



II-224 – RESPOSTA DINÂMICA DE REATOR UASB SUBMETIDO A CARGAS ORGÂNICAS E HIDRÁULICAS CÍCLICAS

Karina Querne de Carvalho⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Estadual de Maringá. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente da Coordenação de Ambiental do *campus* Campo Mourão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Coordenadora do III Curso de Especialização em Gerenciamento e Auditoria Ambiental do *campus* Campo Mourão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Monique Toledo Salgado⁽²⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto. Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Engenheira da Prefeitura Municipal de Vitória (PMV) na área de saneamento integrado para áreas de assentamento precário na região de Vitória - ES.

Fernando Hermes Passig⁽³⁾

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente da Coordenação de Ambiental do *campus* Campo Mourão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Gerente de Pesquisa e Pós-graduação do *campus* Campo Mourão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Eduardo Cleto Pires⁽⁴⁾

Engenheiro Mecânico pela Universidade de São Paulo. Mestre em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Doutor em Engenharia Civil em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Professor titular da Universidade de São Paulo (EESC/USP).

Endereço⁽¹⁾: BR 369 - km 0,5, Vila Carolo – Campo Mourão - Paraná - CEP: 87301-006 - Brasil - Tel: + 55 (44) 3523-4156 (ramal 229) – Fax: + 55 (44) 3523-4156 – e-mail: kaquerne@gmail.com.

RESUMO

O comportamento de um reator UASB em escala piloto (160 L) foi avaliado quando submetido a variações cíclicas senoidais de 40% e de 60% da vazão média afluente constante e igual a 16 L.h^{-1} e tempo de detenção hidráulica de 10 h. O reator UASB apresentou estabilidade na capacidade de tamponamento do meio mesmo quando foram observados picos nas concentrações de ácidos voláteis, queda na eficiência de remoção de matéria orgânica que variou de 10% a 59% com aplicação das variações cíclicas senoidais. Por outro lado, o reator apresentou capacidade de recuperação das condições iniciais nos períodos em que foram aplicadas as variações: da vazão média afluente para vazão mínima afluente e da vazão mínima afluente para vazão média afluente. A variabilidade da qualidade do efluente foi observada nos períodos de variações: da vazão máxima para vazão média com queda na eficiência de remoção de DQO bruta (variou de 32% a 48%) devido ao maior arraste de sólidos suspensos totais (SST) e de sólidos suspensos voláteis (SSV). O arraste de SST e SSV no efluente foi observado em todas as etapas de operação do reator provavelmente devido a formação de “bolsões” resultante do acúmulo de biogás no manto de lodo.

PALAVRAS-CHAVE: Carga Hidráulica, Comportamento Dinâmico, UASB, Variação Cíclica da Vazão.

INTRODUÇÃO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2002), o Brasil possui mais de 300 reatores anaeróbios operados em escala real tratando esgoto sanitário, principalmente no estado do Paraná. Em alguns casos, o tratamento anaeróbio de esgotos domésticos corresponde ao pré-tratamento biológico, seguido de algum polimento posterior para que os padrões de lançamento estabelecidos pela legislação ambiental vigente sejam alcançados.

Apesar desse número de reatores em operação, a literatura é escassa de informações referentes ao comportamento de reatores UASB submetido a variações cíclicas diárias de cargas orgânicas e hidráulicas em



períodos curtos de duração iguais ou menores que 24 h, comuns em esgoto de origem doméstica e freqüentemente encontradas em pequenas instalações de tratamento. Essas variações podem causar queda na eficiência do reator e conseqüentemente lançamento de efluentes com concentrações de poluentes superiores aos limites estabelecidos pela legislação ambiental brasileira vigente (Pires *et al.*, 2001). Com a aplicação das variações, a eficiência de remoção do reator pode ser afetada pela flotação dos grânulos, problemas com geração de odor e elevada concentração de sólidos suspensos no efluente.

Alguns estudos realizados com reator UASB mostraram sua capacidade em amortecer cargas hidráulicas e orgânicas às quais foi submetido após certo período de tempo (Paula Jr e Foresti, 1992; Oliva, 1997; Batista, 2000; Aisse *et al.*, 2000; Florêncio *et al.*, 2001; Franco *et al.*, 2002a; Franco *et al.*, 2002b; Leitão, 2004). Por outro lado, outros estudos indicaram que o comportamento hidrodinâmico do reator permaneceu desconhecido (Batista, 2000). Portanto é conveniente avaliar eventuais flutuações de comportamento resultantes de variações de cargas hidráulica e orgânica no projeto de reatores UASB.

Para melhor compreender os eventuais amortecimentos e atrasos nas respostas desses reatores quando submetidos a essas variações, Carvalho e Pires (2002) desenvolveram um modelo matemático simplificado (MMS) baseado no modelo hidrodinâmico de mistura completa em reatores em série, modelo cinético de primeira ordem para consumo de substrato e para crescimento da biomassa e equacionamentos empíricos reportados por Paula Jr. e Foresti (1992) e Batista (2000). Esse modelo indicou a capacidade do reator de amortecer as variações impostas e a influência da cinética na eficiência de remoção de matéria orgânica.

