

II-480 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE REATOR ANAERÓBIO-AERÓBIO DE LEITO FIXO (RAALF) TRATANDO EFLUENTE BOVINO

Daiane Cristina de Freitas⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação de Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná câmpus Curitiba (PPGCTA/UTFPR).

Cristiane Kreutz⁽²⁾

Tecnóloga Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre e Doutora em Engenharia pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Docente do Departamento Acadêmico de Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Campo Mourão (DAAMB/UTFPR).

Karina Querne de Carvalho⁽³⁾

Engenheira Civil pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Mestre e Doutora em Engenharia pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba (DACOC/UTFPR).

Eudes José Arantes⁽⁴⁾

Engenheiro Civil pela Universidade de São Paulo (USP). Mestre e Doutor em Engenharia pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente do Departamento Acadêmico de Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Campo Mourão (DAAMB/UTFPR).

Fernando Hermes Passig⁽⁵⁾

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre e Doutor em Engenharia pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente do Departamento Acadêmico de Química e Biologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba (DAQBI/UTFPR).

Endereço⁽¹⁾: Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000, Ecoville – Curitiba – PR – CEP: 81280-340 – Brasil – Tel:(41) 3279-4500 – email: daianecris.freitas@gmail.com

RESUMO

Neste estudo foi avaliado o comportamento hidrodinâmico de um reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo (RAALF), em escala de bancada (4,75 L), utilizando efluente agroindustrial bruto de matadouro bovino. Espuma de poliuretano e argila expandida foram utilizados como meio suporte à fixação da biomassa. O reator foi mantido a temperatura ambiente. Foram realizados ensaios hidrodinâmicos através de testes estímulo-resposta tipo pulso com o traçador eosina Y para avaliar o comportamento hidrodinâmico e verificar anomalias. Durante o período de operação foram determinados temperatura, oxigênio dissolvido, pH, alcalinidade à bicarbonato, ácidos voláteis, DQO (bruta e filtrada), sólidos totais e suspensos para verificar o alcance do estado de equilíbrio dinâmico aparente. Os resultados dos ensaios hidrodinâmicos possibilitaram observar o fenômeno de cauda longa devido à difusão do traçador e sua lenta liberação no efluente. No cálculo de zonas mortas foram obtidos valores negativos devido à existência de caminhos preferenciais. Foi observada presença de curtos-circuitos hidráulicos, comprovado pela diferença entre o TDH real do teórico. Foi verificada boa eficiência hidráulica ($\lambda \geq 0,75$) em alguns ensaios. O modelo N-CSTR apresentou melhor ajuste para os TDHs avaliados. O regime de fluxo predominante no RAALF é o de mistura completa, pois foi encontrada elevada dispersão longitudinal no parâmetro D/uL nos modelos de dispersão.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência, Fenômeno de cauda, Traçador.

INTRODUÇÃO

O desafio da sociedade atual, com relação ao saneamento básico, é projetar sistemas de tratamento de efluentes que sejam funcionalmente simples, visando além da eficiência, boa relação custo/benefício, para atender ao maior número de comunidades (CASTRO, 2010).

A escolha do sistema de tratamento é função das características que o efluente apresenta, assim pode-se destacar o tratamento anaeróbio, aeróbio e combinado, cada um trazendo vantagens particulares.

De acordo com Moraes e Durval (2004), a prática do tratamento anaeróbio possui potencial de aplicabilidade do processo que pode ser avaliado a partir do conhecimento de poucas características do despejo a ser tratado. A avaliação preliminar dessas características possibilitará auxílio na escolha do processo de tratamento mais adequado.

No entanto o sistema anaeróbio possui também alguns aspectos negativos como os citados por Weber (2006), como o longo período de partida sem inóculo, sensibilidade das bactérias à variações e odores desagradáveis.

