , (2017) a zona anaeróbia serve como uma zona de contato para os PAOs (organismos acumuladores de fósforo) para absorver AGV na ausência de oxigênio dissolvido, como um tanque de condicionamento no qual os PAOs estão sendo preparados para seu desenvolvimento na fase aeróbia subsequente. Já na fase aeróbia são capazes de se multiplicar e absorver fosfato para reabastecer os estoques depletados na fase anaeróbia, ao oxidar as reservas de carbono acumuladas na fase anaeróbia, os PAOs são capazes de armazenar mais fosfato sob condições aeróbias do que são liberadas sob condições anaeróbias, uma acumulação líquida do fósforo é alcançada uma vez que uma maior quantidade do mesmo é absorvida na fase aeróbia do que é liberada como ortofosfato durante a fase anaeróbia, (BUNCE et al., 2018).

De acordo com Van Haandel e Van Der Lubbe (2007); Rubio-Rinc et al. (2017), para compreender o metabolismo no interior da célula das bactérias acumuladoras de fósforo que os PAOs possuem no interior de suas células três produtos armazenados: polifosfato, PHA e glicogênio. Sob condições anaeróbias, a conversão do glicogênio e a degradação do polifosfato geram energia ATP (adenosina trifosfato) e NADH₂ (nicotinamida adenina dinucleotídeo), necessária para o transporte de substrato e para captação e armazenamento de produtos metabólicos como PHB. Em condições anóxicas ou aeróbias, o PHA armazenado será oxidado, liberando energia na forma de NADH₂ que será usada para criar o ATP necessário para o crescimento de PAO e para reabastecimento de polifosfato e glicogênio.

Quanto aos aspectos operacionais as principais restrições de sustentar a operação do sistema de Remoção Biológica de Fósforo Avançada (EBPR) é manter o estado favorável das fases anaeróbia aeróbia promovendo ambiente propício para o desenvolvimento das bactérias. A capacidade de absorção do substrato pela zona aeróbia é eventualmente influenciada por sua capacidade de superar o estresse anaeróbio. A composição alimentar adequada para manter uma relação DQO / P estável também pode ser crucial para o sucesso da remoção de fósforo (Kapagiannidis et al., 2012). Além disso, a inibição da remoção de fósforo pela presença de nitrato e oxigênio também tem sido amplamente estudada (BARNARD et al., 2017).

O nitrato é competidor direto por substratos orgânicos solúveis, reduzindo o processo de assimilação e armazenamento de fonte de carbono para bactérias poli-p. Os nitratos formados promovem uma fase anóxica em detrimento da fase anaeróbia necessária para o processo, dessa

forma, as bactérias passam a utilizar o nitrato como aceptor de elétrons, não efetuando a liberação de fosfato para assimilar o substrato disponível (HENRIQUE et al., 2010). No entanto Zou et al. (2006), estudaram o papel do nitrato na remoção biológica de fósforo em RBS e comprovaram que o nitrato pode ser utilizado como aceptor de elétrons, na remoção de fosfato. Mostraram também que o nitrato adicionado na fase aeróbia tanto favoreceu a remoção de fosfato como de nitrato. Em sua investigação, os mesmos autores observaram que maior remoção de fosfato (96%) foi alcançada em condições aeróbias (oxigênio), e usando nitrato como aceptor obteve-se 87,1% de remoção de fosfato. Outro fator crucial para remoção de fósforo depende da disponibilidade de carbono na forma de AGV prontamente biodegradáveis, na qual a zona anaeróbia servi como uma zona de contato para PAO absorver AGV na ausência de oxigênio dissolvido e nitratos, nessas condições as bactérias poli-p transformam o polifosfato armazenado em fosfato, esse processo libera energia necessária para a absorção de AGV, e posteriormente liberação de fosfato para a fase líquida (BARNARD et al., 2017).

Dentre os grupos microbianos presentes em sistemas de lodo ativado destaca-se os organismos acumuladores de glicogênio (GAO) são frequentemente encontrados em sistemas EBPR tendo em vista que também são capazes de multiplicar-se em condições anaeróbias e aeróbias alternadas (SAUNDERS et al., 2003). Consequentemente, competem pelo carbono orgânico com PAO na fase anaeróbia, os GAO obtêm energia (ATP) e potencial de redução primariamente do glicogênio para metabolizar os AGV em condições anaeróbias e armazenar PHA. Na fase aeróbia subsequente, PHA é oxidado, levando à restauração das reservas de glicogênio e ao crescimento celular. Os GAO não contribuem para a remoção de fosfato uma vez que em seu metabolismo não há liberação nem consumo desse composto. Diante do contexto, esses organismos são usualmente considerados indesejáveis em sistemas EBPR (RUBIO-RINCÓN et al., 2017).