Devido à necessidade de validar o modelo matemático simplificado (MMS), foi avaliado o desempenho de um reator UASB em escala piloto, com capacidade de 160 L, no tratamento de esgoto sanitário municipal da cidade de São Carlos.

Durante o período de operação, o reator UASB foi submetido a variações cíclicas diárias de cargas orgânica e hidráulica em valores inferiores e superiores a 40% e 60% em período de 24 h. Os resultados experimentais obtidos com a operação desse reator foram aplicados como dados de entrada para validação do modelo MMS.

Esse artigo teve como objetivo principal apresentar comparação dos resultados obtidos no monitoramento do comportamento do reator UASB nas diferentes condições operacionais a que foi submetido. Com isso objetivou-se analisar a influência das variações cíclicas diárias de cargas orgânicas e hidráulicas, em relação à estabilidade do pH e alcalinidade, capacidade de amortecimento às variações cíclicas impostas, variabilidade da qualidade do efluente e capacidade de recuperação das condições iniciais.

Posteriormente, os resultados experimentais obtidos foram comparados com resultados trabalhos reportados por outros autores na avaliação de reatores.

MATERIAIS E MÉTODOS

REATOR

A influência das variações cíclicas senoidais de cargas orgânicas e hidráulicas da vazão afluente foi avaliada em um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) em escala piloto confeccionado em PVC com 1,86 m de altura, 0,30 m de diâmetro e volume total de 160 L durante 370 dias (Figura 1). O reator foi mantido em temperatura ambiente.

Um separador trifásico (gás-sólido-líquido) confeccionado em PVC com 0,60 m de altura e 0,30 m de diâmetro foi acoplado à distância de 1,86 m da base do reator.

O sistema de coleta de gás era composto por mangueira de silicone que ligava a saída de gás do reator a um selo hídrico e a um medidor de vazão do biogás produzido.

O selo hídrico confeccionado em PVC com 0,05 m de diâmetro e 0,80 m de altura foi projetado para manter a pressão de gás a 0,26 mca nas calhas de coleta do efluente do reator e manter uma superfície de separação das fases gás/líquido e gás/sólido dentro do sistema de coleta de gás. Uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 5 molar, foi colocada no interior do sistema de coleta de gás para medição apenas da



vazão do gás metano. O medidor de biogás com contador de giro da marca *The Midget* utilizado no experimento indicava a vazão diária de biogás produzida.

O aparato experimental foi instalado no Laboratório de Tratamento de Resíduos (LTR) do *campus* I da Universidade de São Paulo em São Carlos (EESC/USP) e mantido à temperatura ambiente.

SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O esgoto sanitário usado na alimentação do reator foi armazenado em dois tanques de equalização dispostos em série, com capacidades de 350 L e 240 L, respectivamente. Esses tanques possibilitaram o armazenamento do esgoto bruto proveniente do sistema de recalque em períodos de 24 h, a suplementação com esgoto sintético e a diminuição da variação da qualidade do substrato para controle das condições de entrada do reator.

Partindo do segundo tanque de armazenamento (240L), o substrato foi introduzido no reator por meio de bomba dosadora eletromagnética (série BLA/5), automatizada, da marca *Blowair*, dotada de amortecedor de pulso na linha de alimentação para diminuir eventuais distúrbios causados pela pulsação da bomba.

A vazão de alimentação foi controlada por programa computacional desenvolvido anteriormente por Batista (2000), que alterava percentualmente a vazão média afluyente da bomba dosadora em intervalos de 15 min, em período total de 24 h.

O sistema de alimentação foi instalado no anexo 1 do Laboratório de Processos Biológicos (LPB) do *campus* I da Universidade de São Paulo (área I) em São Carlos (EESC/USP).

SUBSTRATO

O reator foi alimentado continuamente com esgoto sanitário coletado na estação elevatória do Laboratório de Tratamento de Resíduos (LTR) da Escola de Engenharia de São Paulo/Universidade de São Paulo suplementado com esgoto sintético simulando esgoto real.

O esgoto sanitário caracterizava-se pela baixa concentração de matéria orgânica afluyente, variável na faixa de 140 mgDQO.L⁻¹ a 400 mgDQO.L⁻¹, o que justificou a necessidade de suplementação com esgoto sintético.

Assim, a suplementação do esgoto sanitário bruto com esgoto sintético, simulando esgoto real, foi realizada para elevar a DQO afluyente para a faixa de 573 mg.L⁻¹ a 687 mg.L⁻¹ em todas as etapas de operação. A composição do esgoto sintético utilizado na suplementação baseou-se na composição reportada por Torres (1992), para valor médio de DQO de aproximadamente 300 mg.L⁻¹. O controle da DQO afluyente em faixa conhecida era de suma importância para que a avaliação do comportamento do reator UASB não fosse prejudicada.

