

DESEMPENHO DE PROCESSO ANAERÓBIO EM DOIS ESTÁGIOS (REATOR COMPARTIMENTADO SEGUIDO DE REATOR UASB) PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE SUINOCULTURA

GRACIE F. R. FERNANDES¹, ROBERTO A. DE OLIVEIRA²

RESUMO: Avaliou-se o efeito das águas residuárias de suinocultura com concentrações de sólidos suspensos totais em torno de 6.000 mg L⁻¹ (DQO_{total} variando de 7.557 a 11.640 mg L⁻¹) no desempenho de processo anaeróbico em dois estágios compostos por reator compartimentado (ABR) e reator de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB), instalados em série, em escala-piloto (volumes de 530 e 120 L, respectivamente), submetidos a tempos de detenção hidráulica (TDH) de 56 a 18 h no primeiro reator e de 13 a 4 h no segundo reator. As eficiências médias de remoção de DQO_{total} variaram de 71,1 a 87,5% no reator ABR e de 41,5 a 50,1% no reator UASB, resultando em valores médios de 86,8 a 94,9% para o sistema de tratamento anaeróbico em dois estágios com carga orgânica volumétrica (COV), na faixa de 5,05 a 10,12 kg DQO_{total} (m³ d)⁻¹, no reator ABR, e de 2,83 a 9,63 kg DQO_{total} (m³ d)⁻¹, no reator UASB. As eficiências de remoção de SST e SSV foram da ordem de 95,6%. O teor de metano no biogás manteve-se acima de 70% para os dois reatores. A produção volumétrica de metano máxima de 0,755 m³ CH₄ (m³ d)⁻¹ ocorreu no reator 1, com COV de 10,12 kg DQO_{total} (m³ d)⁻¹ e TDH de 18 h. Os valores médios de pH variaram na faixa de 7,2 a 8,0 para os efluentes dos reatores 1 e 2. Os ácidos voláteis totais mantiveram-se estáveis com concentrações abaixo de 200 mg L⁻¹. Com variações abruptas e acentuadas de concentrações de SST e DQO_{total} do afluente, os reatores mantiveram as eficiências de remoção de DQO e sólidos suspensos, em torno de 70%, e a qualidade do biogás, com 80% de CH₄.

PALAVRAS-CHAVE: digestão anaeróbia, reator anaeróbico de chicanas, resíduos de suínos.

PERFORMANCE OF TWO-STAGE ANAEROBIC PROCESS (BAFFLED REACTOR (ABR) FOLLOWED BY AN UPFLOW SLUDGE BLANKET REACTOR (UASB)) TREATING SWINE WASTEWATER

ABSTRACT: In this work it was evaluated the effect of swine wastewater with total suspended solid (TSS) concentration around 6000 mg L⁻¹ (COD_{total} from 7557 to 11640 mg L⁻¹) on the performance of two stage anaerobic process constituted of anaerobic baffled reactors (ABR) and an upflow sludge blanket reactor (UASB) installed in series, in pilot scale testing (volumes of 530 L and 120 L, respectively) and with hydraulic detention times (HDT) of 56 to 18 h in the first reactor and 13 to 4 h in the second reactor. The mean COD_{total} removal efficiency varied from 71.1 to 87.5% in ABR and from 41.5 to 50.1% in UASB reactor, resulting in average values ranging from 86.8 to 94.9% for the two stage anaerobic treatment system under organic volumetric load (OVL) of 5.05 to 10.12 kg COD_{total} (m³ d)⁻¹ in ABR and 2.83 to 9.63 kg COD_{total} (m³ d)⁻¹ in UASB reactor. The mean TSS and VSS removal efficiencies reached 95.6%. The methane concentration was over 70% for both reactors. The maximum volumetric methane production in the first reactor was obtained with OVL of 10.12 kg COD_{total} (m³ d)⁻¹ and HDT of 18 hours of 0.755 m³ CH₄ (m³ d)⁻¹. The average pH values in the effluents ranged from 7.2 to 8.0 in the first and second reactors. The total volatile acid concentration was kept below 200 mg L⁻¹. The reactors tolerated shock organic loads maintaining COD and SS removal efficiencies around 70% and biogas quality with 80% of CH₄.

KEYWORDS: anaerobic digestion, anaerobic baffled reactor, swine waste.

¹ Engenheira de Alimentos, Mestre em Microbiologia Agropecuária, Unesp - Jaboticabal, gracie@fcav.unesp.br

² Engenheiro Agrônomo e Tecnólogo em Construção Civil, Prof. Assistente Doutor, Departamento de Engenharia Rural, UNESP - Jaboticabal - SP, raoder@fcav.unesp.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 29-10-2004

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 13-4-2006

INTRODUÇÃO

A magnitude dos problemas causados, no meio urbano, pela destinação inadequada aos cursos d'água dos esgotos domésticos e das águas residuárias industriais, vem sendo intensamente estudada e é amplamente conhecida (OLIVEIRA, 1997).

No meio rural, a ausência de avaliações do sistema de produção de maneira integrada, de tal forma que se consiga agregar valor aos resíduos, tem exigido a fixação de limites de emissão de poluentes cada vez mais rigorosos pelas normas legislativas de vários países.

A suinocultura é, particularmente, uma das atividades que vem acentuando a sua participação nos impactos provocados ao ambiente. A adoção de sistemas confinados de produção com o uso intensivo da água para higienização das instalações produz grandes quantidades de dejetos líquidos.

Em virtude das altas concentrações de matéria orgânica, sólidos, nutrientes, metais pesados e patógenos que caracterizam as águas residuárias de suinocultura, o seu lançamento de forma indiscriminada no solo ou num corpo d'água pode ocasionar sérios problemas sanitários e ambientais.

A poluição do ambiente nas regiões produtoras é alta, pois, enquanto a demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5) do esgoto doméstico é de cerca de 200 a 500 $mg L^{-1}$, a DBO_5 dos dejetos de suínos oscila entre 30.000 e 52.000 $mg L^{-1}$, ou seja, em torno de 260 vezes superior (OLIVEIRA, 1997).

Os modernos reatores de alta taxa, nos quais o tempo de detenção hidráulica está dissociado do tempo de retenção dos sólidos, permitiram a ampla aceitação mundial da tecnologia anaeróbia como alternativa viável para sistemas de tratamento de águas residuárias (LIER et al., 2001).

As limitações do processo anaeróbio nos reatores de alta taxa, como, por exemplo, no reator de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB), estão relacionadas à hidrólise dos sólidos suspensos orgânicos (SSV) do afluente, considerados prejudiciais ao desenvolvimento do lodo granular (LETTINGA & HULSHOFF-POL, 1991; SEGHEZZO et al., 1998). Isso tem maior importância no tratamento de resíduos sólidos, esterco, lodos e águas residuárias com altas concentrações de sólidos suspensos, tais como o esgoto sanitário bruto (LIER et al., 2001) e as águas residuárias de suinocultura (OLIVEIRA, 1997).

