

## REATOR ANAERÓBIO HÍBRIDO: ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA AUMENTO DE CAPACIDADE DE REATORES UASB

### **Thiago Lopes da Silva Araujo<sup>(1)</sup>**

Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP).

Diretor Comercial na Bio Proj Tecnologia Ambiental.

### **Moacir Messias de Araujo Junior**

Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP).

Diretor Geral na Bio Proj Tecnologia Ambiental.

### **Philippe Lopes da Silva Araujo**

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (FEB-UNESP)

Coordenador Operacional de Esgotos na Concessionária Águas de Niterói do Grupo Águas do Brasil.

### **André Lermontov**

Doutor em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos pela Escola Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Superintendente no Grupo Águas do Brasil.

### **Eugenio Foresti**

Professor Titular da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Major José Inácio, 2920 - Centro - São Carlos - SP - CEP: 13560-161 - Brasil - Tel: +55 (16) 3416-7110 - e-mail: thiago@bioproj.com.br.

### **RESUMO**

O presente trabalho estudou o aumento de capacidade de tratamento de um reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) por meio da adição de material suporte para adesão celular (Biobob®), avaliando-se as eficiências de remoção de matéria orgânica e sólidos em suspensão. A operação do reator anaeróbio, de volume útil igual a 12,5 m<sup>3</sup>, foi conduzida em duas etapas. Na primeira o sistema foi operado como um reator de manta de lodo e escoamento ascendente (UASB), com TDH de 8,8 h e velocidade ascensional de 0,63 m.h<sup>-1</sup>. Na segunda etapa, introduziu-se 5,0 m<sup>3</sup> de material suporte Biobob® no leito reacional do reator, transformando-o em reator anaeróbio híbrido (HANR), variando-se a vazão de alimentação para TDH entre 7,4 h ( $v_s$  de 0,66 m.h<sup>-1</sup>) e 3,9 h ( $v_s$  de 1,25 m.h<sup>-1</sup>). Para condições de operação similares, o reator anaeróbio híbrido (HANR) apresentou melhor desempenho na remoção de DQO e SST que o reator UASB, crescendo em até 18% e 30% a eficiência de remoção, respectivamente. Para a velocidade ascensional de 1,25±0,02 m.h<sup>-1</sup> e TDH de 3,9±0,1 h, o HANR apresentou concentrações médias no efluente tratado de 205±46 mg DQO<sub>t</sub>.L<sup>-1</sup> e 73±30 mg SST.L<sup>-1</sup> e eficiências de remoção de 55±9% DQO<sub>t</sub> e 63±14% SST.

**PALAVRAS-CHAVE:** esgoto sanitário; biomassa imobilizada; reator anaeróbio híbrido, UASB.

### **INTRODUÇÃO**

O tratamento de esgotos sanitários representa um grande desafio atualmente, visto que o crescimento populacional intenso, notadamente em países em desenvolvimento, como o Brasil, não é acompanhado pelas obras de infraestrutura necessárias, em especial as de saneamento. Como consequência, estabelece-se uma situação de precariedade em relação à saúde da população e à conservação ambiental. No Brasil, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008 mostrou que somente 55,2% dos municípios brasileiros possuem rede coletora de esgotos sanitários, e apenas 28,5% realizam algum tipo de tratamento dos esgotos coletado (IBGE, 2010). Desta forma, é de extrema importância o desenvolvimento de tecnologias eficientes e econômicas que viabilizem a aplicação de sistemas de tratamento de forma ampla e satisfatória para a melhoria das condições de saneamento.

A aplicação de reatores anaeróbios como unidades principais de tratamento tem se mostrado economicamente vantajosa para a remoção de matéria orgânica de esgoto sanitário, principalmente em regiões tropicais e subtropicais onde a temperatura ambiente favorece a digestão anaeróbia. O desenvolvimento de reatores anaeróbios de alta taxa, operados com alto tempo de retenção celular e baixo tempo de detenção hidráulica incorporando altas quantidades de biomassa ativa, proporcionam um alto potencial para o tratamento de águas residuárias com baixas concentrações de substrato, como o esgoto sanitário (Lettinga, 2001).

Contudo, a concepção original dos reatores UASB apresenta dificuldades para tratar efluentes com elevadas cargas volumétricas e concentrações de sólidos, como os esgotos sanitários, onde a velocidade ascensional e a digestão da DQO particulada são as etapas limitantes do processo (Lettinga & Hulshoff Pol, 1991; Foresti et al., 2006; van Haandel et al., 2006). O bom contato entre a biomassa e o substrato são fundamentais para garantir uma boa velocidade de degradação. Com mistura insuficiente, devido à baixa velocidade ascensional aplicada e à baixa produção de biogás, os reatores UASB apresentam limitações de transferência de massa, além de um maior potencial de formação de espuma.

Deste modo, os reatores UASB foram desenvolvidos para tratar efluentes cuja concentração favoreça a mistura e a ocorrência da granulação do lodo promovidas pelos gases, e não pelo fluxo do líquido (Kato et al., 1999). Segundo Foresti et al. (2006), apesar do reconhecido sucesso dos reatores UASB para o tratamento de esgotos sanitários, a perda de sólidos no efluente e a formação de espuma no interior do separador trifásico são duas limitações evidentes. Assim, o maior sucesso dos reatores UASB de fato não se deu para o tratamento de esgotos sanitários, e seu desempenho pode ser melhorado se pesquisas forem desenvolvidas no sentido de adaptar seu desenho às características desta água residuária (Foresti et al., 2006).