O controle da concentração de matéria orgânica afluyente, em termos de DQO, em faixa conhecida era de suma importância para que a avaliação do comportamento do reator UASB não fosse prejudicada.

INÓCULO

O reator foi inoculado com aproximadamente 55 L de lodo anaeróbio granular proveniente de reator anaeróbio que trata água residuária de abatedouro de aves. A escolha do lodo foi justificada por sua utilização em diversas pesquisas no Laboratório de Processos Biológicos do *campus* I da Universidade de São Paulo em São Carlos (EESC/USP), devido principalmente à grande diversidade microbiana verificada por Hirasawa (2003).

Foram realizados exames microbiológicos do lodo com microscopia ótica comum, de fluorescência e de contraste de fase com microscópio Leica DM LB (ob 100x), sistema de câmera digital Leica DC 200 e programa computacional *Image Pro-Plus* na versão 4.5.0 que identificaram predomínio de bacilos delgados e curvos; bacilos ovalados, bacilos com extremidades arredondadas, filamentos e cocos. Dentre as arquéias metanogênicas, predominaram bacilos fluorescentes e filamentos semelhantes a *Metanosaeta* sp., bacilos



curvos fluorescentes e cistos de sarcinas e arqueias metanogênicas semelhantes a *Metanosarcina* sp. Determinações das concentrações de sólidos totais, sólidos totais voláteis e de sólidos totais fixos do lodo de inóculo resultaram em aproximadamente 36 g.L⁻¹, 30 g.L⁻¹ e 6 g.L⁻¹, respectivamente.

ETAPAS DE OPERAÇÃO

A operação e o monitoramento do reator UASB foram divididos em três etapas para facilitar a apresentação e compreensão dos resultados.

Todas as análises foram feitas no Laboratório de Processos Biológicos (LPB) do *campus* I na Universidade de São Paulo em São Carlos (EESC/USP).

A Tabela 1 apresenta um resumo das etapas de operação do reator UASB, condições operacionais de vazão afluente, variações cíclicas senoidais de amplitude de 40% e de 60% da vazão afluente, picos de mínimo e de máximo alcançados pela bomba dosadora, tempo de detenção hidráulica, velocidade ascensional e dias dos perfis temporais de amostragem.

Tabela 1. Condições operacionais do reator UASB

Etapa	Período de operação	Q	TDH	velocidade ascensional	nº de perfis de amostragem
	(dia)	(L.h ⁻¹)	(h)	(m.h ⁻¹)	temporal
I	0 a 309	16,0	10	0,23	2 (304º e 309º dia)
II	310 a 344	Mín = 9,6	11	0,21	2 (320º e 344º dia)
		Max = 22,4	9	0,25	
III	345 a 372	Mín = 6,4	12	0,20	2 (349º e 370º dia)
		máx = 25,6	8	0,26	

A etapa I teve início após a inoculação e o período de partida do reator em regime de batelada por 24 h. Nessa etapa o reator foi operado com vazão média afluente constante e igual a 16,0 L.h⁻¹ e tempo de detenção hidráulica de 10 h durante 309 dias. O estado de equilíbrio dinâmico aparente foi alcançado no 90º dia de operação do reator e verificado por meio de determinação dos parâmetros de controle: DQO (bruta e filtrada), ácidos voláteis, pH, alcalinidade a bicarbonato, sólidos suspensos (fixos e voláteis) e sólidos totais (fixos e voláteis).

O comportamento do reator foi avaliado por determinação dos parâmetros de controle temperatura do efluente, pH, alcalinidade a bicarbonato, ácidos voláteis, DQO (bruta e filtrada), sólidos suspensos (fixos e voláteis) e sólidos totais (fixos e voláteis). A mesma frequência das análises de monitoramento foi adotada em todas as etapas de operação do reator.

Na etapa II, o reator UASB foi submetido a variações senoidais cíclicas em valores inferiores e superiores a 40% da vazão afluente, alcançando picos de mínimo e de máximo iguais a 9,6 L.h⁻¹ e 22,4 L.h⁻¹, respectivamente, durante 34 dias.

A aplicação da variação senoidal, com período de 24h e amplitudes de 40% e 60% do valor da vazão média, foi realizada por programa computacional que alterava percentualmente a vazão média afluente da bomba dosadora em intervalos de 15 min. O comportamento do reator foi avaliado por determinação dos mesmos parâmetros de controle da etapa I, que indicou o alcance do estado de equilíbrio dinâmico aparente no 319º dia de operação.

A etapa III teve início no 345º dia de operação do reator com aplicação da variação senoidal cíclica em valores inferiores e superiores a 60% da vazão afluente, alcançando picos de mínimo e de máximo iguais a 6,4 L.h⁻¹ e 25,6 L.h⁻¹, respectivamente, durante 27 dias. O comportamento do reator nessa etapa foi avaliado por meio da determinação dos mesmos parâmetros de controle das etapas anteriores.