Assim, para tratar águas residuárias com altas participações de fração orgânica particulada, pode ser vantajoso aplicar-se o processo anaeróbio em dois estágios (SEGHEZZO et al., 1998), o qual, segundo HAANDEL & LETTINGA (1994), consiste em dois reatores em série, um para hidrólise parcial do material orgânico complexo e o outro para digerir os compostos solúveis formados no primeiro reator.

O reator compartimentado (ABR), altamente eficiente na retenção da fração orgânica particulada (BOOPATHY, 1998), poderá melhorar o desempenho e a estabilidade do sistema de tratamento. A otimização da configuração dos reatores associa objetivos científicos e tecnológicos na área de processos anaeróbios e visa a obter maior eficiência na remoção de sólidos suspensos orgânicos, incrementando a hidrólise no primeiro reator.

Portanto, neste trabalho, avaliou-se o desempenho de reatores ABR e UASB em série, tratando águas residuárias de suinocultura, com concentrações de sólidos suspensos totais em torno de 6.000 $mg L^{-1}$, variando-se o tempo de detenção hidráulica e a carga orgânica volumétrica.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na área experimental de Digestão Anaeróbia, do Departamento de Engenharia Rural, da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Câmpus de Jaboticabal, cujas coordenadas geográficas são 21°15'22''S e 48°18'58''W e

altitude de 575 m. O clima, segundo classificação de Köppen, é Cwa (subtropical úmido, seco no inverno e com chuvas no verão) e a temperatura média anual é de 21° C.

A unidade experimental foi constituída por dois reatores anaeróbios (compartimentado com três câmaras (ABR) e UASB) em escala-piloto, instalados em série, com volumes de 530 L (primeiro estágio) e 120 L (segundo estágio) (Figura 1). Foram montadas caixas para preparação (peneiramento e diluição) dos dejetos de suínos e para armazenamento do afluente, com mistura; bomba helicoidal para alimentação do reator ABR; selos hidráulicos e gasômetros.

O afluente utilizado para a alimentação do reator ABR foi o esterco de suínos pré-peneirado (peneira com malha quadrada de abertura de 2 mm) e diluído para a obtenção de concentrações de sólidos suspensos totais em torno de 6.000 mg L⁻¹.

O esterco bruto utilizado para preparar o afluente foi coletado em confinamento de suínos na fase de terminação, alimentados com ração à base de milho ou sorgo e soja, com complemento vitamínico e mineral.

Sabendo-se a concentração de ST, foi pesada a quantidade de esterco bruto, pré-diluído, peneirado e homogeneizado na concentração de SST desejada.

O experimento foi dividido em três ensaios, variando-se o tempo de detenção hidráulica (TDH) nos reatores e procurando-se manter as concentrações de sólidos suspensos totais (SST) no afluente, em torno de 6.000 mg L⁻¹, conforme descrito na Tabela 1.

TABELA 1. Condições de operação dos reatores ABR e UASB instalados em série nos ensaios 1; 2 e 3 do experimento com o sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios.

Ensaio	Duração (dias)	TDH (h)		SST		COV (kg DQO _{total} m ⁻³ reator d ⁻¹)
		ABR	UASB	Afluente (mg L ⁻¹)		
				ABR	UASB	ABR
1	56	56	13,0	5.626	11.640	5,05
2	58	28	6,5	6.206	9.198	7,81
3	37	18	4,0	5.645	7.557	10,12

TDH - tempo de detenção hidráulica; SST - sólidos suspensos totais; DQO - demanda química de oxigênio; COV - carga orgânica volumétrica

No início de cada ensaio, foi considerado um tempo inicial de adaptação a cada nova condição operacional imposta, com duração em torno de 15 dias. Para tanto, nos valores médios apresentados nas tabelas, não foram considerados os dados obtidos durante as fases de adaptação.

Ao final dos ensaios 1 e 2, foram aplicados choques de carga orgânica, mantendo-se o TDH e aumentando-se o valor da DQO do afluente em até cinco vezes a média para observar a capacidade de acomodação do reator a variações abruptas e acentuadas nas concentrações de SST e DQO do afluente.

Para a partida dos reatores ABR e UASB, no ensaio 1, foi utilizado como inóculo lodo proveniente de reatores UASB, tratando águas residuárias de suinocultura, com concentrações de SST de 7.131 mg L⁻¹ e DQO_{total} de 18.717 mg L⁻¹. O volume de lodo colocado foi suficiente para preencher de 20 a 30% do volume de cada reator. No início dos ensaios 2 e 3, foram mantidos os mesmos 20 a 30% do volume de cada reator preenchido com o lodo.

Foram coletadas amostras compostas dos afluentes e efluentes do primeiro e segundo reatores, das 7h30 às 13h30, a cada hora, com amostras simples de 400 mL, formando amostras compostas com volume suficiente para a realização de todos os exames e determinações.

