

Reator anaeróbio híbrido para o tratamento do esgoto doméstico: aprimoramento tecnológico visando o aumento da capacidade de assimilação de cargas orgânicas de reatores UASB

Paulo Gustavo Sertório de Almeida⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Thiago Lopes da Silva Araujo

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB/UNESP). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Sócio-Diretor da BIOPROJ Tecnologia Ambiental.

Moacir Messias de Araujo Jr.

Graduado em Engenharia Civil pela EESC-USP (2002), Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP (2006), pesquisador de pós-doutorado no Laboratório de Processos Biológicos da EESC-USP (2011-2015) e atual Diretor Comercial e de Tecnologia na Bioproj Tecnologia Ambiental. Experiência consolidada no desenvolvimento e aplicação de tecnologias para processos de tratamento de águas residuárias. Responsável pelo projeto e implementação de diversas estações de tratamento de esgoto no Brasil.

Endereço⁽¹⁾: Rua XV de Novembro, 656 - Pq. Santa Mônica - São Carlos - SP - CEP: 13261-206 - Brasil - Tel: +55 (16) 3416-7110 - e-mail: paulo.almeida@bioproj.com.br

RESUMO

O objetivo do trabalho foi apresentar o desempenho de um reator anaeróbio híbrido (RanaBio) para o tratamento do esgoto doméstico, visando o aumento da capacidade de assimilação de cargas orgânicas de reatores UASB. O RanaBio possuía a configuração de um reator UASB, ao qual foi inserido meio suporte randômico (confinado) baseado em espuma de poliuretano em uma parte do compartimento de digestão. O sistema de tratamento em escala piloto (volume útil: 12,5 m³) foi submetido a 3 (três) diferentes fases operacionais pela variação do TDH e configuração do reator. Na primeira fase, o reator operou como um reator UASB convencional, com o TDH de 8,8h. Nas fases consecutivas, o reator UASB foi modificado para a operação como RanaBio, considerando TDH de 5,2 h e 3,9 h, respectivamente. O desempenho da tecnologia RanaBio para o tratamento anaeróbio do esgoto doméstico foi satisfatório para TDHs menores que 5,5 h, sobretudo em relação ao controle da perda de sólidos com o efluente anaeróbio. A remoção de matéria orgânica foi afetada pela diminuição do TDH, com uma redução do desempenho em torno de 10 a 15%. Em termos de custos de implantação, as opções tecnológicas resultam em investimentos semelhantes. Contudo, a demanda operacional e de manutenção referente ao RanaBio é potencialmente menor, dado o menor número de módulos reacionais requeridos e menor demanda de área para a assimilação da carga orgânica afluente. Neste caso, a etapa de pós-tratamento deve ser avaliada no sentido de observar o acréscimo de cargas aplicadas e produção de lodo associadas ao aumento de concentrações efluentes do RanaBio.

PALAVRAS-CHAVE: condicionamento de efluente anaeróbio; esgoto; RanaBio; remoção de matéria orgânica; controle de sólidos.

INTRODUÇÃO

O uso de reatores UASB é amplamente considerado no Brasil para o tratamento do esgoto de origem doméstica. Notáveis vantagens associadas à tecnologia referem-se ao bom desempenho para a conversão da matéria orgânica biodegradável, bem como a baixa produção de lodo. No entanto, recomenda-se que haja especial atenção a melhorias de projeto e construção de reatores UASB, de forma que a tecnologia mantenha sua aplicabilidade valorizada (LETTINGA 2011, comunicação pessoal; CHERNICHARO *et al.*, 2019). A padronização de órgãos constitutivos, a sistematização operacional para o gerenciamento do lodo (LOBATO *et al.*, 2018) e o controle da perda de sólidos com o efluente anaeróbio (DE PAULA, 2007, BATISTA *et al.*, 2021) são tópicos de relevância, entre outros (p.ex.: gerenciamento de espuma, controle da corrosão e emissão de gases odorantes, etc).

Em relação ao controle da perda de sólidos com o efluente, uma alternativa é aprimorar a capacidade de retenção física do lodo no compartimento de digestão, de forma que haja manutenção ou melhoria da qualidade do efluente tratado. Neste contexto, o reator anaeróbico híbrido denominado RanaBio é aplicável, principalmente (i) nos casos onde há necessidade de ampliação do atendimento com a elevação da carga orgânica afluente, e/ou (ii) quando a disponibilidade de área tende a ser um fator limitante.