MONITORAMENTO

O monitoramento possibilitou o acompanhamento do comportamento do reator quando operado com cargas hidráulicas constantes e variáveis senoidalmente em 40% e 60%.

Os parâmetros analisados no substrato e efluente do reator, seus respectivos métodos e bibliografia utilizada estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros analisados, seus respectivos métodos e bibliografia utilizada

Parâmetros	Método de Análise	Método N°	Referência
Temperatura	-	-	-
pH	Potenciométrico	4500_H ⁺	APHA, 1998
Alcalinidade a bicarbonato	Titulométrico	-	Ripley <i>et al.</i> (1986)
DQO	Espectrofotométrico	5220_D	APHA (1998)
DBO	Titulométrico	5210_D	APHA (1998)
Sólidos suspensos	Gravimétrico	2540_G	APHA (1998)
Sólidos totais	Gravimétrico	2540_E	APHA (1998)
Ácidos voláteis	Titulométrico	-	Dillalo e Albertson (1961)
Gases	Cromatográfico	-	-

Análises dos parâmetros DQO (bruta e filtrada), DBO, pH, sólidos suspensos fixos e voláteis e sólidos totais fixos e voláteis foram realizadas em amostras do afluente (substrato) e do efluente para avaliar o comportamento do reator UASB durante todo o período de operação do reator de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1998). As análises de alcalinidade a bicarbonato foram realizadas em amostras do substrato e do efluente do reator segundo metodologia descrita por Ripley *et al.* (1986). As concentrações de ácidos voláteis foram determinadas em amostras do substrato e do efluente do reator de acordo com metodologia proposta por Dillalo e Albertson (1961).

A composição do biogás, em termos da porcentagem dos gases metano, gás carbônico, nitrogênio e oxigênio gerados pelo sistema, foi avaliada por cromatografia gasosa utilizando cromatógrafo Gow-Mac. O cromatógrafo tem coluna empacotada com Porapak Q (partículas de 80 a 100 mesh) com comprimento de 2 m e diâmetro interno de 1/4 " e detector de condutividade térmica. As amostras de biogás foram coletadas em seringas plásticas (50 mL) diretamente da mangueira de silicone da saída de gás do reator e 0,5 mL foram injetados no cromatógrafo. O procedimento de coleta e injeção das amostras de biogás foi realizado em triplicata.

Os parâmetros para monitoramento do reator durante o período de partida, bem como suas respectivas frequências de análises, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros analisados e suas frequências (partida do reator).

Parâmetro	unidade	frequência de amostragem		
		afluente	reator	efluente
Temperatura	°C	diária	diária	diária
pH	-	diária	diária	diária
alcalinidade a bicarbonato	mg.L ⁻¹	3 x semana	-	3 x semana
DQO (bruta e filtrada)	mg.L ⁻¹	3 x semana	-	3 x semana
DBO	mg.L ⁻¹		-	1 x semana
sólidos suspensos – fixos/voláteis	mg.L ⁻¹	3 x semana	-	3 x semana
sólidos totais – fixos/voláteis	mg.L ⁻¹	3 x semana	-	3 x semana
ácidos voláteis	mg.L ⁻¹	3 x semana	-	3 x semana
composição de biogás	%	-	semanal	-

A frequência de monitoramento dos parâmetros de controle temperatura e pH; composição do biogás; alcalinidade a bicarbonato, DQO (bruta e filtrada), DBO, sólidos suspensos (fixos e voláteis), sólidos totais



(fixos e voláteis) e ácidos voláteis foi diária, semanal e igual a três vezes por semana, respectivamente, durante a partida e a operação do reator.

Após atingir o estado de equilíbrio dinâmico aparente em cada etapa de operação, a frequência de monitoramento do reator foi reduzida para duas vezes por semana para os mesmos parâmetros do período de partida monitorados 3 x por semana.

PERFIS DE AMOSTRAGEM TEMPORAL

Dois perfis de amostragem temporal foram realizados com intervalos de 3 h entre as coletas em período de 24 h, após o reator ter alcançado o estado de equilíbrio dinâmico aparente em cada etapa de operação. Nos perfis, foram realizadas análises de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), nitrogênio total (N-NTK) e nitrogênio amoniacal (N-NH₄⁺) com coleta de amostras compostas de mesma alíquota (20 mL) do afluente e efluente do reator, além dos mesmos parâmetros de controle determinados no monitoramento do reator.

As coletas das amostras para realização dos perfis temporais foram realizadas no primeiro dia da aplicação da nova amplitude, em cada etapa de operação do reator.

Os resultados experimentais obtidos ao longo de toda a operação do reator possibilitaram a avaliação do comportamento do sistema quando submetido a variações de carga hidráulica e a comparação entre os resultados experimentais obtidos nas etapas.