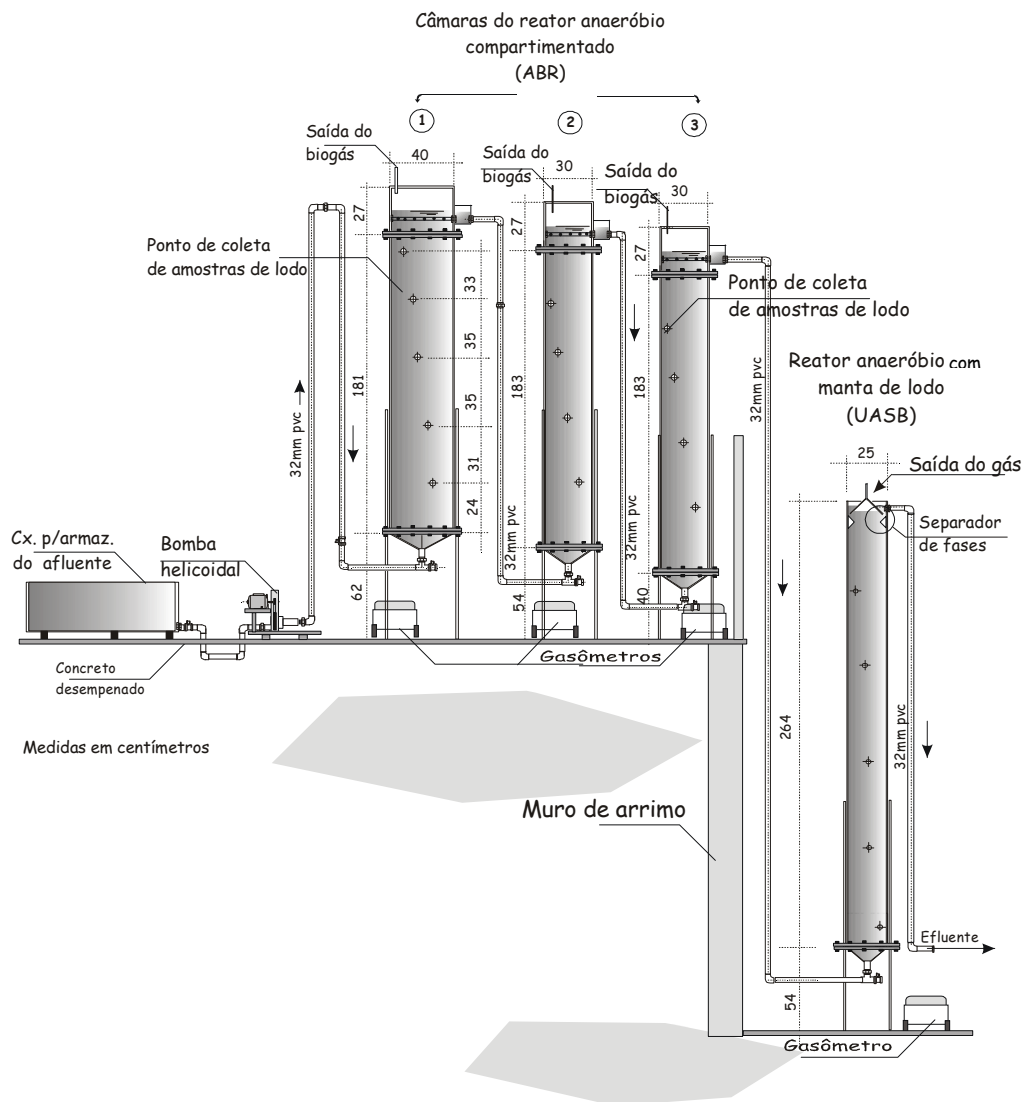


FIGURA 1. Corte longitudinal esquemático do sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, com reatores compartimentados e UASB em escala-piloto.

Nessas amostras, foram determinadas a demanda química de oxigênio total (DQO_{total}), da fração dissolvida ($DQO_{dissolvida}$) e da fração devido aos sólidos suspensos (DQO_{SS}), duas vezes por semana, de acordo com APHA/AWWA/WPCF (1992) e OLIVEIRA (1997). O volume do biogás produzido foi determinado diariamente por meio de medidas em gasômetros metálicos, como descrito por OLIVEIRA (1997), e a composição do biogás foi analisada semanalmente, em cromatografia gasosa, conforme APHA/AWWA/WPCF (1992).

O valor do pH e as concentrações de sólidos suspensos totais (SST) e voláteis (SSV) foram determinados, duas vezes por semana, de acordo com APHA/AWWA/WPCF (1992), e as concentrações dos ácidos voláteis analisadas, duas vezes por semana, segundo metodologia descrita por DILALLO & ALBERTSON (1961).

As temperaturas climatológicas médias foram obtidas na Estação Agroclimatológica do Departamento de Ciências Exatas da UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios da DQO_{total} do afluente nos três ensaios foram de 11.640 mg L⁻¹, 9.198 mg L⁻¹ e 7.557 mg L⁻¹ (Tabela 2), respectivamente, e diminuiram ao longo do reator ABR e no reator UASB, demonstrando a estabilidade do sistema de tratamento.

Os valores médios da DQO_{SS} no afluente, resultante da diferença entre DQO_{total} e $DQO_{dissolvida}$, corresponderam, na média, a 66,1%; 70,2% e 73,6% da DQO_{total} do afluente do reator ABR para os ensaios 1; 2 e 3, respectivamente (Tabela 2). Esses resultados são similares aos obtidos por OLIVEIRA (1997), PEREIRA (2003) e SANTANA & OLIVEIRA (2005) que, em trabalho realizado com águas residuárias de suinocultura, obtiveram DQO_{SS} entre 66% e 80%; 70% e 75%, e 71,0% e 76,5% da DQO_{total} do afluente, respectivamente.

Os valores médios da DQO_{SS} no efluente do reator ABR e no efluente do reator UASB corresponderam, na média, a 85,2%; 89,9% e 91,2%, e a 63,1%; 89,0% e 92,3% da DQO_{total} para os ensaios 1; 2 e 3, respectivamente (Tabela 2).

Os valores médios das concentrações de SST no afluente foram de 5.626, 6.206 e de 5.645 mg L⁻¹ (Tabela 2) para os ensaios 1; 2 e 3, respectivamente.

TABELA 2. Temperatura climatológica média, tempo de detenção hidráulica (TDH), valores médios e respectivos coeficientes de variação (C.V. em %) das concentrações de DQO_{total} , $DQO_{dissolvida}$ e DQO_{SS} , sólidos suspensos totais (SST) e voláteis (SSV) dos afluentes e efluentes, e das cargas orgânicas volumétricas (COV) em relação à DQO_{total} , obtidos durante a operação do sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, com os reatores ABR e UASB, nos ensaios 1; 2 e 3.

Parâmetros	Ensaio						
		1	C.V.	2	C.V.	3	C.V.
Temperatura climatológica média (°C)		21,6		18,2		24,7	
TDH (h)	ABR	56		28		18	
	UASB	13		6,5		4	
COV (kg DQO_{total} (m ³ d) ⁻¹)	ABR	5,05	75	7,81	22	10,12	51
	UASB	2,83	120	9,63	64	8,60	52
DQO_{total} (mg L ⁻¹)	Afluente	11.640	75	9.198	22	7.557	51
	efl. ABR	1.480	120	2.569	64	1.454	52
	efl. UASB	458	57	1.207	63	731	67
$DQO_{dissolvida}$ (mg L ⁻¹)	Afluente	3.942	28	2.742	66	1.994	42
	efl. ABR	219	67	260	83	129	75
	efl. UASB	169	70	133	62	124	55
DQO_{SS} (mg L ⁻¹)	Afluente	7.698	116	6.456	21	5.564	72
	efl. ABR	1.261	132	2.308	68	1.325	58
	efl. UASB	289	57	1.074	67	675	73
SST (mg L ⁻¹)	Afluente	5.626	108	6.206	34	5.645	35
	efl. ABR	1.137	100	1.869	98	1.207	52
	efl. UASB	253	60	834	80	729	71
SSV (mg L ⁻¹)	Afluente	4.938	109	5.585	37	4.710	37
	efl. ABR	912	109	1.682	101	1.032	46
	efl. UASB	171	97	740	84	610	69

Esses valores de concentração de SST no afluente estão compreendidos nas faixas citadas por KALYUZHNYI & SKLYAR (2000), OLIVEIRA et al. (2000), OLIVEIRA et al. (1995) e SANTANA

& OLIVEIRA (2005), considerando-se águas residuárias provenientes de instalações de criação de suínos em confinamentos com uso intensivo de água para higienização, com a separação mecânica preliminar das frações sólidas e líquidas dos dejetos.

Nos efluentes dos reatores ABR e UASB, os valores médios de SST diminuíram para 1.137; 1.869 e 1.207 mg L⁻¹, e 253; 834 e 729 mg L⁻¹, respectivamente. Observa-se, na Tabela 2 e Figura 2, que as variações nas concentrações de sólidos suspensos do afluente refletiram-se ao longo do reator ABR e no reator UASB, mantendo os altos valores de coeficiente de variação das médias (C.V.) para as concentrações de SST nos efluentes (Tabela 2). Isso ocorreu em virtude de alterações pronunciadas na composição do afluente e dificuldades operacionais no preparo e na manutenção da homogeneidade durante o armazenamento diário das águas residuárias.