O RanaBio possui a configuração de um reator UASB, ao qual insere-se meio suporte randômico (confinado) baseado em espuma de poliuretano em uma parte do compartimento de digestão. A experiência em escala plena (GAUDENCIO, 2016) indica, para um tempo de detenção hidráulica (TDH) médio de 7,5 h, concentrações efluentes em torno de 70 mg-SST/L e remoção de DQO de 60%. Contudo, visando manter os atributos de sua aplicabilidade (ampliação do atendimento com menor demanda de área), a tecnologia deve ser avaliada em condições de menor TDH. Neste trabalho, o desempenho do RanaBio a TDHs menores que 5,5 h foi experimentalmente avaliado, considerando-se ainda uma comparação em termos de custos relativos de implantação entre reator UASB e RanaBio. O impacto nas condições de projeto e operação em etapa de pós-tratamento é complementarmente discutido.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição geral. O sistema de tratamento em escala piloto foi submetido a 3 (três) diferentes fases operacionais pela variação do TDH e configuração do reator (Tabela 1). Em cada fase, uma parcela de esgoto doméstico (tomada pós-tratamento preliminar de uma ETE em escala plena) foi utilizada para a alimentação do sistema. Na primeira fase, o reator foi operado como um reator UASB convencional. Para as fases consecutivas, uma estrutura de confinamento preenchida com meio suporte randômico baseado em espuma de poliuretano foi instalada no compartimento de digestão, visando maior retenção física de sólidos para a diminuição do TDH. Em seguida, uma análise comparativa de desempenho foi elaborada.

Tabela 1. Fases operacionais avaliadas para o aprimoramento tecnológico do reator anaeróbico.

Fases operacionais	Esgoto bruto (valores médios)		TDH (h)	Velocidade ascensional (m/h)	Tempo de operação (d)	Compartimento de digestão
	(mg-DQO/L)	(kg-DQO/m ³ .d)				
UASB (TDH-8,8h)	610	1,7	8,8	0,63	68	Sem meio suporte
RanaBio (TDH-5,2h)	611	2,5	5,2	0,94	49	Com meio suporte
RanaBio (TDH-3,9h)	471	2,6	3,9	1,25	79	Com meio suporte

Aparato experimental (Figura 1). O reator anaeróbico cilíndrico com volume útil de 12,5 m³ (diâmetro interno: 1,7 m; altura útil: 5,5 m) foi projetado como um reator UASB, contudo, permitindo o subsequente preenchimento parcial do compartimento de digestão com um meio suporte baseado em espuma de poliuretano (Biobob®). Assim, para as fases consecutivas, 40% do volume do compartimento de digestão era preenchido com o Biobob®, sendo a estrutura de confinamento posicionada abaixo dos defletores (altura da estrutura de confinamento: 2,20 m). O aparato experimental contava com medidor de vazão do tipo rotâmetro, instalado após a bomba de alimentação do esgoto bruto.

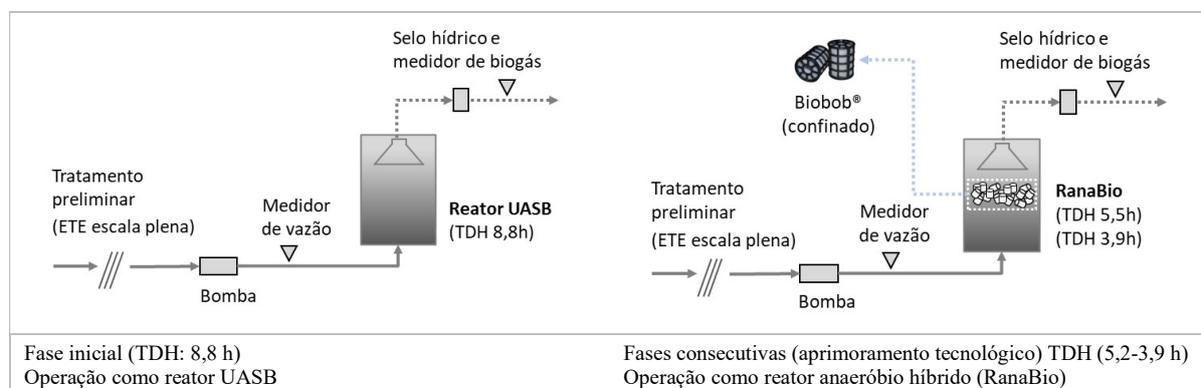


Figura 1. Fluxograma do aparato experimental. O reator foi consecutivamente modificado com o preenchimento de parte do compartimento de digestão com Biobob®.