SISTEMAS DE REMOÇÃO BIOLÓGICA DE FÓSFORO PARA TRATAMENTO DE ESGOTO

Dentre os sistemas mais empregados para a remoção de nutrientes encontram-se os de fluxo contínuo do tipo Bardenpho e University of Cape Town (UCT), e os de fluxo intermitente do tipo Reatores em Bateladas Sequenciais (RBS) com ciclos operacionais de 4 ou 6 fases, contendo em geral alimentação, hidrólise (etapa anaeróbia), aeração, sedimentação, descarte de efluente e de lodo, com a alimentação ascensional ou não, além de câmara única ou zonas dedicadas para a nitrificação e desnitrificação. Nesses sistemas, diferentes comunidades microbianas crescem de forma suspensa formando flocos dispersos ou grânulos automobilizados capazes de efetuar as conversões bioquímicas envolvidas nos processos de remoção de nutrientes, podendo-se destacar os organismos nitrificantes, desnitrificantes e biodesfosfatadores (BASSIN et al., 2012; SANTOS, 2014).

Dentre os sistemas utilizados para remoção biológica de fósforo a maior diferença entre os mesmos é a forma de se usar a zona anóxica de maior proteção contra a entrada de nitrato na zona anaeróbia, a zona anóxica é relativamente sub utilizada de modo que a remoção de nitrato será menor que a capacidade de desnitrificação a exemplo da necessidade de modificação do sistema UCT, no qual surtiu efeito positivo na remoção biológica de fósforo (VAN HAANDEL; MARAIS, 1999).

O Quadro 1 apresenta diferentes trabalhos com suas respectivas eficiências tais como o trabalho desenvolvido por Mostafa et al. (2014), usando sistemas Bardenpho modificado com objetivo de melhorar a eficiência do efluente de uma planta piloto que não foi bem sucedida na remoção de material carbonáceo e nutrientes (nitrogênio e fósforo), para plantas piloto usando 4 estágios com reatores 1, 2, 3, e 4 com fases alternadas anóxica, aeróbia, anóxica e

aeróbia respectivamente obtendo uma eficiente remoção em termos de demanda química de oxigênio, demanda bioquímica de oxigênio, sólidos suspensos totais (SST), nitrogênio total (total-n) e fósforo total de 97%, 98%, 97%, 97% e 50% respectivamente. Já a remoção da demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO5), sólidos suspensos totais (SST), nitrogênio total (Total-N) e fósforo total para plantas piloto de 5 estágios com alternância das fases anaeróbia, anóxico, aeróbio, anóxica e aeróbia de Bardenpho obteve eficiência de 99%, 99%, 99% e 90% respectivamente, mostrando-se uma boa alternativa de remoção de nutrientes, o Bardenpho de 4 estágios utilizado principalmente para a remoção de nitrogênio, mostrando menor eficiência da remoção de fósforo, já o Bardenpho de 5 estágios, também é reforçada para remoção de fósforo com a zona anaeróbia obtendo melhor resultado na remoção de fósforo. Já o trabalho realizado por Bashar et al. (2018), apresenta uma avaliação operacional e econômica abrangente de seis diferentes cenários de tratamento de águas residuárias, remoção biológica de nutrientes no sistema UCT modificado, Bardenpho de cinco estágios, UCT modificado mais biorreator de membrana, remoção biológica de fósforo avançada com lodo ativado, recuperação de fósforo como estruvita usando UCT modificado e UCT modificado mais filtração terciária.

Quadro 1. Diferentes sistemas de remoção biológica de fósforo

SISTEMAS	VANTAGENS	DESVANTAGENS	EFICIENCIA	REFERENCIA
BARDEPHO COM 3 REATORES	Alta taxa de desnitrificação Idade de lodo curta	Pode não funcionar, recirculação de nitrato. Desnitrificação incompleta Tendência de formação de lodo filamentoso		VAN HAANDEL; MARAIS, (1999)
BARDEPHO COM 5 REATORES	Boa remoção de nitrogênio	Desnitrificação incompleta Nitrato passa para zona anaeróbia prejudicando a remoção de fósforo	90 % de remoção de fósforo	MOSTAFA et al., (2014)
UCT	Prevenção recirculação de nitrato	Desnitrificação incompleta Uso da capacidade de desnitrificação é ineficiente		VAN HAANDEL; MARAIS, (1999)
UCT MODIFICADO	Assegura melhor condição anaeróbia	Menor capacidade de desnitrificação	Concentração de fósforo total de 0.05 mg / L. Eficiências de 84,4 e 83,5%	BASHAR et al (2018)
RBS	Muito flexível para combinar remoção de nitrogênio e fósforo numa mesma unidade operacional requisitos mínimos de espaço, facilidade de gerenciamento e flexibilidade do sistema	Exigem um nível mais alto de controle de processo e automação	Remoção de fósforo total e ortofosfato com 82 e 81%,	MANSOURI e ZINATIZADEH, (2017) HENRIQUE et al. (2010)