Os resultados foram apresentados por meio de gráficos e equações empíricas de correlação e utilizados na calibração do modelo matemático MMS (Carvalho e Pires, 2002) que será apresentado oportunamente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO

A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados obtidos no monitoramento do substrato utilizado na alimentação do reator UASB. A caracterização do substrato utilizado na alimentação do reator foi realizada por determinações das concentrações dos parâmetros de controle em 64 amostragens: DQO (bruta e filtrada), pH, ácidos voláteis e alcalinidades total e a bicarbonato, sólidos totais e sólidos suspensos.

Tabela 4. Caracterização do substrato afluente ao reator UASB

Parâmetros	Substrato				
	N	M	DP	Min	Máx
pH	64	6,4	0,0	6,4	6,5
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	64	191	9	181	206
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	64	628	40	573	687
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	64	419	19	394	447
ST (mg.L ⁻¹)	64	627	62	442	747
STV (mg.L ⁻¹)	64	453	76	307	578
STF (mg.L ⁻¹)	64	174	34	135	205
SST (mg.L ⁻¹)	64	97	9	85	107
SSV (mg.L ⁻¹)	64	85	8	75	94
SSF (mg.L ⁻¹)	64	12	6	8	19
N: número de amostras; M: média aritmética; DP: desvio padrão; Min: valor mínimo; Máx: valor máximo					



MONITORAMENTO

Com o objetivo de avaliar o comportamento do reator UASB quando submetido a variações senoidais cíclicas de 40% e 60% da vazão média afluyente foram analisadas a estabilidade do pH e da alcalinidade nas variações cíclicas de vazão; a capacidade do reator em amortecer a variação cíclica senoidal imposta (eficiência de remoção de matéria orgânica); a variabilidade da qualidade do efluente e a capacidade de recuperação das condições iniciais.

Apesar de o reator ter sido operado durante 370 dias, optou-se por apresentar os resultados experimentais obtidos na realização dos perfis de amostragem temporal que apresentam um resumo do comportamento do reator UASB.

Dentre os 8 perfis de amostragens temporais realizados ao longo de todo o experimento, apenas o perfil que apresentou melhores resultados em cada etapa foi escolhido para efeito de comparação entre as etapas de operação do reator. Os perfis escolhidos correspondem aos dias 304º (etapa I), 344º (etapa II) e 370º (etapa III) de operação do reator, ou seja, com aplicação de vazão afluyente constante e igual a 16,0 L.h⁻¹, variação senoidal cíclica de 40% e de 60% da vazão afluyente, respectivamente, e após o reator ter absorvido o impacto das variações de vazão.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados experimentais de 8 amostragens obtidos durante a realização dos perfis de amostragem temporal dos dias 304º, 344º e 370º de operação do reator UASB, ou seja, submetido à vazão média afluyente constante e a variações senoidais cíclicas de 40% e de 60%, respectivamente.

Tabela 5. Resumo dos resultados de operação obtidos nas etapas I, II e III

PARÂMETROS	Q _{méd} = 16,0 L.h ⁻¹ ; TDH = 10 h								Q = 40%*Q _{méd} ; TDH = var.								Q = 60%*Q _{méd} ; TDH = var.							
	AFLUENTE				EFLUENTE				AFLUENTE				EFLUENTE				AFLUENTE				EFLUENTE			
	M	DP	MIN	MÁX	M	DP	MIN	MÁX	M	DP	MIN	MÁX	M	DP	MIN	MÁX	M	DP	MIN	MÁX	M	DP	MIN	MÁX
pH	6,3	0,1	6,2	6,4	6,9	0,1	6,8	7,1	6,5	0,1	6,4	6,6	7,0	0,1	6,9	7,1	6,4	0,1	6,3	6,5	6,9	0,1	6,6	7,0
Temp. do líquido (°C)	-	-	-	-	23,9	1,0	22,0	25,0	-	-	-	-	21,1	1,2	20,0	23,0	-	-	-	-	24,0	1,0	22,5	25,0
Alc total (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	196	8	184	206	261	19	244	295	176	19	162	213	199	12	181	213	181	11	158	195	240	14	218	263
Alc bic. (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	84	20	52	117	231	18	211	261	92	17	77	131	164	20	140	192	52	3	46	57	197	12	184	216
Ac.vol (mgHAC.L ⁻¹)	145	28	103	196	41	10	26	54	118	11	105	133	49	24	21	86	168	13	142	188	60	7	47	70
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	693	127	588	909	267	62	207	360	750	142	600	916	384	101	211	494	562	77	487	729	347	36	303	411
% remoção DQO bruta	-	-	-	-	61	-	-	-	-	-	-	-	48	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	502	69	426	595	134	30	99	189	480	76	404	643	186	57	106	255	404	69	314	527	170	21	141	199
SST (mg.L ⁻¹)	105	24	78	145	72	20	50	120	127	44	81	198	121	39	71	177	84	19	64	117	92	13	78	116
SSV (mg.L ⁻¹)	99	22	77	139	63	24	21	109	114	40	68	178	111	34	65	162	75	16	60	106	84	12	70	104
SSF (mg.L ⁻¹)	6	5	0	14	9	9	3	29	13	5	6	20	9	7	1	19	9	5	4	20	8	3	4	12

A Figura 1 apresenta as variações temporais de vazão, pH, alcalinidade a bicarbonato, concentração de ácidos voláteis, DQO de amostras brutas e filtradas, concentração de sólidos suspensos voláteis (SSV) e produção de metano (CH₄).