Dessa forma muitos estudos trazem como discussão a utilização de sistemas combinados que demonstram os benefícios dos processos de tratamento. Para Pontes (2009), os sistemas anaeróbio-aeróbio têm obtido sucesso, reduzindo matéria orgânica e nutrientes no efluente e apresentam vantagens quando comparados aos sistemas anaeróbios, tais como menor produção de lodo biológico e menor custo de implantação e de operação.

Pantoja (2011) obteve 86,6% de eficiência de remoção da matéria orgânica e estabilização da nitrificação em um sistema combinado (como pós tratamento do efluente de saída do UASB) tratando efluente sanitário e considerou uma alternativa viável, com vantagens econômicas e facilidade operacional.

Pontes (2009) detectou 92% de eficiência para remoção de DQO em um reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo, tratando efluente proveniente de abatedouro de aves.

Os estudos de Siegfried e Cleto (1996) apontam que os mecanismos hidrodinâmicos são fundamentais na avaliação do desempenho dos reatores biológicos, assim o conhecimento desses mecanismos é de grande importância, pois possibilita principalmente a otimização da sua geometria, permite detectar problemas operacionais e de projeto, sendo que os mais comuns são as deficiências na distribuição do afluente, que podem formar caminhos preferenciais, regiões de volumes mortos e curtos-circuitos hidráulicos.

Para Carvalho et al. (2008), a hidrodinâmica dos reatores anaeróbios tem papel importante, influenciando na velocidade das reações biológicas, através de alterações na taxa de transferência de massa e na distribuição das reações ao longo do reator.

Dentro deste contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento hidrodinâmico do reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo (RAALF), operado em escala de bancada, utilizando efluente agroindustrial sem tratamento prévio, proveniente de matadouro bovino, situado no município de Campo Mourão, estado do Paraná. Para conhecer o comportamento hidrodinâmico, foram realizados testes de estímulo-resposta, utilizando eosina Y como traçador, para o reator operado com tempo de detenção hidráulico de 24 h.

MATERIAIS E MÉTODOS

O reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo (RAALF) é constituído de um tubo de *plexiglass* de diâmetro interno de 90 mm e comprimento de 1000 mm. O volume útil total do reator é de aproximadamente 4,75 L, com escoamento ascendente e fluxo contínuo. O reator é dividido em seis compartimentos, o primeiro para a entrada do efluente, o segundo com argila expandida, o terceiro com espuma de poliuretano, o quarto com a zona de aeração, o quinto com espuma de poliuretano e o sexto para a saída do efluente.

A alimentação do RAALF foi realizada por bomba dosadora Provitec® modelo DM 5000 e a aeração por um compressor de ar marca Boyu® modelo S2000A, que injetava ar na câmara de aeração, através de pedra porosa responsável pela sua difusão na parte aeróbia do reator.

O substrato utilizado na alimentação do RAALF foi efluente agroindustrial bruto, proveniente de matadouro bovino, coletado na entrada do tanque de sedimentação do sistema de tratamento da unidade industrial. Para imobilização da biomassa do RAALF foi utilizado como meio suporte a espuma de poliuretano e argila expandida. O tempo de detenção hidráulico testado (TDH) foi de 24 h.

Para a caracterização físico-química do efluente foram realizados monitoramentos semanais durante 3 meses (12 amostras), por meio de determinações dos parâmetros pH, oxigênio dissolvido, DQO bruta e filtrada, ST e SST, conforme Eaton et al. (2005), alcalinidade à bicarbonato seguindo Ripley *et al.* (1986), ácidos voláteis de

acordo com Dillalo e Albertson (1961) e temperatura do líquido (°C). Esses parâmetros também foram utilizados para avaliar o estado de equilíbrio dinâmico aparente (EEDA).

Após atingir o EEDA foram realizados 3 ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta tipo pulso no reator, utilizando eosina Y como traçador. O tempo total de duração dos ensaios foi de três vezes o TDH teórico ao qual o reator foi submetido, com coleta de amostras do efluente em intervalos de 45 min.