O sistema UCT modificado seguido de filtração terciária se destacou dentre os seis estudados em termos econômicos e de melhor eficiência do processo de recuperação de fósforo, com configurações mais eficazes em termos de custos (\$ 44.97 / P removido) produzindo efluente com uma concentração de fósforo total de 0.05 mg / L e com eficiência de 99,1%. Já UCT modificado e Bardenpho operando sem acréscimo de nenhum reator adicional obteve eficiências de 84,4 e 83,5% respectivamente (BASHAR et al., 2018). (83) 3322.3222

Henrique et al. (2010), usou reatores em bateladas sequenciais (RBS), para avaliar a remoção biológica de fósforo em sistemas de lodo ativado, tratando esgoto doméstico, monitorado com diferentes tempos de retenção celular (TRC): 20, 5 e 3 dias. Esses experimentos foram avaliados em escala de bancada com o uso da respirometria, utilizando-se acetato como fonte de carbono orgânico. Os resultados mostraram satisfatória remoção de fósforo total nos três experimentos. No entanto, o sistema R2 monitorado com TRC de cinco dias apresentou os melhores resultados de remoção de fósforo total e ortofosfato com 82 e 81%, respectivamente.

Nos ensaios com substrato sintético, foi também o R2 que apresentou maiores relações mgP.mg SSV-1, com percentual de 12,6%. Mesmo com maiores valores de remoção de fósforo no sistema R2, não houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre os três experimentos. Os resultados mostraram que a concentração de sólidos em suspensão nos reatores não foi o fator limitante no processo de remoção de fósforo; no entanto, a baixa disponibilidade da DQO (6 a 10%) limitou a remoção biológica de fósforo (HENRIQUE et al., 2010). Yuan et al. (2016), avaliaram uma nova estratégia para melhorar a eficiência de remoção de nitrogênio e fósforo de efluentes municipais através da alimentação com produtos de fermentação alcalina de lodo como fontes de carbono usando reator de batelada sequencial (RBS). Foi estudado e comparado os desempenhos de dois RBS, tratando águas residuárias municipais, um RBS foi alimentado com produtos de fermentação de lodo; e outro com águas residuárias, foram comparados entre si, operados sob mesmas condições com dois ciclos de 12 horas por dia, cada ciclo consistiu em 180 min de reação anaeróbia (incluindo 15 min de alimentação), 120 min de reação aeróbia, 120 min de reação anóxica, 60 min de reação aeróbia, 120 min de reação anóxica, 10 min de reação aeróbia, 90 min de sedimentação, 10 min de decantação.

O RBS usando alimentação com produtos de fermentação alcalina de lodo, obteve eficiências de remoção de nitrogênio de 82,9% e fósforo de 96,0%, enquanto o RBS alimentado com águas residuária obteve os valores de 55,9% e 6,1% nitrogênio total e fósforo respectivamente, isso indica que o águas residuárias não continham quantidade adequada de carbono orgânico para apoiar a liberação de fósforo, mesmo após a desnitrificação completa no RBS que não foi alimentado com fermentação de lodo (YUAN et al., 2016).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das discussões relatadas nos artigos expostos, o sistema Bardenpho obteve eficiências de 83, 5 e 90% e, UCT modificado obtiveram eficiências de 84,4% e 99% quando após o tratamento UCT, utilizou-se de um filtro e o RBS de 81, 82% e 96%, pode-se concluir que o RBS obteve melhores resultados dentre os trabalhos, pois o sistema UCT que obteve um efluente com uma concentração de fósforo total de 0.05 mg / l foi seguida de um filtro que aumentou a eficiência do sistema UCT modificado. O reator em bateladas sequenciais é o sistema mais simples de lodo ativado, pois incorpora todas as unidades do processo convencional em apenas um reator. Tendo como vantagens em relação aos métodos convencionais de lodos ativados a sua forma simplificada de construção, facilidade na instalação de equipamentos tecnicamente simples, grande flexibilidade frente à variação das cargas e vazões, funcionamento relativamente simplificado, e boa decantabilidade do lodo, ocupa menor espaço, visto que todo processo e mecanismo de remoção de fósforo acontece em um único reator.