Sob o prisma da gestão e sustentabilidade socioeconômica, grande parte das estações de tratamento de esgotos sanitários em operação no Brasil enfrenta dois fatores principais: (i) o gerenciamento e a disposição do lodo biológico e da espuma gerados; e (ii) a necessidade de se aumentar a capacidade de tratamento para acompanhar o crescimento populacional. Estes fatores refletem diretamente nos custos operacionais das estações de tratamento, influenciando nas decisões de implantação e gestão das mesmas. Neste sentido, alternativas tecnológicas que possibilitem o aumento de capacidade de tratamento destas estações, conjuntamente com a redução da geração de lodo biológico são de extrema relevância para o setor.

Uma das alternativas é o aumento da concentração inicial de biomassa no sistema, fazendo com que o substrato seja o fator limitante nos processos de produção e manutenção celular. Essa condição pode ser alcançada por meio de reatores de leito fixo, nos quais observa-se um crescimento regulado da biomassa (Zaiat et al., 1994). Com a utilização de biomassa imobilizada nos reatores biológicos, pode-se aumentar consideravelmente a massa de microrganismos contida nestes reatores, aumentando consequentemente a capacidade nominal de tratamento dos mesmos.

As características do material suporte para a adesão celular (geometria, dimensões, material, porosidade, etc.) exercem uma grande influência no desempenho de reatores de leito fixo. Atualmente, diversos tipos de materiais suporte com altas áreas superficiais foram desenvolvidos. No entanto, grande parte destes não são capazes de proporcionar simultaneamente uma alta porosidade do leito reacional (evitando o cúmulo excessivo de biomassa e consequente aumento da perda de carga) e uma alta capacidade de adesão da biomassa. Assim, frequentes contra lavagens são requeridas para remover o excesso de biofilme formado e reestabelecer o bom desempenho dos reatores biológicos (KASSAB et al., 2010).

Estudos anteriores demonstraram que a espuma de poliuretano (PU) é um excelente suporte para a adesão de biomassa (Huysman et al., 1983; Araujo Jr & Zaiat, 2009; Guo et al., 2010; Lim et al., 2011). No entanto, sua alta compressibilidade e baixa resistência mecânica têm limitado seu uso em plantas em escala comercial. A fim de resolver este problema, um inovador suporte chamado Biobob® (matriz de espuma de PU envolto por uma estrutura externa rígida de polipropileno) foi desenvolvido.

Assim, o presente trabalho objetivou estudar o aumento de capacidade de tratamento de um reator UASB por meio da adição de material suporte para adesão de biomassa (Biobob®), operando como reator anaeróbio híbrido (presença de biomassa suspensa e biomassa aderida), visando a remoção de matéria orgânica e de sólidos em suspensão, submetido a altas cargas volumétricas e altas velocidades ascensionais.

## OBJETIVO

O objetivo principal do projeto de pesquisa foi avaliar o desempenho de um reator anaeróbico híbrido (leito fixo e manta de lodo), em escala piloto, contendo material suporte para imobilização celular (Biobob®) tratando altas cargas volumétricas de esgoto sanitário.

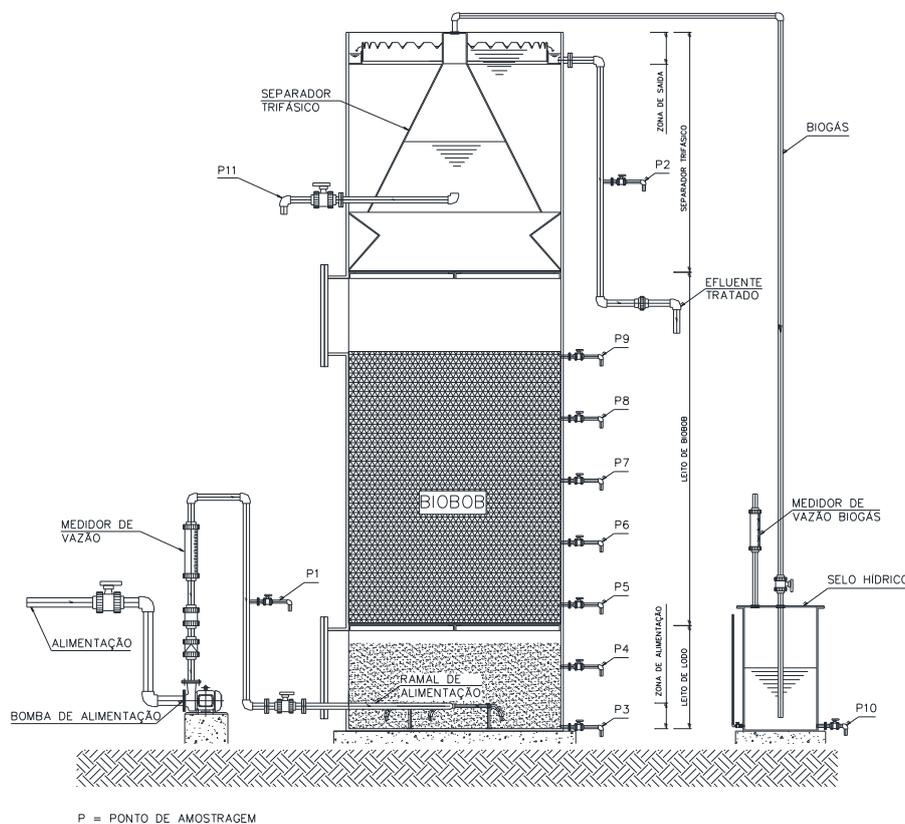
## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar o desempenho do sistema operando como reator anaeróbico de manta de lodo e escoamento ascendente (UASB) e como reator anaeróbico híbrido (leito fixo e manta de lodo);
- Avaliar a influência do tempo de detenção hidráulica no desempenho do reator anaeróbico híbrido quanto à remoção de matéria orgânica;
- Avaliar a influência da velocidade ascensional (acima de 1,00 m.h-1) no desempenho do reator anaeróbico híbrido quanto à retenção de sólidos em suspensão;
- Quantificar a produção de biomassa do sistema operando como reator anaeróbico híbrido.