Assim foram geradas curvas experimentais da variação de concentração do traçador ao longo do tempo (C(t)), que foram normalizadas de acordo com Levenspiel (2000), resultando em curvas de distribuição do tempo de residência hidráulica (E_0) em função do tempo adimensional (θ). O ajuste das curvas experimentais foi realizado com base nos modelos teóricos uniparamétricos de dispersão de pequena intensidade (PD), de grande intensidade (GD) e de tanques em série (N-CSTR) de acordo com Levenspiel (2000).

Ainda foi verificada a presença de anomalias com determinação do volume de zonas mortas de acordo com metodologia reportada por Peña et al. (2006), curtos-circuitos de acordo com metodologia adaptada de Sarathai et al. (2010) e eficiência hidráulica de acordo com Persson et al. (1999) e Sarathai et al. (2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização físico-química do afluente e efluente

Os resultados das análises físico-químicas para as amostras do afluente e do efluente obtidos durante o período de operação do RAALF, referente ao TDH de 24 h estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado das análises físico-químicas para o TDH de 24 h.

PARÂMETRO	N	AFLUENTE			EFLUENTE		
		MÉD	MÍN	MÁX	MÉD	MÍN	MÁX
TL (°C)	12	17±1,2*	16	18	18±0,5	18	18
OD (mg.L ⁻¹)	12	0,2±0,2	0	0,3	3,2±1	2,4	4,3
pH	12	-	7,3	7,6	-	8,4	8,6
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	12	1526±312	1171	1759	649±65	609	724
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	12	794±21	781	819	226±26	196	244
AB (CaCO ₃ .L ⁻¹)	12	589±89	515	688	835±14	822	849
AV (mgHAc.L ⁻¹)	12	211±42	167	252	92±5	87	96
ST (mg.L ⁻¹)	12	2742±922	1866	4226	1244±373	824	1534
SST (mg.L ⁻¹)	12	1630±907	2670	1000	127±37	103	170

Legenda: N = número de amostras; Máx = valor máximo; Mín = valor mínimo; Méd = média; *DP= Desvio padrão.

De acordo com os dados da Tabela 1 é possível notar que os valores máximos de pH para o afluente e efluente foram de 7,6 e 8,6, respectivamente, para o TDH testado. Esse aumento é um indicativo da capacidade de tamponamento do RAALF.

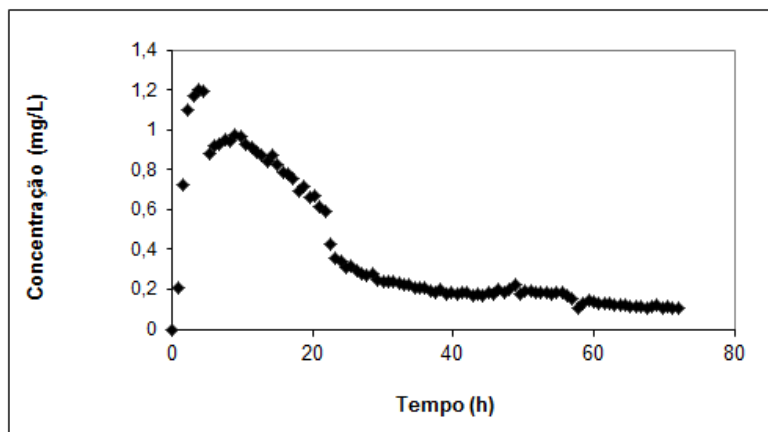
As concentrações médias de oxigênio dissolvido para o efluente resultaram superiores ao indicado por Nogueira (1998) e Gerardi (2006), possibilitando a oxidação da amônia e consequentemente o processo de nitrificação.

Em relação à DQO bruta e filtrada, pode-se observar pelos resultados que houve redução do afluente para o efluente. Tal fenômeno pode ser explicado pelo fato de que grande parte da matéria orgânica foi retida no material suporte e também degradada pelos microrganismos, sendo obtida remoção de 57,47% (1526 mg.L⁻¹) para DQO bruta e 71,54 % (794 mg.L⁻¹) para DQO filtrada.