REFERÊNCIAS

- BASSIN, J. P.; KLEEREBEZEM, R.; DEZOTTI, M. W. C.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. Simultaneous nitrogen and phosphate removal in aerobic granular sludge reactors operated at different temperatures. *Water Res.* 46, pp. 3805–3816. 2012.
- BASHAR, R.; GUNGOR, K.; K.G. KARTHIKEYAN; BARAK, P. Cost effectiveness of phosphorus removal processes in municipal wastewater treatment. *Journal Chemosphere* 197 (2018) 280e290. 2018.
- BARNARD, J.; DUNLAP, P.; STEICHEN, M. Rethinking the Mechanisms of Biological Phosphorus Removal. *WATER ENVIRONMENT RESEARCH* _ November 2017.
- BILLER, P.; JOHANNSEN, IB; PASSOS, S.J; OTTOSEN, M.D.L. Primary sewage sludge filtration using biomass filter aids and subsequent hydrothermal co-liquefaction. *Water Research*, v. 130, p.58–68, 2018.
- BUNCE, J.T.; NDAM, E.; OFITERU, D.; MOORE, A e GRAHAM, W.D. A Review of Phosphorus Removal Technologies and Their Applicability to Small-Scale Domestic Wastewater Treatment Systems. *Frontiers in Environmental Science* | www.frontiersin.org; doi: 10.3389/fenvs.2018.00008 published: 22 February 2018.
- DIVISION; WASTEWATER. Phosphorus Treatment and Removal Technologies. Minnesota Pollution Control Agency, June, 2006.
- HENRIQUE, N.S.; SOUSA, T.J.; CEBALLOS, O.S.B; BRASIL, P. D. Remoção biológica de fósforo em reatores em bateladas sequenciais com diferentes tempos de retenção de sólidos. *Revista, Eng Sanit Ambient*. v.15 n.2, p. 197-204, 2010.
- JANSSEN, P. M. J.; MEINEMA, K.; DER ROEST, H. F. V. Biological phosphorus removal: Manual for design and operation. IWA Publishing. London. 20
- MANSOURI, M. A and ZINATIZADEH, A.A. A comparative study of an up-flow aerobic/anoxic sludge fixed film bioreactor and sequencing batch reactor with intermittent aeration in simultaneous nutrients (N, P) removal from synthetic wastewater. *Water Science e Technology*. v.76,5, p.1044–1058, 2017.
- METCALF; EDDY. (Org.: George Tchobanoglous, Franklin Louis Burton, H. David Stensel). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw Hill, 4th edition, 1819 p. 2003.
- METCALF e EDDY. *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. Tradução: Ivanildo Hespagnol, José Carlos Mierzwa. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- MOSTAFA M. EMARA, FARAG A. AHMED, AHMED M.A. ABDEL RAZEK. Biological Nutrient Removal in Bardenpho process. *Journal of American Science* (83) 3322-3222. <http://www.jofamericanscience.org> 2014;10(5s).

RUBIO-RINC, F.J; LOPEZ-VAZQUEZ,C.M; WELLES, L;VAN LOOSDRECHT, M.C.M.; BRDJANOVIC, D. Cooperation between Candidatus Competibacter and Candidatus Accumulibacter clade I, in denitrification and phosphate removal processes. Water Research. v .120, p. 156-164, 2017.

SANTOS, M.V.E. Estratégias para predominância de organismos acumuladores de fósforo em sistemas de lodo ativado e respirometria aplicada à biodesfosfatação. Tese (Doutorado)-Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, UEPB, Campina Grande, 2014.

TIAN, Q; ZHUANG, L; ONG, K.S; WANG, Q ; WANG ; XIE, K; ZHU, Y; FANG L. Phosphorus (P) recovery coupled with increasing in fluent ammonium facilitated intracellular carbon source storage and simultaneous aerobic phosphorus & nitrogen removal. Journal Water Research. v.119,12, p.267–275, 2017.

VAN HAANDEL, A. C.; MARAIS, G. O (1999) Comportamento do sistema de lodo ativado. Epgraf. Campina Grande, PB.

VAN HAANDEL, A. C. & VAN DER LUBBE, J. (2007). Handbook Biological Waste Water Treatment. Quist Publishing – Leidschendam - The Netherlands, 570 pages.

YOON, T.I., LEE, H.S., KIM, C.G., 2004. Comparison of pilot scale performances between membrane bioreactor and hybrid conventional wastewater treatment systems. Journal of Membrane Science 242, 5–12.

YUAN,Y; LIU,J; MA,B; LIU,Y; WANG, B; PENG, Y. Improving municipal wastewater nitrogen and phosphorous removal by feeding sludge fermentation products to sequencing batch reactor (SBR). Jornal Bioresource Technology. 326–334, 2016.