## MATERIAL E MÉTODOS

A investigação experimental foi realizada em um reator anaeróbico híbrido (leito fixo e manta de lodo), em escala piloto, contendo material suporte para a imobilização celular (Biobob®) tratando esgoto sanitário proveniente do tratamento preliminar da estação de tratamento de esgoto Itaipu (ETE Itaipu), localizada na cidade de Niterói-RJ, Brasil, sob controle da Concessionária Águas de Niterói S/A.

A planta piloto foi projetada para reproduzir em escala reduzida (200 vezes menor) a estação real, obedecendo às mesmas cargas volumétricas aplicadas e taxas de aplicação superficial. Para tanto, o reator anaeróbico de 12,5 m<sup>3</sup> de volume útil, com geometria cilíndrica de 1,7 m de diâmetro interno, altura útil de 5,5 m, era constituído por seis compartimentos, a saber: (i) alimentação (0,18 m); (ii) leito de lodo (0,83 m); (iii) leito de Biobob® (2,20 m); (iv) separação sólido-líquido-gás (1,67 m); (v) selo hídrico (1,00 m); e (vi) saída de efluente (0,15 m). O reator e selo hídrico foram confeccionados em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV). O esquema do aparato experimental é apresentado na Figura 1.



P = PONTO DE AMOSTRAGEM

**Figura 1: Esquema do aparato experimental.**

Como suporte de imobilização da biomassa anaeróbia foi utilizado o produto comercial Biobob®, desenvolvido pela empresa Bio Proj Tecnologia Ambiental Ltda. O Biobob® (Figura 2) é um dispositivo para imobilização celular utilizado como suporte inerte para adesão da biomassa nos reatores biológicos, o qual consiste em uma matriz de poliuretano envolta por uma estrutura rígida de polipropileno, com geometria cilíndrica de 45 mm de diâmetro e 60 mm de altura.



Característica	Descrição
Material interno	Espumas de poliuretano (PU)
Material externo	Estrutura de polipropileno (PP)
Diâmetro (mm)	45
Altura cilíndrica (mm)	60
Massa seca unitária (g)	12
Porosidade do leito (%)	70
Porosidade da espuma (%)	95

**Figura 2: Foto do material suporte Biobob® e suas características.**

A fase experimental foi conduzida em duas etapas. Na primeira o sistema foi operado como um reator UASB, com vazão de alimentação de  $1,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , TDH de 8,8 h e  $v_s$  de  $0,63 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$  (condição equivalente à vazão de projeto da ETE Itaipu). Na segunda etapa, introduziu-se  $5,0 \text{ m}^3$  de Biobob® no leito reacional do reator (40% do volume útil do reator), transformando-o em reator anaeróbio híbrido (HANR), variando-se a vazão de alimentação de  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  para  $2,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , tendo o TDH variado entre 7,4 h ( $v_s$  de  $0,66 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ ) a 3,9 h ( $v_s$  de  $1,25 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ ). Para todas as etapas o sistema foi alimentado continuamente com esgoto sanitário, à temperatura ambiente, proveniente do tratamento preliminar, após gradeamento (espaçamento de 20 mm) e caixa de areia, da ETE Itaipu.

Amostras do afluente e efluente do reator foram coletadas diariamente por meio de bombas peristálticas automáticas (coleta de 100 mL a cada 1 h durante  $24 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ ) e conservadas em temperatura até  $4^\circ\text{C}$ . Foram realizadas análises de parâmetros como demanda química de oxigênio total ( $\text{DQO}_t$ ) e filtrada ( $\text{DQO}_f$ ), sólidos suspensos totais (SST), as quais foram realizadas segundo o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A planta piloto foi operada durante 468 dias ininterruptos à temperatura ambiente média de  $26 \pm 2^\circ\text{C}$ . Para condições de operação similares, o reator HANR, submetido a carga hidráulica volumétrica (CHV – razão entre a vazão de esgoto aplicada e o volume útil do reator) de  $2,9 \pm 0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , apresentou melhor desempenho que o reator UASB, submetido a CHV de  $2,7 \pm 0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , acrescendo em até 18% e 32% as eficiências de remoção de  $\text{DQO}_t$  e SST, respectivamente (Figuras 3 e 4).

Comparando-se o volume necessário para cada tipo de sistema, o reator HANR apresentou-se mais compacto em relação ao reator UASB, pois para se atingir a mesma eficiência de remoção de  $\text{DQO}_t$  (61%), a CHV aplicada ao reator HANR ( $4,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ) foi 1,5 vezes maior que a aplicada ao reator UASB ( $2,7 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ), como pode ser visto no gráfico da Figura 3.