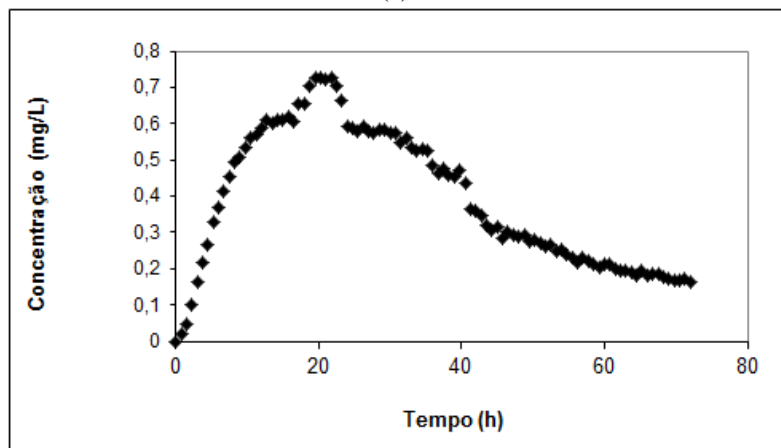
Para Souza (1984), os valores de ácidos voláteis e de alcalinidade são indicativos de estabilidade, o que pode ser observado durante a operação do RAALF.

Ensaio Hidrodinâmicos

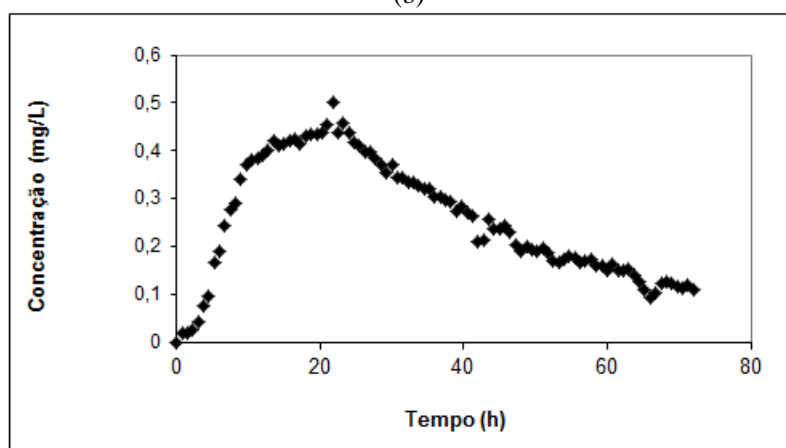
A partir dos resultados experimentais dos ensaios de estímulo-resposta foi possível traçar as curvas de variação da concentração de eosina Y nas amostras do efluente do reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo ao longo do tempo, para TDH de 24 h (Figura 1).



(a)



(b)



(c)

Figura 1 - Curvas de variação da concentração de eosina Y: (a) ensaio 1, (b) ensaio 2, (c) ensaio 3, ao longo do tempo nas amostras do efluente nos ensaios de estímulo-resposta, para TDH de 24 h.

A partir dos ensaios hidrodinâmicos realizados tornou-se possível notar o lento decaimento na concentração do traçador ao longo do tempo que pode indicar o fenômeno de cauda longa. Este fenômeno também foi observado nos estudos de Lima (2001) que avaliou a hidrodinâmica de um RAHF operado com água e esgoto, utilizando eosina Y como traçador.

Foi realizado o ajuste das curvas de distribuição do tempo de residência pelos modelos matemáticos teóricos, de acordo com Levenspiel (2000) para TDH de 24 h (Tabela 2).

Tabela 2 - Parâmetros gerais do DTR obtidos experimentalmente durante a operação do RAALF no TDH de 24 h.