Amostragem (fase líquida) e análises físico-químicas. Amostras compostas de esgoto bruto e efluente anaeróbico foram diariamente coletadas ao longo de 24 h com o uso de bombas peristálticas e conservadas em até 4°C. As concentrações de DQO, DBO e SST foram determinadas segundo AWWA (1998).

Avaliação relativa de custos de implantação. Uma análise preliminar e comparativa para os sistemas reator UASB (TDH 8,8) e RanaBio (TDH 5,2 e 3,9 h) foi realizada para uma vazão de 8000 m³/d e concentração de DQO média de 700 g-DQO/m³. Visando obter uma comparação global realista entre as tecnologias, os itens considerados foram: (i) serviços de engenharia e gestão, (ii) materiais e serviços de obras civis, (iii) materiais e serviços de automação, (iv) materiais e serviços elétricos, (v) materiais e serviços hidromecânicos e (vi) equipamentos hidromecânicos.

RESULTADOS

A Figura 2 mostra as concentrações e eficiências de remoção para DQO, DBO e SST. Os resultados para a operação do RanaBio_{TDH-3,9h} foram apresentados separadamente, uma vez que o esgoto bruto esteve menos concentrado nesta fase operacional (Tabela 1).

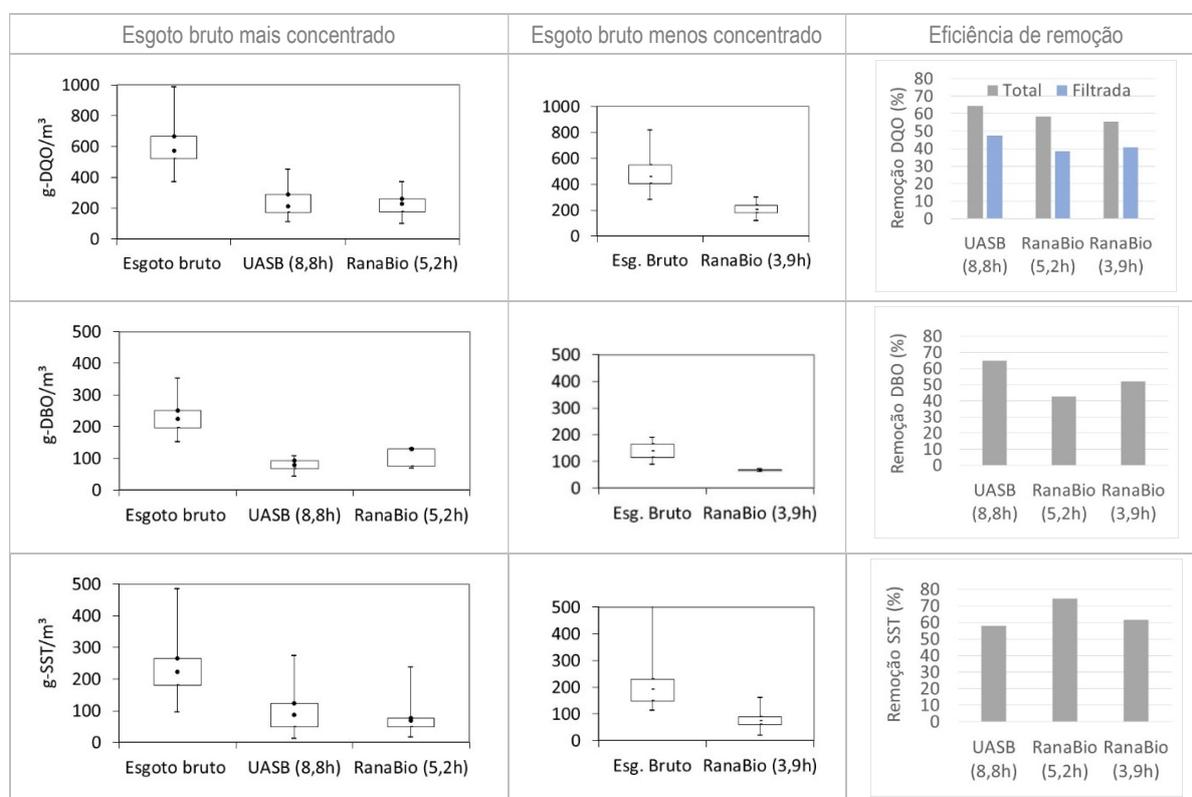


Figura 2. Concentrações de DQO, DBO e SST, e eficiência de remoção para os respectivos constituintes (em valores medianos).