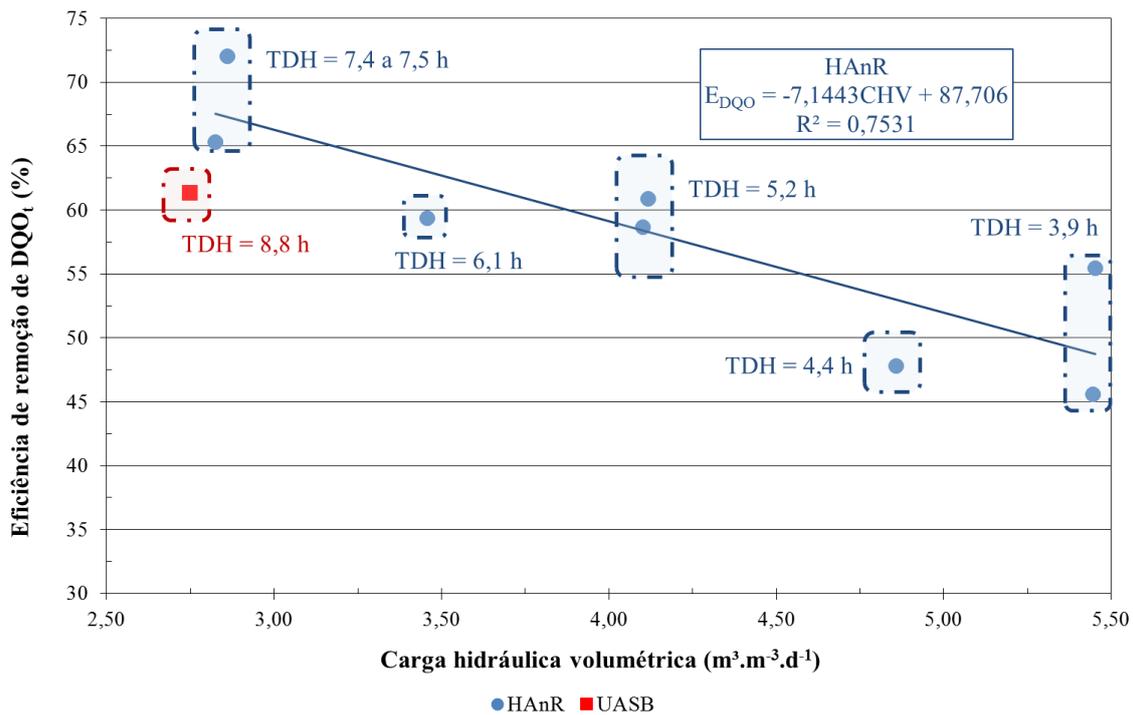


Figura 3: Eficiência de remoção de DQO<sub>t</sub> em função da carga hidráulica volumétrica (CHV) e TDH aplicados ao reator anaeróbio.

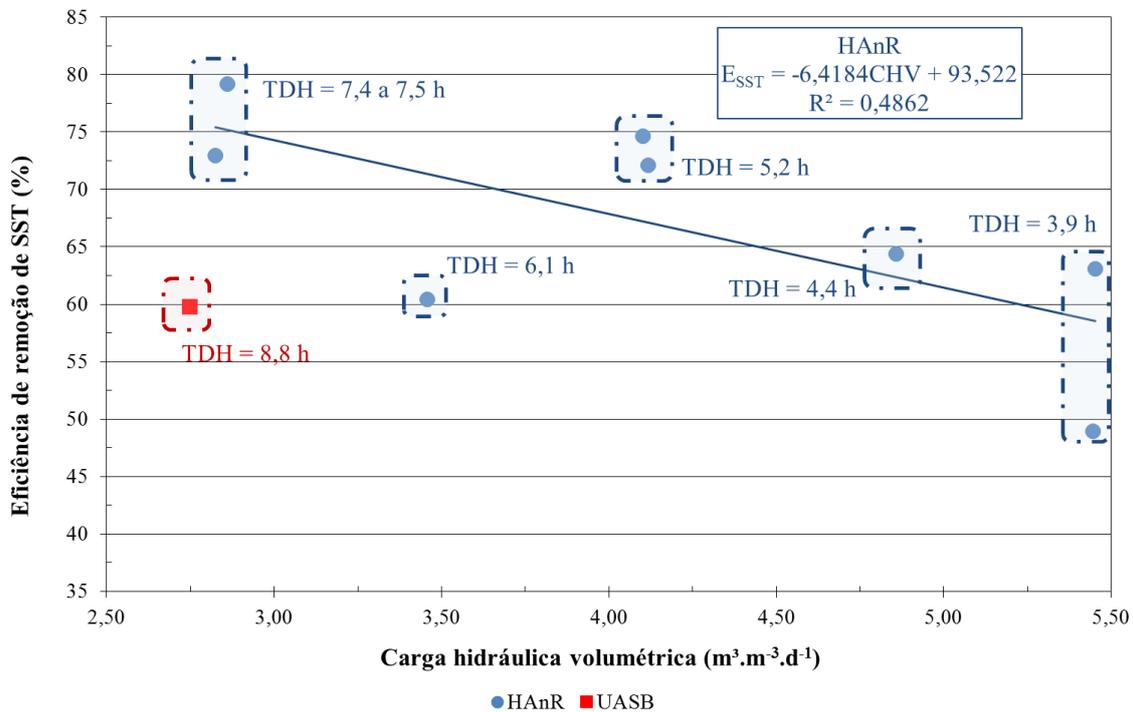


Figura 4: Eficiência de remoção de SST em função da carga hidráulica volumétrica (CHV) e TDH aplicados ao reator anaeróbio.