TRAÇADOR	ENSAIO	TDH REAL (h)	N-CSTR	D _μ /L		COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (R ²)		
				(PD)	(GD)	N-CSTR	PD	GD
Eosina Y	1	21,5	2	0,349	1,674	0,947	0,561	0,108
	2	30,4	2	0,159	0,520	0,976	0,796	0,528
	3	31,5	3	0,151	0,485	0,962	0,758	0,471

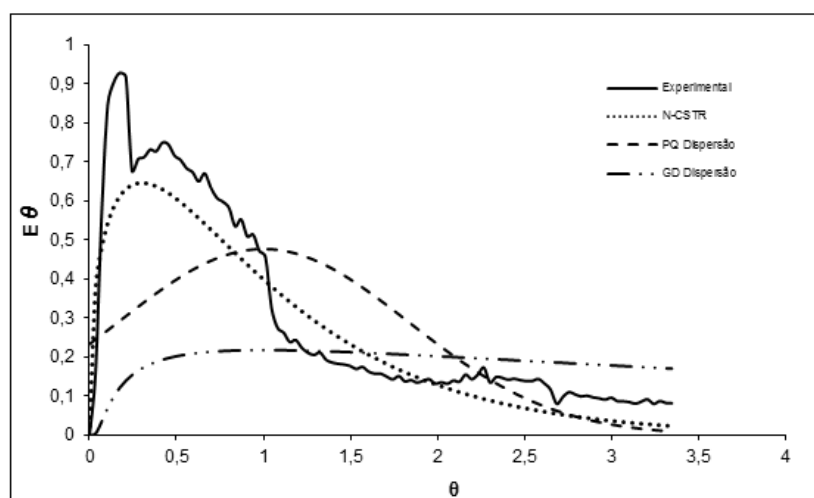
Os valores de TDH real quando inferiores ao TDH teórico indicam adiantamento na resposta dos traçadores, como pode ser observado no primeiro ensaio realizado. Este fenômeno pode ser atribuído a caminhos preferenciais, que possibilitam a rápida saída do traçador do efluente.

Já os ensaios que apresentam TDH real superior ao TDH teórico são caracterizados como atraso, o que pode ser observado no segundo e terceiro ensaios realizados. Este fenômeno pode ocorrer, provavelmente, devido à adsorção do traçador no meio suporte ou à existência de zonas mortas.

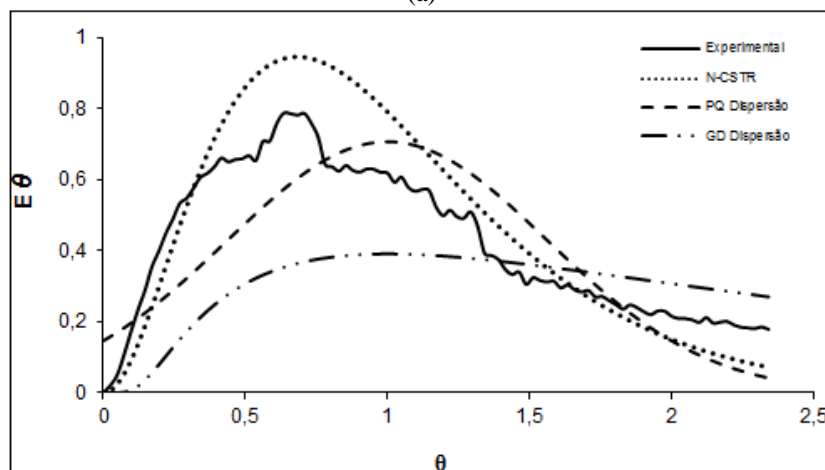
Na Tabela 2, pode-se observar que o modelo teórico de N-CSTR em série demonstra resultados iguais a 2-3 reatores para os ensaios realizados com eosina Y. De Nardi et al. (1997) obtiveram 3 reatores para eosina Y.

Os valores do número de dispersão (D/uL) verificados nos modelos de dispersão de pequena e grande dispersão foram elevados, indicando grande dispersão longitudinal do fluido e grau de mistura elevado no interior do RAALF. E ainda nota-se que o modelo de grande dispersão (GD) apresentou melhor ajuste aos dados experimentais.