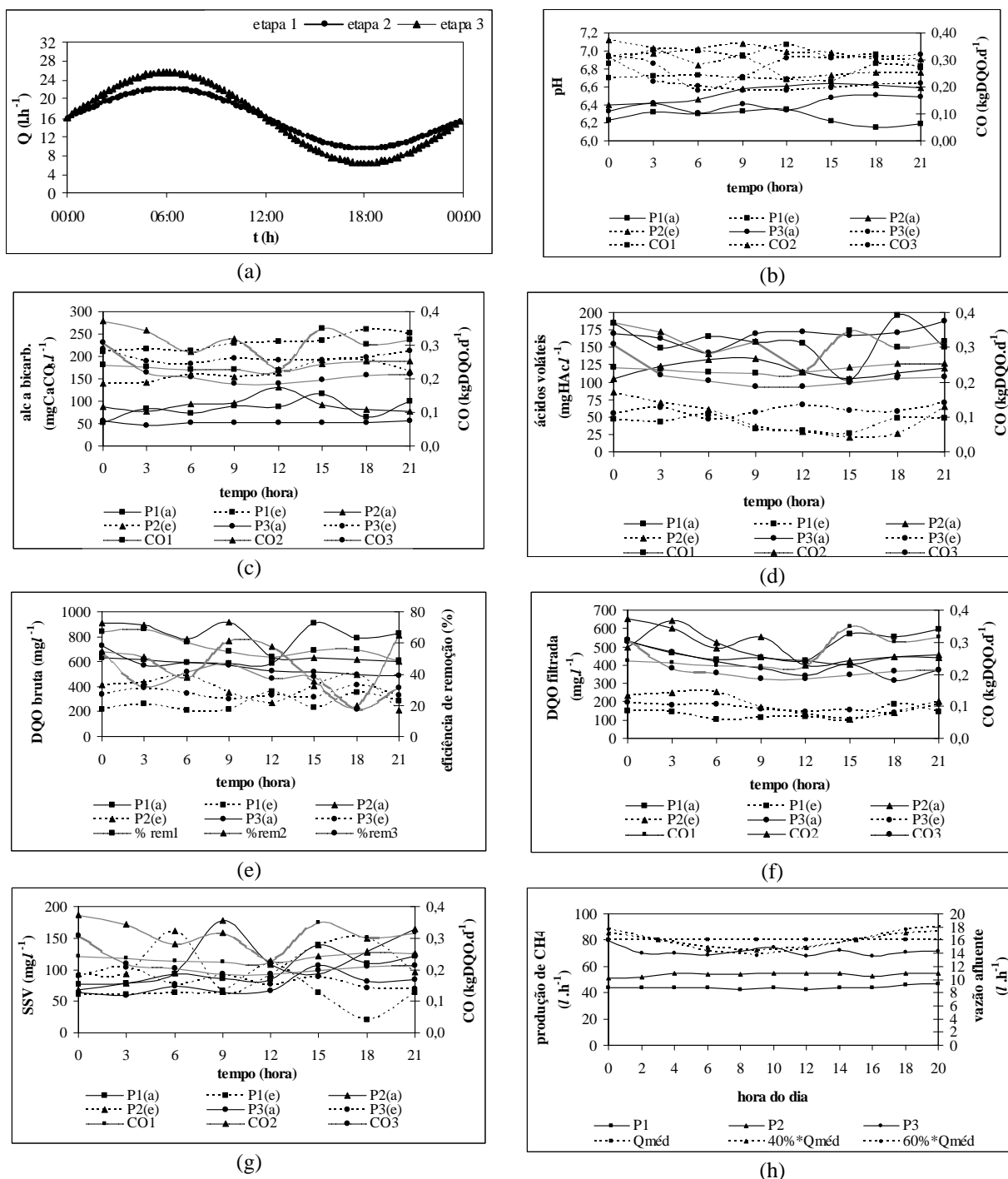


Figura 1: Resultados dos perfis de 24 h de amostragem temporal do reator operado com vazão média afluente ($Q_{méd}$) e submetido a variações de vazão de 40% ($40\% \cdot Q_{méd}$) e de 60% ($60\% \cdot Q_{méd}$). a) variação da vazão afluente; b) pH, c) alcalinidade a bicarbonato, d) concentração de ácidos voláteis, e) DQO bruta, f) DQO filtrada; g) concentração de sólidos suspensos voláteis, h) produção de gás metano (CH_4). *O tempo 0 dos gráficos corresponde às 9 h; (a), (b) e (g) correspondem a afluente, efluente e gás.