Mesmo quando submetido a maiores  $v_s$  e menores TDH, o reator HAnR apresentou melhor qualidade do efluente tratado que o reator UASB (Figuras 5 e 6). Para  $v_s$  de  $1,25 \pm 0,02$  m.h<sup>-1</sup> e TDH de  $3,9 \pm 0,1$  h, os valores médios no efluente tratado do HAnR foram de  $205 \pm 46$  mg DQO<sub>t</sub>.L<sup>-1</sup>,  $104 \pm 25$  mg DQO<sub>f</sub>.L<sup>-1</sup> e  $73 \pm 30$  mg SST.L<sup>-1</sup>, enquanto que para o reator UASB os valores médios foram de  $236 \pm 83$  mg DQO<sub>t</sub>.L<sup>-1</sup>,  $112 \pm 26$  mg

$DQO_f.L^{-1}$  e  $95 \pm 63$  mg SST.L<sup>-1</sup> para  $v_s$  de  $0,63 \pm 0,05$  m.h<sup>-1</sup> e TDH de  $8,8 \pm 1,1$  h.

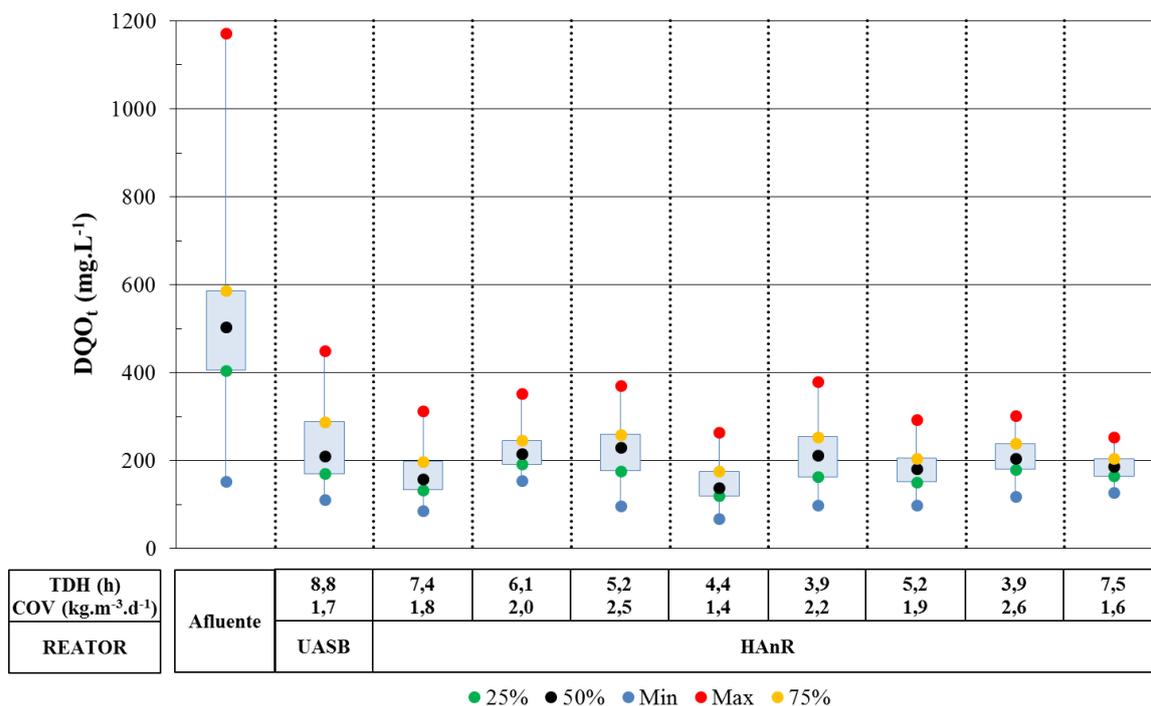


Figura 5: Gráfico *Box-plot* de distribuição dos resultados de  $DQO_t$  afluente e efluente para cada TDH aplicado ao longo da operação do reator anaeróbio.