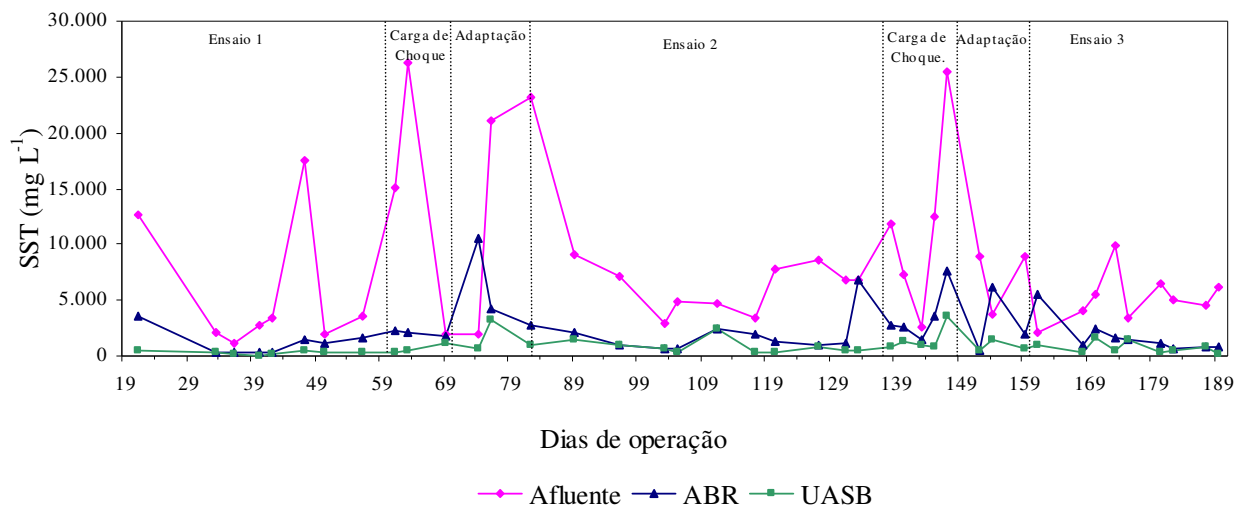


FIGURA 2. Concentração de sólidos suspensos totais (SST) obtida no afluente e efluentes dos reatores ABR e UASB, durante os ensaios 1; 2 e 3.

Os valores médios das concentrações de SSV no afluente do reator ABR no primeiro, segundo e terceiro ensaios corresponderam, respectivamente, a 87,8%; 90% e 83,4% dos valores de SST. Nos efluentes dos reatores ABR e UASB, os valores médios de SSV corresponderam, respectivamente, de 80,2 a 90% e de 67,6 a 88,7% dos valores médios de SST. Isso evidenciou a composição predominante de material orgânico dos sólidos suspensos também na água residuária tratada, indicando a presença de partículas de lodo composto por microrganismos ou mesmo sólidos suspensos do afluente estabilizados, os quais foram arrastados com o efluente.

Os valores de COV em que o reator ABR foi operado, de 5,05 a 10,12 kg DQO_{total} (m³ d)⁻¹ (Tabela 2), não foram limitantes para a obtenção de altas eficiências de remoção de DQO_{total}, DQO_{dissolvida} e DQO_{SS}, as quais variaram, na média, de 71,1 a 87,5%, de 84,7 a 94,8% e de 65,8 a 72,5%, respectivamente (Tabela 3).

No reator UASB, os valores médios de eficiência de remoção de DQO_{total} foram de 41,8%, 41,5% e 50,1% (Tabela 3) com COV aplicadas de 2,83; 9,63 e 8,60 kg DQO_{total} (m³ d)⁻¹ nos ensaios 1; 2 e 3, respectivamente (Tabela 3). Para DQO_{dissolvida}, as eficiências de remoção no segundo reator foram baixas, nos ensaios 1; 2 e 3, com valores de 24,7%; 43,9% e 18,4%, respectivamente, mas contribuíram para manter a eficiência de remoção média no sistema de 92,6% a 96,1% (Tabela 3).

Os valores médios de eficiência de remoção de DQO_{SS} para o reator ABR, de 70,8%; 65,8% e 72,5%, foram maiores do que para o reator UASB, de 58,4%; 41,0% e 55,4%, nos ensaios 1; 2 e 3, respectivamente (Tabela 3).

Embora no segundo reator tenham ocorrido menores remoções de matéria orgânica, houve contribuição para a elevação e a manutenção da estabilidade das eficiências de remoção do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios estudados (Figura 3). A contribuição do segundo reator deveu-se principalmente à acomodação de sobrecargas e à atenuação dos arrastes de lodo da manta do primeiro reator (OLIVEIRA, 2001).

Por meio da Tabela 3 e Figura 3, observa-se que as eficiências de remoção de DQO_{total} (86,8 a 94,9%), $DQO_{dissolvida}$ (92,6 a 96,1%) e DQO_{SS} (83,3 a 89,6%), no sistema de tratamento anaeróbio com os reatores ABR e UASB, mantiveram-se praticamente constantes ao longo do experimento, com CV de 2 a 15%.

TABELA 3. Valores médios e respectivos coeficientes de variação (C.V. em %) das eficiências de remoção de DQO, SST e SSV, da porcentagem de CH_4 no biogás, e das produções volumétrica e específica de CH_4 obtidos no primeiro reator (ABR), no segundo reator (UASB) e no sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, com os reatores ABR e UASB, durante a operação nos ensaios 1; 2 e 3.

Reator		Eficiência de remoção (%)					CH_4 (%)	Produção de CH_4			
		DQO		Sólidos Suspensos		Volumétrica*		Específica**			
		Total	Dissolvida	SS	Totais			Voláteis	Adicionada	Removida	
1	ABR	87,5	94,8	70,8	74,8	78,3	77,9	0,713	0,056	0,068	
	CV	11	3	42	23	20	42	65	66	80	
	UASB	41,8	24,7	58,4	68,2	73,6	79,4	0,158	0,032	0,053	
	CV	73	64	51	27	23	5	51	47	86	
	SISTEMA	94,9	96,1	88,8	95,6	95,6	-	0,871	0,099	0,078	
	CV	4	2	15	5	4		83	6	74	
	2	ABR	71,1	84,7	65,8	68,0	68,8	71,4	0,630	0,026	0,034
		CV	28	22	28	42	37	17	40	41	46
UASB		41,5	43,9	41	49,6	47,2	78,9	0,129	0,019	0,039	
CV		79	50	81	64	60	5	51	83	81	
SISTEMA		86,8	92,6	83,3	85,2	85,3	-	0,759	0,030	0,039	
CV		10	7	11	17	15		38	41	67	
3		ABR	79,1	94	72,5	77,0	75,5	72,6	0,755	0,036	0,062
		CV	14	22	21	20	21	5	110	71	111
	UASB	50,1	18,4	55,4	56,8	50,2	69,2	0,151	0,018	0,044	
	CV	37	117	40	47	39	3	49	57	90	
	SISTEMA	90,5	93,6	89,6	84,2	84,2	-	0,906	0,041	0,066	
	CV	5	4	5	16	17		119	95	113	

* ($m^3 CH_4 m^{-3} reator d^{-1}$); ** ($m^3 CH_4 kg^{-1} DQO_{total} adicionada$) e ($m^3 CH_4 kg^{-1} DQO_{total} removida$)

Observa-se, então, a vantagem de usar sistemas de tratamento anaeróbio em dois estágios, em relação ao sistema de único estágio, nos quais, com o segundo reator, diminuíram-se as variações de eficiência do primeiro reator (Figura 3), melhorando a qualidade do efluente final (Figuras 2 e 4) e proporcionando maior eficiência e melhor estabilização da matéria orgânica, conforme também foi observado por IAMAMOTO (1999), LEITE (1999), OLIVEIRA (2001), PEREIRA (2003) e SANTANA & OLIVEIRA (2005) (Figura 3).