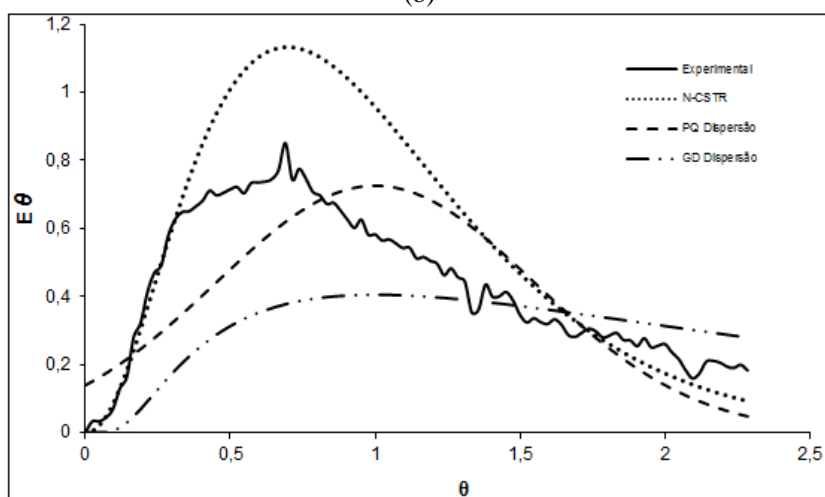
Através do ajuste dos dados experimentais dos ensaios realizados no RAALF, foram obtidas curvas de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) para TDH de 24 h (Figura 2).



(a)



(b)



(c)

Figura 2 - Curvas de DTR obtidas experimentalmente com eosina Y: (a) ensaio 1, (b) ensaio 2, (c) ensaio 3 ao longo do tempo nas amostras de efluente do reator para os ensaios de estímulo-resposta, no TDH de 24 h.

Observando os coeficientes de correlação (Tabela 2) e analisando as curvas de DTR (Figura 2), pode-se verificar que o modelo que apresentou melhor ajuste foi o N-CSTR.

Na Figura 2, pode ser observado o adiantamento dos picos de concentração da eosina Y no TDH de 24 h provavelmente devido a presença de caminhos preferenciais.

Com a análise dos dados pode-se notar que o regime de fluxo predominante no RAALF é o de mistura completa, pois foi encontrada uma elevada dispersão longitudinal no parâmetro D/uL nos modelos de dispersão e o melhor ajuste dos dados experimentais pelo modelo de tanques de mistura completa em série.

Anomalias do comportamento hidrodinâmico

Os resultados referentes aos cálculos de zonas mortas, presença de curtos-circuitos hidráulicos e eficiência hidráulica a partir dos resultados dos ensaios hidrodinâmicos realizados no RAALF são apresentados na Tabela 3.

Na Tabela 3 é possível observar valores negativos no cálculo do volume de zonas mortas, que podem ser atribuídos ao valor do TDH real ter sido superior ao TDH teórico e que podem representar a existência de caminhos preferenciais. O mesmo comportamento foi reportado por Calheiros et al. (2009) e Peña et al. (2006).

Tabela 3 - Resultados obtidos no cálculo das anomalias no comportamento hidrodinâmico.

Traçador	Ensaio	TDH Real (h)	Pico (h)	Volume de Zonas mortas \bar{V} (m ³)	Eficiência hidráulica λ (%)	Curtos-circuitos – Ψ
Eosina Y	1	21,5	3,8	0,7	0,2	0,2
	2	30,4	19,5	-1,8	1,4	0,6
	3	31,5	21,8	2,1	2,1	0,7

A presença de curtos-circuitos hidráulicos foi verificada para o ensaio 1 (0,2), pois ocorre quando $\Psi \leq 0,3$. Nos ensaios 2 e 3 foi obtida boa eficiência hidráulica ($\lambda \geq 0,75$).

CONCLUSÕES

O melhor ajuste aos dados experimentais foi verificado pelo modelo de grande dispersão para representar o comportamento hidrodinâmico do reator. O regime de fluxo predominante no RAALF é o de mistura completa.