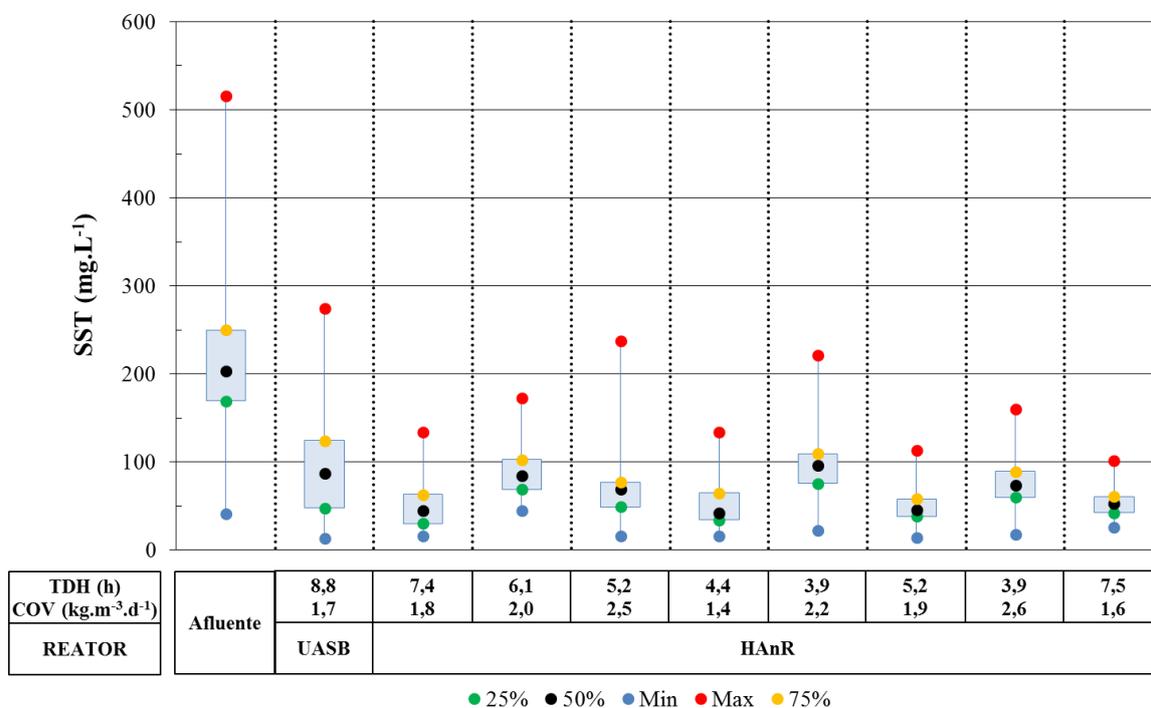
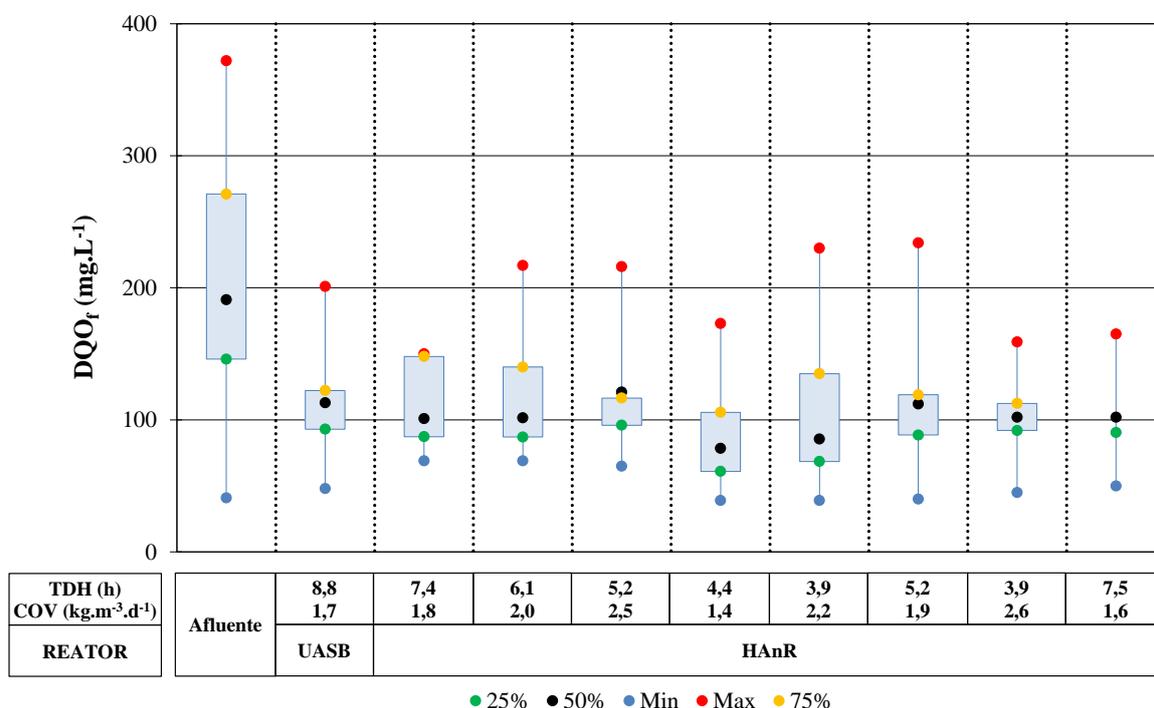


Figura 6: Gráfico *Box-plot* de distribuição dos resultados de SST afluente e efluente para cada TDH aplicado ao longo da operação do reator anaeróbio.

A eficiência na remoção de  $DQO_t$  do HAnR decresceu de  $72 \pm 10\%$  para  $55 \pm 9\%$  com a redução do TDH de 7,4 h para 3,9 h (Figura 3), entretanto, a  $DQO_f$  no efluente tratado não apresentou grande variação entre todas as

etapas de operação, com valor médio de  $105 \pm 35 \text{ mg.L}^{-1}$  (Figura 7). Este fato evidencia a alta eficiência do sistema na remoção da matéria orgânica solúvel, mesmo com baixos TDH aplicados.