Em termos de eficiência de remoção de DQO_{total} , $DQO_{dissolvida}$ e DQO_{SS} , os menores valores para o sistema de tratamento em dois estágios foram verificados no ensaio 2 (Tabela 3). A redução da eficiência ocorreu com as diminuições do TDH e conseqüente aumento da COV, porém ainda foi menor do que no ensaio 3. No entanto, neste trabalho, os aumentos das COV, nos ensaios, não atingiram valores que pudessem indicar limitações com relação a esse parâmetro para o sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, com os reatores ABR e UASB.

Assim, as variações ocorridas no ensaio 2 podem ser melhor explicadas pela diminuição do TDH, o que implicou o aumento da velocidade ascensional do líquido e conseqüente arraste de sólidos no sistema, coincidindo com a ocorrência do maior valor médio da concentração de SST do afluente (Tabela 2).

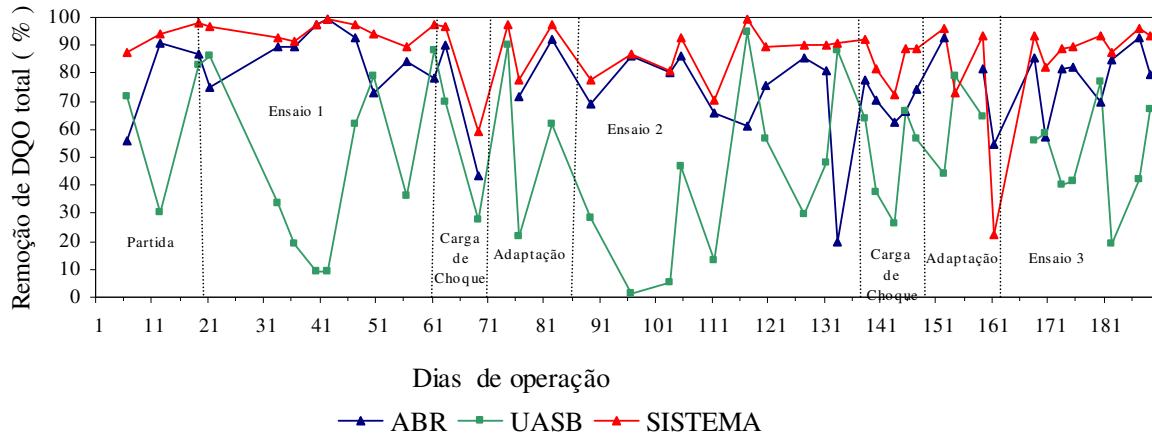


FIGURA 3. Eficiência de remoção de DQO_{total} , nos reatores ABR e UASB e no sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, durante os ensaios 1; 2 e 3.

Deve-se considerar também que a operação durante o ensaio 2 coincidiu com os meses de inverno (junho, julho e início de agosto), nos quais ocorreram temperaturas médias baixas (13,3 a 22,6 °C), as quais podem ter contribuído para a queda do desempenho do sistema.

No ensaio 3, embora com a redução do TDH para 18 e 4 h nos reatores ABR e UASB, respectivamente, houve aumento das eficiências de remoção de DQO_{total} , $DQO_{dissolvida}$ e DQO_{SS} em relação ao ensaio 2. Deve-se considerar que, no ensaio 3, a temperatura média foi de 24,7 °C e, no ensaio 2, de 18,2 °C (Tabela 2), o que pode ter contribuído para atenuar os efeitos da diminuição do TDH e conseqüente aumento da COV.

O melhor desempenho para o sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, em termos de eficiência de remoção de DQO_{total} , ocorreu durante o ensaio 1 com o maior tempo de contato do substrato com a população de microrganismos envolvidos no metabolismo anaeróbio. No ensaio 1, o tempo de retenção de sólidos (TRS) total foi de 66,7 dias para o sistema de tratamento.

Para a remoção da $DQO_{dissolvida}$, a redução da eficiência com a diminuição do TDH no sistema de tratamento foi menor do que para a DQO_{total} , em virtude de o aumento da velocidade ascensional nos reatores anaeróbios poder ter contribuído para melhorar as condições de transferência de massa para a absorção da fração dissolvida da matéria orgânica pelos microrganismos.

Para a remoção da DQO_{SS} no sistema de tratamento, nos ensaios 1 e 3, os resultados foram similares, de 88,8% e 89,6% , respectivamente (Tabela 3).

Nos três ensaios, o afluente apresentou variação para os valores de DQO_{total} , de 4.173 a 28.025 mg L⁻¹ no ensaio 1, de 6.430 a 12.870 mg L⁻¹ no ensaio 2, e de 4.613 a 16.170 mg L⁻¹ no ensaio 3. Os valores mais altos, de 21.800 mg L⁻¹ e 28.025 mg L⁻¹, ocorreram aos 21 e 47 dias de operação no ensaio 1 (Figura 4), provocando as maiores sobrecargas orgânicas acidentais no reator ABR e, portanto, no sistema de tratamento. Isso ocorreu em virtude dos fatores já descritos anteriormente. No entanto, a estabilidade dos valores das eficiências de remoção (Figura 3) e de DQO_{total} do efluente nesses períodos (Figura 4) indicou a capacidade do reator ABR e principalmente do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios de acomodar essas variações bruscas e acidentais da DQO.

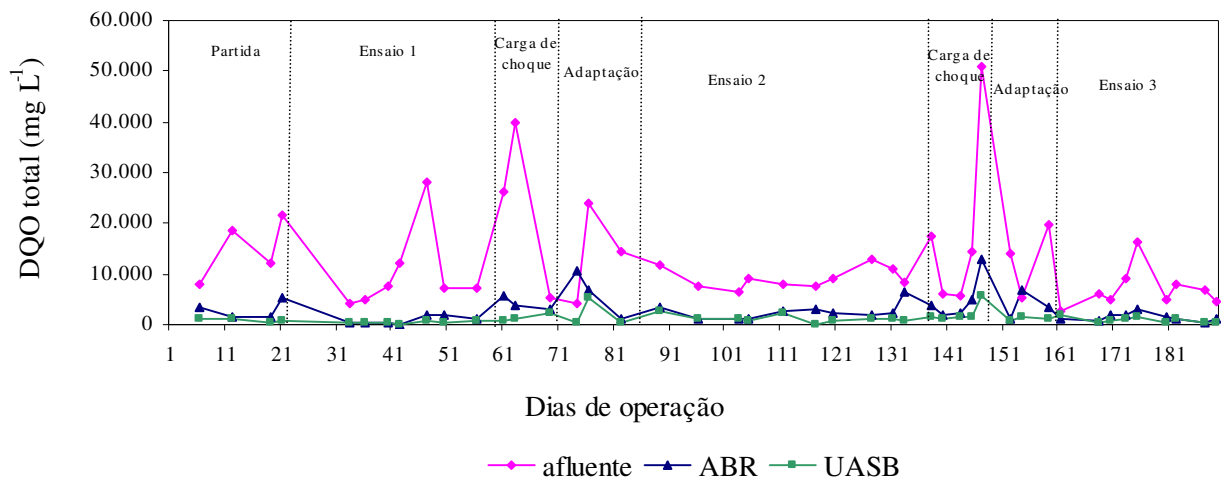


FIGURA 4. Valores de DQO_{total} do afluente e efluentes dos reatores ABR e UASB, durante os ensaios 1; 2 e 3.