O traçador eosina Y representou adequadamente o desempenho do reator, o que justifica seu emprego no estudo do comportamento hidrodinâmico, pois se trata de um traçador amplamente utilizado.

A combinação dos processos anaeróbio-aeróbio traz vantagens ao sistema e consequente pode minimizar problemas operacionais encontrados em uma unidade simples. Com essa configuração foi possível obter remoção de DQO, nitrogênio e fósforo, sendo estes últimos dificilmente removidos apenas com processos biológicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Araucária, Secretaria de Ciência e Tecnologia (SETI) e Governo do Estado do Paraná pelo auxílio financeiro para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CARVALHO, Karina Q. de; SALGADO, Monique T.; PASSIG, Fernando H.; PIRES, Eduardo C. Avaliação hidrodinâmica de reator UASB submetido à variação cíclica de vazão. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n° 2, p. 226-235. Abr./Jun. 2008.
2. CASTRO, Fabio M. S. **Estudo do comportamento hidrodinâmico de uma nova proposta de configuração interna para reator UASB**. 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
3. DE NARDI, Ivana R; ZAIAT, Marcelo; FORESTI, Eugênio. Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors. **Bioprocess Engineering**, v. 21, n.5, p. 469-476, nov. 1997.
4. DILLALO, Rosemarie; ALBETSON, Orris E. (1961). **Volatile acids by direct titration**. Journal of Water Pollution Control Federation, New York, v. 33, n. 4, p. 356-365.
5. EATON, Andrew D.; CLESCERI, Lenore S.; RICE, Eugeni W.; GREENBERG, A. E. (Ed.). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21th ed. Washington: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Pollution Control Federation. 2005.
6. GERARDI, M. H. **Wastewater Bacteria**. Wastewater Microbiology Ser. Wiley & sons, Incorporated, John. 272 p. 2006.
7. LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**. 3 ed. São Paul: Edgard Blücher Ltda, 2000.
8. LIMA, C. A. A. **Tratamento de esgoto sanitário em reator horizontal de leito fixo (RAHLF) - Escala Piloto**. 2001. 165 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
9. MORAES, Luciana. M.; PAULA, Durval, R. J. **Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de resíduos da bovinocultura e da suinocultura**. 2004.
10. NOGUEIRA, R. M. O. B.; LAZAROVA, V.; MANEM, J.; MELO, L. F. **Influence of dissolved oxygen on the nitrification kinetics in a circulating bed biofilm reactor**. Bioprocess Eng. 19:441-9. 1998.
11. PANTOJA, Jorge L. R. **Remoção de material orgânica carbonácea e nitrogênio em reator aeróbio-anóxico de leito fixo (RAALF) aplicado ao pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio**. 2011. 173 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
12. PEÑA, M. R.; MARA, D. D.; AVELLA, G.P. (2006). Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. **Water Research**, v.50, n.3, p. 445-452.
13. PERSSON J., SOMES N. L. G., WONG T. H. F.(1999). Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. **Water Science and Technology**, 40: 291–300.
14. PONTES, Ana F. V. **Avaliação de desempenho de reator anaeróbio-aeróbio com recirculação da fase líquida no tratamento de água residuária proveniente de abatedouro de aves**. 2009. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
15. RIPLEY, Leonard E.; BOYLE, Willian C.; CONVERSE, James C. **Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes**. Journal Water Pollution Control Federation, New York, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.
16. SARATHAI, Y.; KOOTTATEP, T.; MOREL, A. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onside wastewater treatment system. **Journal of Environmental Sciences**, v 22, p. 1319-1326, 2010.
17. SIEGFRIED, Werner. H.; CLETO, Eduardo. P. **Modelagem hidrodinâmica de reatores anaeróbios de escoamento ascendente e manta de lodo (UASB)**. 1996.
18. SOUZA, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**. São Paulo, v. 44, n. 137, p 88-94. 1984.
19. WEBER, Marisa I. **Avaliação de um reator anaeróbio de leito fluidizado para o tratamento de resíduos líquidos da indústria de refrigerantes**. 2006. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.