**Figura 7 – Gráfico Box-plot de distribuição dos resultados de DQO<sub>f</sub> afluente e efluente para cada TDH aplicado ao longo da operação do reator anaeróbio.**

Comparando-se a capacidade de retenção de sólidos dos reatores, o HAnR submetido a TDH de 3,9 h apresentou eficiência na remoção de SST ( $63 \pm 14\%$ ) e concentração média no efluente tratado ( $73 \pm 30 \text{ mg SST.L}^{-1}$ ) similares às obtidas pelo reator UASB, porém com velocidade ascensional aparente de  $1,25 \text{ m.h}^{-1}$ , sendo 98% maior do que a aplicada no reator UASB ( $0,63 \text{ m.h}^{-1}$ ).

Para todas as condições testadas, o HAnR apresentou desempenho satisfatório quanto a remoção de DQO e SST quando comparado com outros sistemas anaeróbios aplicados ao tratamento de esgotos sanitários citados na literatura (Tabela 1).

**Tabela 1: Comparação de características e desempenho de sistemas anaeróbios tratando esgotos sanitários relatados na literatura.**

Referências	Temp. (°C)	CHV (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup> )	TDH (h)	v <sub>s</sub> (m.h <sup>-1</sup> )	EdQO (%)	EsST (%)
<b>Reator anaeróbio de manta de lodo e escoamento ascendente (UASB)</b>						
Oliva, L.C.H.V. (1997)	> 20	3,0	8,0	0,56	71-83	71-85
Florencio et al. (2001)	30	2,5	9,7	-	67	61
von Sperling et al. (2001)	30	6,0	4,0	-	85	-
Kalogo et al. (2001)	25-35	1,4	2,4	1,25	54	51
Aiyuk et al. (2004)	33	2,4	10	1,00	55-60	-
Leitão, R.C. (2004)	12-20	4,0	6,0	0,64	59	76

Carvalho, K.Q. (2006)	20-25	3,0	8,0	0,26	58	-
de Almeida et al. (2009)	20-25	3,1	7,7	0,59	65	70
<b>Reator anaeróbio de leito fixo</b>						
Elmitwalli et al. (2002) <sup>a</sup>	13	6,0	4,0	0,53	81	-
Araujo Jr et al. (2013) <sup>b,c</sup>	26	6,7	3,0	0,56	65	69
<b>Reator anaeróbio híbrido</b>						
Elmitwalli et al. (2002) <sup>a</sup>	13	3,0	8,0	0,29	64	-
Trabalho Atual (condição 1)	26	2,9	7,4	0,66	72	79
Trabalho Atual (condição 2)	26	5,5	3,9	1,25	55	63

Com os resultados alcançados pode-se afirmar que o reator anaeróbio híbrido (HANR) se mostra promissor para o tratamento de águas residuárias com baixa concentração de matéria orgânica e alta concentração de sólidos em suspensão, como os esgotos sanitários, tendo algumas vantagens sobre os sistemas convencionais de tratamento anaeróbio por reator UASB, tais como, menor área de implantação, melhor qualidade do efluente tratado, pequena geração de lodo e simplicidade operacional.

A melhor condição operacional do HANR quando comparado, em termos de eficiências de remoção e qualidade do efluente tratado, com o reator UASB foi conseguida aplicando-se tempo de detenção hidráulica (TDH) de 5,2 h, com base no volume útil do reator, e velocidade ascensional aparente ( $v_s$ ) de  $0,94 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ , apresentando eficiências na remoção de DQO e SST de  $61\pm 16\%$  e  $72\pm 16\%$ , respectivamente, com concentrações efluentes de  $222\pm 66 \text{ mg DQO}_i\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $123\pm 39 \text{ mg DQO}_f\cdot\text{L}^{-1}$  e  $73\pm 41 \text{ mg SST}\cdot\text{L}^{-1}$ , porém com uma CHV de  $4,1 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ , 52% maior do que a aplicada no reator UASB ( $2,7 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ ).

## CONCLUSÕES

O principal resultado deste trabalho foi a constatação da viabilidade técnica da aplicação do reator anaeróbio híbrido (leito fixo e manta de lodo) como unidade principal de tratamento de esgotos sanitários quando comparado à utilização de reatores UASB. Observou-se que o material suporte para a adesão celular Biobob® é adequado para ser utilizado em reatores anaeróbios híbridos e pode promover o aumento da capacidade de tratamento de reatores UASB sem a necessidade de ampliações físicas do reator.

Para condições de operação similares, o reator HANR apresentou melhor desempenho que o reator UASB, crescendo em até 18% e 32% as eficiências de remoção de DQO<sub>i</sub> e SST, respectivamente.

O reator HANR apresentou-se mais compacto em relação ao reator UASB para se atingir a mesma eficiência de remoção de DQO<sub>i</sub> (61%). A CHV aplicada ao reator HANR ( $4,1 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ ) foi 1,5 vezes maior que a aplicada ao reator UASB ( $2,7 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ ).

Mesmo com velocidade ascensional 98% maior que a aplicada ao reator UASB ( $1,25 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ ), o HANR apresentou eficiência na remoção de SST ( $63\pm 14\%$ ) similar a obtida pelo reator UASB.

## RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, propõem-se as seguintes sugestões para o aprimoramento de reatores anaeróbios híbridos:

- Estudar novos suportes para imobilização celular, bem como o arranjo destes suportes no leito reacional (leito empacotado e ordenado);
- Aumentar a escala do reator anaeróbio híbrido e estudar a distribuição hidrodinâmica do sistema;

- Investigar as diferenças entre as substâncias poliméricas extracelulares produzidas pela biomassa presente no leito de lodo e aderida ao material suporte;
- Investigar o desempenho do reator anaeróbio híbrido tratando esgotos sanitários pré-tratado;
- Investigar o desempenho do reator anaeróbio híbrido tratando outros tipos de água residuária.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AIUK, S.; AMOAKO, J.; RASKIN, L.; VAN HAANDEL, A.; VERSTRAETE, W. (2004). Removal of carbon and nutrients from domestic wastewater using a low investment, integrated treatment concept. *Water Research*, 38(13): 3031-3042.
2. APHA 1998, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., American Public Health Association, Washington, DC, 1998.
3. ARAUJO JUNIOR, M.M.; ZAIAT, M. (2009). An upflow fixed-bed anaerobic-aerobic reactor for removal of organic matter and nitrogen from L-lysine plant wastewater. *Can. J. Civil Eng.* 36: 1085-1094.
4. CARVALHO, K.Q. (2006). Resposta dinâmica de reator UASB em escala piloto submetido a cargas orgânicas e hidráulicas cíclicas: modelos matemáticos e resultados experimentais. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
5. DE ALMEIDA, P.G.S.; CHERNICHARO, C.A.L.; SOUZA, C. L. (2009) Development of compact UASB/trickling filter systems for treating domestic wastewater in small communities in Brazil. *Water Science and Technology*, 59(7), 1431-1439.
6. ELMITWALLI, T.A.; OAHN, K.L.T.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. (2002). Treatment of domestic sewage in a two-step anaerobic filter/ anaerobic hybrid system at low temperature. *Water Research*, 36: 2225-2232.
7. FLORENCIO, L.; KATO, M.T.; DE MORAIS, J.C. (2001) Domestic sewage treatment in full-scale UASBB plant at Mangueira, Recife, Pernambuco. *Water Science and Technology*, 44(4), 71-77.
8. FLORENCIO, L.; KATO, M.T.; DE MORAIS, J.C. (2001). Domestic sewage treatment in full-scale UASBB plant at Mangueira, Recife, Pernambuco. *Water Science and Technology*, 44(4): 71-77.
9. FORESTI, E.; ZAIAT, M.; VALLERO, M. (2006) Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5, 3-19.
10. GUO, W., NGO, H.H., DHARMAWAN, F., PALMER, C.G. (2010). Roles of polyurethane foam in aerobic moving and fixed bed bioreactors. *Bioresource and Technology*, 101(5): 1435-1439.
11. HUYSMAN, P.; VAN MEENEN, P.; VAN ASSCHE, P.; VERSTRAETE, W. (1983). Factors affecting colonization of nonporous packing materials in model upflow methane reactors. *Biotechnology Letters*, 5: 643-648.
12. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2010). Pesquisa nacional de saneamento básico 2008. Rio de Janeiro, Brasil.
13. KALOGO, Y. & VERSTRAETE, W. (2001). Potentials of anaerobic treatment of domestic sewage under temperate climate conditions. In: Lens, P.; Zeeman, G.; Lettinga, G. (Eds). *Decentralised sanitation and reuse: Concepts, systems and implementation*. IWA Publishing, London, UK: 181-204.
14. KATO, M. T., NETO, C. O. A., CHERNICHARO C.A.L; FORESTI, E., CYBIS, L. F. (1999). Configurações de reatores anaeróbios. In: Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo (CAMPOS, J.R., coordenador). Finep/CNPq/Caixa/PROSAB, ed. Rima, São Carlos, SP, Brasil, cap. 3: 155-198.
15. LEITÃO, R.C. (2004). Robustness of UASB reactors treating sewage under tropical conditions. Ph.D. Thesis. Wageningen University.
16. LETTINGA, G. & HULSHOFF POL, L.W. (1991). UASB Process design for various types of wastewaters. *Water Science and Technology*, 24: 87-107.

17. LETTINGA, G.; HULSHOFF POL, L.W. (1991) UASB Process design for various types of wastewaters. *Water Science and Technology*, 24, 87-107.
18. LIM, J.W.; SENG, C.E.; LIM, P.E.; NG, S.L.; SUJARI, A.N.A. (2011). Nitrogen removal in moving bed sequencing batch reactor using polyurethane foam cubes of various sizes as carrier materials. *Bioresource and Technology*, 102: 9876–9883.
19. OLIVA, L.C.H.V. (1997). Tratamento de esgotos sanitários com reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) protótipo: desempenho e respostas dinâmicas às sobrecargas hidráulicas. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
20. VAN HAANDEL, A.C. & LETTINGA, G. (1994). Anaerobic sewage treatment. In: A practical guide for regions with a hot climate. *John Willey & Sons Ltd.*, Chichester, UK.
21. VON SPERLING, M. & CHERNICHARO, C.A.L. (2001). Performance evaluation of a UASB-activated sludge system treating municipal wastewater. *Water Science and Technology*, 43(11): 323-328.
22. ZAIAT, M.; CABRAL, A. K. A.; FORESTI, E. (1994). Reator anaeróbio de leito fixo para tratamento de águas residuárias: concepção e avaliação preliminar de desempenho. *Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Engenharia Química*, 11: 33-42.