Desempenho dos sistemas (Reator UASB e RanaBio). Para o Reator UASB_{TDH-8,8h} e RanaBio_{TDH-5,2h}, as concentrações efluentes de DQO e SST mantiveram-se razoavelmente semelhantes. Contudo, a diminuição do TDH de 8,8 h para 5,2 a 3,9 h resultou em decréscimo da remoção mediana de DQO filtrada (de ≈ 50% para 40%) e DBO (de 65% para 40-50%). Em relação ao parâmetro SST, uma menor variabilidade em termos de concentrações efluentes foi observada para o RanaBio_{TDH-5,2h}, com um aumento de desempenho de 60% para 75%. Adicionalmente, a perda de sólidos com o efluente anaeróbico foi semelhante entre os sistemas RanaBio_{TDH-3,9h} e Reator UASB_{TDH-8,8h}, mesmo com a notável distinção entre os respectivos TDHs.

Custos estimados de implantação (avaliação em termos relativos). Como mostra a Figura 3, os custos estimados de implantação do Reator UASB e RanaBio tendem a ser destacadamente semelhantes, em termos relativos. Contudo, em virtude do menor TDH imposto ao RanaBio, os volumes reacionais e áreas úteis associadas são expressivamente menores. Vale adicionalmente mencionar que o custo de operação associado aos sistemas RanaBio_{TDH-5,2h} e RanaBio_{TDH-3,9h} é aproximadamente 10% menor em virtude da menor

produção de lodo anaeróbio (em 15%) por consequência da menor remoção de DBO. Os impactos nas cargas aplicadas e produção do lodo aeróbio no pós-tratamento são posteriormente discutidos.

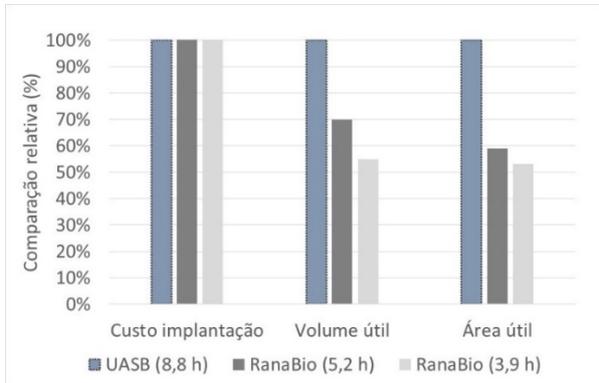


Figura 3. Comparação relativa entre custos de implantação, volumes e áreas úteis para o Reator UASB e RanaBio.

DISCUSSÃO

A inserção de meio suporte randômico baseado em espuma de poliuretano no compartimento de digestão propiciou maior controle da perda de sólidos e manutenção da qualidade do efluente, mesmo com considerável diminuição do TDH (de 8,8 h para 3,9h). Neste caso, a capacidade de assimilação de cargas orgânicas médias aplicadas poderia ser aumentada de 1,7 para 2,6 kg-DQO/m³.d, considerando velocidades ascencionais de 1,25 m/h. Contudo, a diminuição do TDH afetou a remoção de frações solúveis e biodegradáveis de matéria orgânica, tal como indicado pelas eficiências medianas de remoção de DQO filtrada e DBO.

Custos de implantação. As opções tecnológicas (reator UASB e RanaBio) resultariam em investimentos semelhantes para implantação. Isto porque a redução do volume de reator (consequentemente, do volume de concreto armado e órgãos constitutivos do sistema), resultante da diminuição do TDH, é compensada pelo custo global associado ao meio suporte (Biobob® + estrutura de confinamento). Contudo, a demanda operacional e de manutenção referente ao RanaBio é potencialmente menor, dado o menor número de módulos reacionais requeridos para a assimilação da carga orgânica afluente. Assim, uma menor quantidade de pontos de descarte de lodo excedente, menor área de cobertura a ser protegida contra corrosão, bem como um menor número de órgãos constitutivos a serem inspecionados favorecem o aprimoramento tecnológico proposto. Adicionalmente, a demanda de área associada à tecnologia RanaBio é significativamente menor (≈ 40 a 50%), quando comparado com reatores UASB.