Os valores médios obtidos para temperatura ambiente e para a temperatura do efluente (líquido) do reator foram de $22,7 \pm 2,5^\circ C$ e $23,0 \pm 1,6^\circ C$, respectivamente.

O reator apresentou comportamento estável quanto ao pH em todas as etapas de operação, com valores variáveis de 6,2 a 6,6 no afluente e de 6,6 a 7,1 no efluente (Figura 1.b).



Os valores de alcalinidade total variaram de 158 a 213 mg $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ no afluente e de 181 a 295 mg $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ no efluente do reator. Os valores obtidos para a alcalinidade a bicarbonato variaram de 46 a 131 mg $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ para o afluente e de 140 a 261 mg $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ para o efluente do reator. Esses valores indicaram a capacidade de tamponamento do sistema mesmo quando submetido a variações cíclicas da vazão afluente (Figura 1.c).

As concentrações de ácidos voláteis no efluente resultaram em valores inferiores a 90 mgHAc. L^{-1} , com concentração variável de 21 a 86 mgHAc. L^{-1} nas três etapas de operação. Foi possível observar o acúmulo de ácidos no efluente (131 mgHAc. L^{-1}) com a aplicação das variações senoidais cíclicas de vazão, principalmente nos períodos de aumento da vazão média para máxima (Figura 1.d). O aumento das concentrações de ácidos voláteis pode ter ocorrido devido a maior velocidade ascensional de fluxo, que acarretou em menor tempo de contato entre o substrato e a biomassa para a realização da metanogênese. Lew *et al.* (2004) e Leitão (2004) também observaram maiores concentrações de ácidos voláteis na operação de reatores UASB com tempos de detenção hidráulica reduzidos. Foi verificada geração de ácidos voláteis no afluente, provavelmente devido à prévia degradação do substrato nos tanques de armazenamento.

Na etapa I, o reator operado com vazão média afluente de 16 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ e carga orgânica variável de 0,22 a 0,35 $\text{kgDQO}\cdot\text{d}^{-1}$, apresentou eficiência de remoção de DQO bruta variável de 46% a 61%. Na etapa II (variação de 40%), verificou-se eficiência de remoção de DQO bruta variável de 32% a 48%. Na etapa III, com variação da vazão afluente de 60%, a eficiência de remoção de DQO bruta variou de 10% a 59%. Foi possível observar redução da eficiência de remoção de matéria orgânica de aproximadamente 13% e 21% com a aplicação das variações senoidais cíclicas da vazão média afluente de 40% e de 60%, respectivamente (Figura 1.e).

A eficiência do sistema foi prejudicada pelo arraste de sólidos no efluente, provavelmente pela formação de bolsões devido ao acúmulo de biogás no manto de lodo. Esse fenômeno também foi verificado por Mahmoud *et al.* (2003). Aiyuk *et al.* (2006) ressaltaram que o aumento do arraste de sólidos no efluente pode ocorrer devido à ruptura do grânulo do lodo anaeróbio usado no tratamento de esgoto doméstico de baixa concentração. Com a aplicação das variações senoidais cíclicas da vazão afluente de 40% e de 60%, foi possível observar maior arraste de sólidos nos períodos de aumento da velocidade ascensional de fluxo (Figura 1.g).

Pela Figura 1.h é possível observar produção similar de gás metano quando o reator foi operado com vazão média afluente constante (1,83 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$) e quando submetido à variação cíclica de 40% da vazão afluente (2,24 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$). Isso pode ter ocorrido por não ter havido tempo suficiente para o que a população de arqueias metanogênicas consumissem o excesso de ácidos voláteis produzidos pelos microrganismos acidogênicos. Maior produção de metano (2,97 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$) foi verificada quando o reator foi submetido à variação cíclica de 60% (etapa III) da vazão média afluente, provavelmente pelo fato dos microrganismos já estarem mais adaptados às variações impostas.

CONCLUSÕES

Com o objetivo de avaliar o comportamento do reator UASB quando submetido a variações senoidais cíclicas de 40% e 60% foi possível concluir que o reator apresentou estabilidade, com concentrações de ácidos voláteis inferiores a 90 mgHAc. L^{-1} no efluente. O reator foi capaz de amortecer os picos de concentração observados de 131 mgHAc. L^{-1} no efluente nas etapas II e III, ou seja, quando submetido a variações da vazão afluente. A prévia degradação do substrato nos tanques de alimentação do sistema contribuiu para geração de ácidos voláteis no afluente.

A capacidade do reator em amortecer as variações cíclicas senoidais impostas foi prejudicada em relação à eficiência de remoção de matéria orgânica que variou de 10% a 59%. Por outro lado, o reator apresentou capacidade de recuperação das condições iniciais nos períodos em que foram aplicadas variações da: vazão média afluente para vazão mínima afluente e da vazão mínima afluente para vazão média afluente.