Para confirmar a capacidade de acomodação dessas sobrecargas orgânicas no sistema de tratamento, foram estudados dois períodos com aplicação de choques de cargas orgânicas no decorrer do experimento; o primeiro entre os 61 e os 69 dias (com TDH de 56 h no reator ABR), no qual os valores de DQO_{total} do afluente foram de 26.300 $mg L^{-1}$, 39.967 $mg L^{-1}$ e de 5.347 $mg L^{-1}$, e o segundo entre os 138 e 147 dias (com TDH de 28 h no reator ABR), com valores de DQO_{total} do afluente de 17.573 $mg L^{-1}$, 6.156 $mg L^{-1}$, 5.785 $mg L^{-1}$, 14.560 $mg L^{-1}$, 50.893 $mg L^{-1}$ (Figura 4).

No primeiro período, com valor médio de DQO_{total} de 23.871 $mg L^{-1}$, as eficiências de remoção de DQO_{total} variaram de 44 a 90% no reator ABR e de 59 a 97% no sistema de tratamento (Figura 3). No segundo período, com valor médio de DQO_{total} de 18.985 $mg L^{-1}$, as eficiências de remoção de DQO_{total} variaram de 63 a 78% no reator ABR e de 73 a 92% no sistema (Figura 3).

Observando-se esses valores de eficiência de remoção de DQO_{total} , verificou-se que houve capacidade do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios de suportar altas cargas orgânicas contínuas ou variáveis, como foram observadas neste experimento. Nos dois períodos estudados, sob condição de choque de carga orgânica, obteve-se na média, para o sistema, 85% de eficiência de remoção de DQO_{total} .

NACHAIYASIT & STUCKEY (1997) também operaram reator ABR (com volume de 10 L) sob condições de choque de carga orgânica, aumentando a concentração de DQO_{total} de 4.000 $mg L^{-1}$ para 15.000 $mg L^{-1}$, aplicando COV de 18 $kg DQO_{total} (m^3 d)^{-1}$ e TDH de 20 h, e verificaram 90% de eficiência de remoção de DQO. Neste trabalho, com maiores concentrações de DQO_{total} do afluente e com TDH de 56 h e 28 h, ocorreram eficiências de remoção de DQO_{total} pouco inferiores.

As eficiências médias de remoção de SST e SSV, no sistema de tratamento em dois estágios, com os reatores ABR e UASB, foram altas nos ensaios 1; 2 e 3, com valores médios de 95,6 e 85,2 e 84,2%, respectivamente (Tabela 3). Além disso, os valores de eficiência de remoção de SST não tiveram variações pronunciadas ao longo dos ensaios, com C.V. de 4 a 17% (Tabela 3).

Para confirmar a capacidade do sistema de tratamento em acomodar sobrecargas de sólidos suspensos, já observadas durante o primeiro ensaio, e de ocorrência bastante comum em condições de escala real, foram aplicados choques de carga de sólidos suspensos nas quais as concentrações médias de SST do afluente foram aumentadas de 5.626 $mg L^{-1}$ para valores de até 15.000 $mg L^{-1}$ e 26.330 $mg L^{-1}$ (aos 61 e 63 dias de operação), e de 6.206 $mg L^{-1}$ para valores de até 25.510 $mg L^{-1}$ (aos

147 dias de operação) (Figura 2). No primeiro e segundo períodos de aplicação de choques de carga de sólidos suspensos, as eficiências médias de remoção de SST (Figura 5) foram, respectivamente, de 61,2% e 66,4% para o reator ABR, e de 66,7% e 55,6% para o reator UASB. Para o sistema de tratamento com os reatores ABR e UASB, os valores médios de eficiência de remoção de SST foram, respectivamente, de 77,5%, variando de 36 a 98%, e de 83,6%, com variações de 63 a 94% (Figura 5).

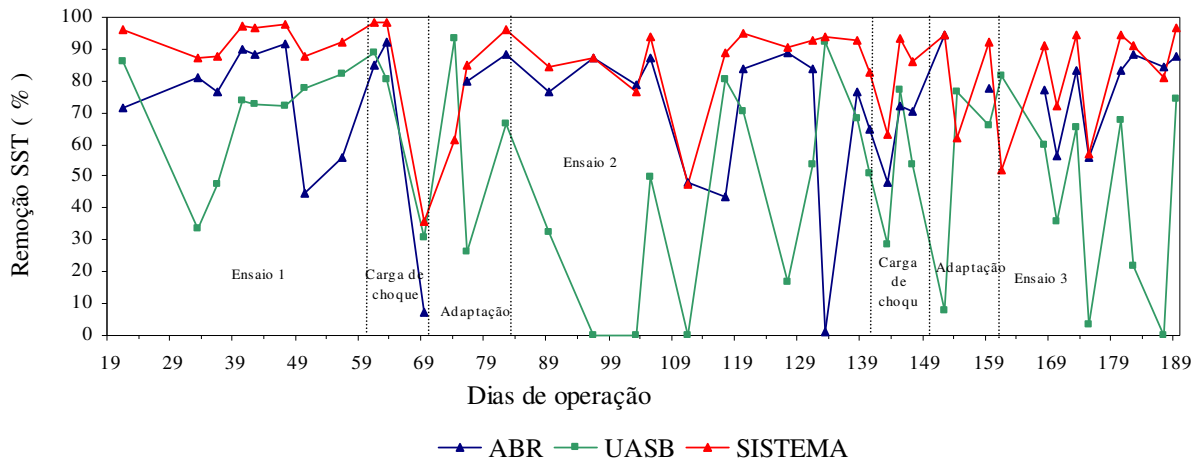


FIGURA 5. Eficiência de remoção de SST nos reatores ABR e UASB e no sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, nos ensaios 1; 2 e 3.

Observou-se, portanto, que a eficiência de remoção de sólidos suspensos do sistema de tratamento com os reatores ABR e UASB manteve-se com pequenas variações durante os ensaios do experimento (Figura 5), evidenciando a vantagem de usar o processo anaeróbio em dois estágios para o tratamento de águas residuárias de suinocultura com altas concentrações de sólidos suspensos totais, os quais comprometem a retenção da biomassa necessária em sistemas de alta taxa (LETTINGA & HULSHOFF-POL, 1991).