Efeito da diminuição do TDH_{UASB} na etapa de pós-tratamento. Considerando tecnologias com biofilme usualmente aplicadas no Brasil para o pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, como filtros biológicos percoladores (FBP) ou biofiltros aerados submersos (BFAS), a diminuição do TDH de 8,8 h (Reator UASB) para 5,2 h (Ranabio) poderia resultar em COVs aplicadas acima do limite máximo recomendado de 1,0 kg-DBO/m³.d (Chernicharo *et al.*, 2001), em um mesmo volume reacional considerado para o FBP. Para FBPs preenchidos com meio suporte de espuma, análises experimentais com COVs aplicadas acima de 1,0 kg-DBO/m³.d ainda são necessárias, embora avanços em estudos prospectivos com o uso de modelagem matemática indiquem resultados potenciais para condições de operação semelhantes (ALMEIDA *et al.*, 2023). Neste caso, a estimativa de produção de lodo seria em torno de 0,65 kg-SSV/kg-DQO_{removida}, segundo os resultados do referido estudo. Para BFAS, de acordo com experiências em obtidas em escala plena, caso a espuma de poliuretano seja utilizada como meio suporte, a remoção de matéria orgânica tende a ser mantida, mesmo com COVs em torno de 5,0 kg-DQO/m³.d (≈ 3,0 kg-DBO/m³.d), com uma produção de lodo entre 0,20 e 0,30 kg-SSV/kg-DQO_{removida}.

CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos neste estudo foi observado que:

- O desempenho da tecnologia RanaBio para o tratamento anaeróbio do esgoto doméstico foi satisfatório para TDHs menores que 5,5 h. Contudo, a remoção de frações solúveis e biodegradáveis de matéria orgânica foram afetadas pela diminuição do TDH;
- A instalação de uma estrutura de confinamento preenchida com meio suporte tipo Biobob® no compartimento de digestão de reatores UASB é uma solução tecnológica financeiramente viável para o aumento da capacidade de assimilação de cargas orgânicas. Neste caso, os requisitos de área e volume reacional, bem como as demandas de operação e manutenção, tendem a ser minimizados;
- A escolha da tecnologia de pós-tratamento do efluente anaeróbio deve ser avaliada no sentido de observar o acréscimo de cargas orgânicas aplicadas e produção de lodo associadas ao aumento de concentrações efluentes do RanaBio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, P.G.S.A.; RESENDE, C.O.; BRESSANI RIBEIRO, T.; DIAS, E.H.O. Produção de lodo por FBP preenchido com espuma de poliuretano aplicado no pós-tratamento de efluentes anaeróbios: um estudo de modelagem matemática. In: 32º Congresso Brasileiro de engenharia Sanitária e Ambiental - CBESA. Belo horizonte, 2023, Brasil. ABES-BH, 2023.
2. BATISTA, I. F.; MORA, E. J. C.; FONSECA, P. R. S.; PASSOS, F.; CHERNICHARO, C. A. L. Aplicabilidade da filtração em membrana dinâmica para o pós-tratamento de efluentes de reatores UASB. Coletâneas de Notas Técnicas 3: Reúso não potável de água - Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso. Cadernos Técnicos em Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 2, no 3, p. 85-98, 2021.
3. CHERNICHARO, C.A.L., BRESSANI-RIBEIRO, T. Anaerobic reactors for sewage treatment: design, construction, and operation. IWA Publishing, London. 420 p, 2019.
4. DE PAULA, F. S. Influência de aspectos hidráulicos na otimização de parâmetros de projeto de reatores UASB tratando esgotos domésticos. 2007. 126 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
5. GAUDENCIO, B. O. Reator híbrido (leito fixo e manta de lodo) em escala plena tratando esgoto doméstico: avaliação da nova configuração. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado em hidráulica e saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.
6. LOBATO, L. C. S., BRESSANI-RIBEIRO, T., SILVA, B. S., FLÓREZ, C. A. D., NEVES, P. N. P., CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 3: Gerenciamento de lodo e espuma. Revista DAE – edição especial, v. 66, no 214, p. 30-55, 2018.