Em relação à variabilidade da qualidade do efluente, o reator foi capaz de absorver a concentração variável de matéria orgânica afluente (carga orgânica variável), pois não foi verificado aumento da concentração da matéria orgânica no efluente quando operado com vazão afluente constante. Porém quando foram aplicadas



variações cíclicas de vazão, nos períodos com variações de valores máximos para valores médios, foi observada queda na eficiência de remoção de DQO bruta (variou de 32% a 48%) devido ao maior arraste de SST e de SSV.

O arraste de sólidos suspensos totais e de sólidos suspensos voláteis no efluente foi observado em todas as etapas de operação do reator provavelmente devido ao menor volume de substrato presente nos tanques de armazenamento e a maior concentração de sólidos depositada no fundo desses tanques nos períodos que antecederiam a alimentação. Outro fator que pode ter contribuído para o arraste de sólidos foi a formação de “bolsões” devido ao acúmulo de biogás no manto de lodo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AISSE M.M., LOBATO M.B., BONA, A., GARBOSSA L.H.P., JURGENSEN D., SOBRINHO, P.A. (2000). Avaliação do sistema reator UASB e filtro biológico para o tratamento de esgoto sanitário. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre, Brasil, v.1, p.1-9.
2. AIYUK, S., FORSTER, I., LIEVEN, D.K., VAN HAANDEL, A., VERSTRAETE, W. (2006). Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates: a review. *Bioresource Technology*, v.97, n.17, p.2225-2241.
3. BATISTA, K.B. Resposta dinâmica dos reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) submetidos a cargas senoidais. São Carlos, 2000. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
4. CARVALHO, K.Q., PIRES, E.C. (2002). Dynamic response of UASB reactors submitted to diurnal cyclical flow: simplified mathematical model. In: VII Latin American Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion, 2002, Mérida, México, Annals: 189-196.
5. DILLALO, R., ALBERTSON, O.R. (1961). Volatile acids by direct titration. *Journal Water Pollution Control Federation*, v.23, n.4, p.356-365.
6. FLORÊNCIO, L., KATO, M.T., DE MORAIS, J.C. (2001). Domestic sewage treatment in full-scale UASB plant at Mangureira, Recife, Pernambuco. *Water Science Technology*, v.44, n.4, p.71-77.
7. FRANCO, A., ROCA, E., LEMA, J.M. (2002a). Improvement of the properties of granular sludge in UASB reactors, by flow pulsation. In: VII Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion, 2002, Mérida, México, Annals, v.1, p.237-244.
8. FRANCO, A., GRESIA, G., ROCA, E., ROZZI, A., LEMA, J.M. (2002b). Influence of pulsation on start-up of UASB reactors. *Water Science and Technology*, v.45, n.10, p.163-168.
9. HIRASAWA, J.S. Avaliação da comunidade microbiana anaeróbia em reator sulfetogênico utilizando a hibridação in situ com sondas fluorescentes (FISH). São Carlos, 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
10. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2002) – Pesquisa nacional de saneamento básico, Rio de Janeiro, 397p.
11. LEITÃO, R.C. Robustness of USB reactors treating sewage under tropical conditions. Wageningen, 2004. PhD thesis-Wagenigen University, Wagenigen, Netherlands, 2004.
12. LEW, B., TARRE, S., BELAVSKI, M., GREEN, M. (2004). UASB reactor for domestic wastewater treatment at low temperatures: a comparison between a classical UASB and Hybrid UASB-filter reactor. *Water Science and Technology*, v.49, n.11-12, p.295-301.
13. MAHMOUD, N., ZEEMAN, G., GIJZEN, H., LETTINGA, G. (2003). Solids removal in upflow anaerobic reactors, a review. *Bioresource Technology*, v.90, n.1, p.1-9.
14. OLIVA, L.C.H.V. Tratamento de esgotos sanitários com reator anaeróbio de manta de lodo (UASB): protótipo - desempenho e respostas dinâmicas às sobrecargas hidráulicas. São Carlos, 1997. Tese de Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
15. PAULA JR, D.R., FORESTI, E. (1992). Kinetics studies on a UASB reactor subjected to increasing COD concentration. *Water Science and Technology*, v.25, n.7, p.103-111.
16. PIRES, E.C., PIRES, R.C., BATISTA K.B., CARVALHO K.Q. (2001). Dynamic behaviour of UASB reactors submitted to cyclical loads. In: 9th Congress on Anaerobic Digestion, 2001, Antwerp, Belgium, Annals: 219-221.



17. RIPLEY, L.E., BOYLE, W.C., CONVERSE, J.C. (1986). Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digester of high-strength wastes. Journal Water Pollution Control Federation, v.58, n.5, p.406-411.
18. STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1998). 20th edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
19. TORRES, P. Desempenho de um reator anaeróbico de manta de lodo (UASB) de bancada no tratamento de substrato sintético simulando esgotos sanitários. São Carlos, 1992. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.