PEREIRA (2003) operou sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, com dois reatores UASB de bancada com volumes de 39,8 e 10,5 L, alimentados com águas residuárias de suinocultura com concentrações de SST em torno de 5.000 mg L^{-1} , com TDH de 62 h a 16 h, no primeiro reator, e de 16 h a 4 h, no segundo reator. O autor obteve eficiências médias de remoção de $\text{DQO}_{\text{total}}$ e SST no sistema de tratamento de 79 a 95% e de 73 a 94%, respectivamente.

Em estudo mais recente, SANTANA & OLIVEIRA (2005) avaliaram o desempenho de dois reatores UASB em escala-piloto, com volumes de 908 e 188 L, com TDH de 62,3 e 31,1 h, no primeiro reator, e de 12,9 e 6,5 h, no segundo reator, e COV na faixa de 3,40 a $14,44 \text{ kg DQO}_{\text{total}} (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$, no primeiro reator, e de 2,25 a $18,70 \text{ kg DQO}_{\text{total}} (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$, no segundo reator, com concentrações médias de SST de 2.216 mg L^{-1} a 7.131 mg L^{-1} , obtendo eficiências de remoção de $\text{DQO}_{\text{total}}$ e SST que variaram de 86 a 93% e de 87 a 88%, respectivamente.

Os resultados obtidos por PEREIRA (2003) e SANTANA & OLIVEIRA (2005) foram semelhantes aos deste estudo, no qual se verificaram eficiências médias de remoção de $\text{DQO}_{\text{total}}$ e SST no sistema de tratamento de 87 a 95% e de 84 a 96%, respectivamente.

Os teores médios de CH_4 no biogás, nos reatores ABR e UASB, permaneceram acima de 70% (Tabela 3), demonstrando estabilidade nos reatores com relação à qualidade do biogás produzido frente as alterações operacionais impostas.

Os valores médios das produções volumétricas de metano aumentaram de 0,630 a 0,755 m³ CH₄ m⁻³ reator d⁻¹, no reator ABR, e de 0,129 a 0,151 m³ CH₄ m⁻³ reator d⁻¹, no reator UASB, com a diminuição do TDH e conseqüente aumento da COV, nos ensaios 2 e 3.

Os maiores valores médios de produção específica de metano ocorreram no ensaio 1 - de 0,068 m³ CH₄ kg⁻¹ DQO_{total} removida, no reator ABR, e de 0,053 m³ CH₄ kg⁻¹ DQO removida, no reator UASB (Tabela 3), com os menores valores de COV de 5,05 e 2,84 kg DQO_{total} (m³ d)⁻¹ para os reatores ABR e UASB, respectivamente. Os menores valores de 0,034 e 0,039 m³ CH₄ kg⁻¹ DQO removida, respectivamente, nos reatores ABR e UASB, foram observados no ensaio 2, o que pode ser atribuído à ocorrência de temperaturas baixas (Tabelas 2 e 3).

Deve-se ressaltar que, em virtude da ausência de um dispositivo separador de fases apropriado para a coleta de gás no reator ABR, ocorreram perdas de biogás na canaleta de saída do reator e dissolvido no efluente. Conseqüentemente, as produções obtidas foram subavaliadas.

Na Tabela 4, estão apresentados os valores médios de pH, da alcalinidade total (AT) e da concentração e ácidos voláteis totais (AVT) no decorrer do experimento, nos reatores ABR e UASB. Esses valores também refletiram as condições de estabilidade do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios.

TABELA 4. Valores médios e os respectivos coeficientes de variação (C.V.) do pH, da alcalinidade total (AT) e da concentração de ácidos voláteis totais (AVT) do afluente e efluentes dos reatores ABR e UASB, durante os ensaios 1; 2 e 3.

Ensaio	TDH (h)		pH			AT (mg CaCO ₃ L ⁻¹)			AVT (mg CH ₃ COOH L ⁻¹)			
			afluente		efluente		afluente		efluente		afluente	
	ABR	UASB		ABR	UASB		ABR	UASB		ABR	UASB	
1	56	13,0	6,3	8,0	8,1	1.010	1.020	959	1.108	104	79	
2	28	6,5	5,9	6,9	6,9	681	830	837	856	170	149	
3	18	4,0	6,6	7,2	7,2	886	1.036	1.072	735	107	117	
			13,0	7,0	7,0	47	30	25	21	40	20	
		C.V.(%)	9,0	7,0	3,0	29	23	22	35	36	35	
			4,0	3,0	3,0	30	24	22	34	32	34	

Observou-se que os valores de pH, em todas as fases de operação, sofreram variações crescentes a partir da entrada do afluente até a saída do sistema de tratamento. Os microrganismos metanogênicos têm crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4, embora seja possível obter estabilidade na formação de metano numa faixa mais ampla, entre 6,0 e 8,0 (CHERNICHARO, 1997).

Os valores médios de AT no afluente variaram de 681 a 1.010 mg L⁻¹, aumentando, nos efluentes dos reatores ABR, para 830 a 1.036 mg L⁻¹, e UASB para 837 a 1.072 mg L⁻¹. Com a diminuição do TDH de 56 para 28 h, observou-se decréscimo nos valores médios de AT, nos efluentes dos reatores ABR e UASB, e acréscimo com aplicação do TDH de 16 h.

CHERNICHARO (1997) ressaltou o pH, a alcalinidade e a concentração de AVT como parâmetros intimamente relacionados e de igual importância para o controle e a operação adequada de reatores anaeróbios.

Verificou-se que, em todos os ensaios, houve diminuição significativa no valor da concentração de AVT do afluente ao longo do sistema de tratamento com os reatores ABR e UASB (Tabela 4 e Figura 6). Pôde-se observar que houve efeito do aumento de alcalinidade nos reatores com o conseqüente tamponamento do sistema, não permitindo o acúmulo de ácidos voláteis e queda do pH.

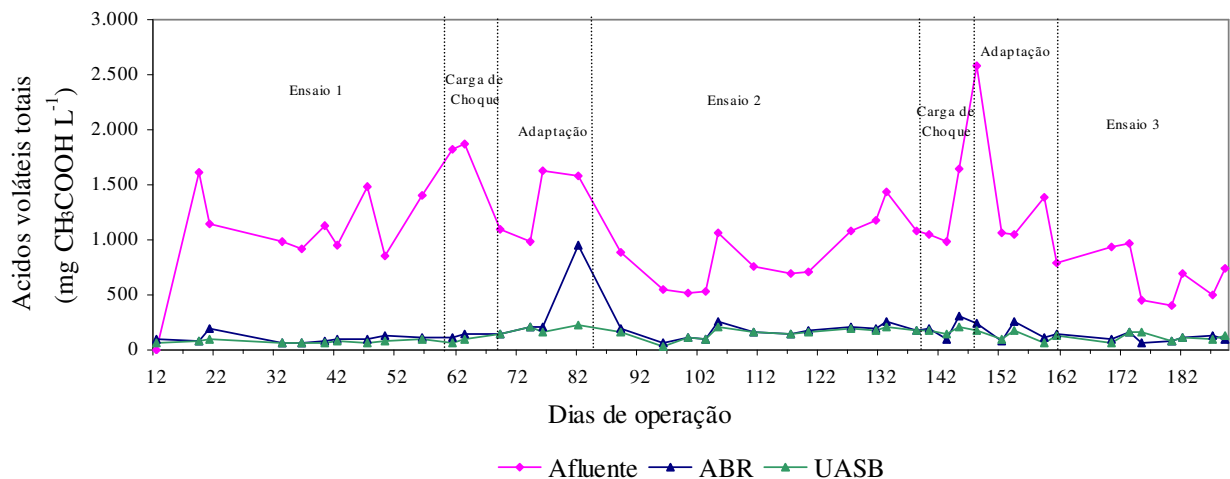


FIGURA 6. Concentração de ácidos voláteis (AVT) no afluente e nos efluentes dos reatores ABR e UASB do sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, durante os ensaios 1; 2 e 3.

As diminuições dos valores de pH e AT e o aumento de AVT no efluente do sistema de tratamento com os reatores ABR e UASB, no ensaio 2, podem ser atribuídas às baixas temperaturas (de 13,3 a 22,6 °C), as quais podem ter afetado o consumo de acetato e H₂ e CO₂ pelas arqueias metanogênicas.

Contudo, os valores de AVT nos reatores ABR e UASB mantiveram-se abaixo do valor máximo recomendado por LETTINGA & HULSHOFF-POL (1991) de 200 mg L⁻¹, o que confirmou as condições de estabilidade do processo para as remoções de DQO e sólidos e produção de metano.

Nos dois períodos de aplicação de choques de carga orgânica, com concentrações médias de AVT no afluente de 1.598 e 1.187 mg L⁻¹ (Figura 6), no reator ABR, verificaram-se condições de equilíbrio, com valores médios de AVT de 136 e 194 mg L⁻¹ no efluente, respectivamente. Segundo NOUR (1996), choque de carga orgânica, situação de aumento repentino na concentração dos compostos orgânicos no afluente, é exemplo de ocorrência muito comum em qualquer sistema de tratamento de águas residuárias. Esse choque de carga pode ser absorvido sem grandes problemas para a eficiência do reator quando o sistema apresenta estabilidade frente às variações de pH, ou melhor, o processo apresenta um sistema de tamponamento adequado, como foi observado neste estudo.

CONCLUSÕES

O sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, foi eficiente na remoção de DQO e sólidos suspensos, possibilitando, nas condições operacionais impostas, alcançar valores médios acima de 86% e 84%, respectivamente.

O sistema de tratamento anaeróbio, composto de reatores ABR e UASB, com TDH de 22 h, foi predominantemente mais eficiente na remoção de DQO (90,5%) e sólidos suspensos (84,2%) do que o reator ABR em um estágio com TDH de 28 h ou 56 h.

O efeito da redução da temperatura média, para valores próximos ou inferiores a 20 °C, com TDH de 34,5 h no sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios, foi acentuado, provocando diminuição da eficiência de remoção de DQO e sólidos suspensos para valores inferiores aos obtidos com TDH de 22 h.

O reator ABR acomodou as cargas orgânicas de choque, mantendo as eficiências de remoção de DQO e sólidos suspensos (em torno de 70%) e a qualidade do biogás (em torno de 80% de CH₄).

REFERÊNCIAS

- APHA/AWWA/WPCF. *Standart methods for the examination of water and wasterwater*. 15th ed. Washington, 1992. 1.268 p.
- BOOPATHY, R. Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactor. *Bioresource Technology*, Kidlington, v.64, n.1, p.1-6, 1998.
- CHERNICHARO, C.A.L. de. *Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Belo Horizonte: Polyécnica, 1997. 246 p.
- DILALLO, R.; ALBERTSON, O.E. Volatile acids by direct titration journal. *Journal Water Pollution Control Federation*, Alexandria, v.33, n.4, p.356-65, 1961.
- HAANDEL, A.C. Van; LETTINGA, G. *Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate*. Chichester: John Wiley, 1994. 226 p.
- IAMAMOTO, C.Y. *Efeito da taxa de carregamento orgânico no desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo tratando águas residuárias de suinocultura*. 1999. 104 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Integrada de Recursos) - Centro de Estudos Ambientais, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.
- KALYUZHNYI, S.; SKLYAR, V. Integrated mechanical, biological and physic-chemical treatment of liquid manure streams. *Water Science and Technology*, Kidlington, v.41, n.12, p.182-8, 2000.
- LEITE, M.A.S.da. *Desempenho e características do lodo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) tratando águas residuárias de suinocultura*. 1999. 225 f. Monografia (Trabalho de Graduação) - Faculdade de Ciências Agrária e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1999.
- LETTINGA, G.; HULSHOFF-POL, L.W. UASB: process design for various types of wastewaters. *Water Science and Technology*, Kidlington, v.24, n.8, p.87-107, 1991.
- LIER, J.B. Van; TILCHE, A.; AHRING, B.K.; MACARIE, R.; DOHANYOS, M.; HULSHOFF-POL, L.W.; LENS, P.; VERSTRAETE, W. New perspectives in anaerobic digestion. *Water Science Technology*, Kidlington, v.43, n.1, p.1-18, 2001.
- NACHAIYASIT, S.; STUCKEY, D. C. The effect of shock loads on the performance of an anaerobic baffled reactor (ABR). 1. Step changes in feed concentration at constant retention time. *Water Research*, Oxford, v.31, n.11, p. 2737-46, 1997.
- NOUR, E.A.A. *Tratamento de esgoto sanitário empregando-se reator anaeróbio compartimentado*. 1996. 148 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.
- OLIVEIRA, P.A.V.; COSTA, R.H.R.; TROGLIO, J. Lagoons for treatment of waste products from hogs: example of Coopercentral. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND WORKSHOP ON WATE STABILIZATION PONDS TECHNOLOGY AND APPLICATIONS, 3., 1995, João Pessoa. *Anais ...* João Pessoa: IAWQ, 1995. 6 p.
- OLIVEIRA, R.A.de. *Efeito da concentração de sólidos suspensos do afluente no desempenho e características do lodo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo tratando águas residuárias de suinocultura*. 1997. 359 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- OLIVEIRA, R.A.de. *Efeito da carga hidráulica volumétrica, da temperatura climatológica e do descarte do excesso de lodo da manta no desempenho de reatores UASB tratando águas residuárias de suinocultura*. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 2001. 125 p. Relatório final de pesquisa CPA/UNESP.

OLIVEIRA, R.A.; CAMPELO, P.G.; MATOS, A.T.; MARTINEZ, M.A.; CECON, P.R. Influência da aplicação de águas residuárias de suinocultura na capacidade de infiltração de um solo Podzólico Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.2, p.263-7, 2000.

PEREIRA, E.R. *Desempenho e caracterização microbiana do processo de dois estágios com reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) tratando águas residuárias de suinocultura*. 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SANTANA, A.M. de; OLIVEIRA, R.A. de. Desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.25, n.3, p.817-30, set/dez. 2005.

SEGHEZZO, L.; ZEEMAN, G.; LIER, J.B. VAN; HAMELERS, H.V.M.; LETTINGA, G. A review: the anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *Biorresource Technology*, Kidlington, v.65, n.1, p.175-90, 1998.