



DESEMPENHO DE REATORES UASB TERMOFÍLICOS EM SÉRIE PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE VINHAÇA

PERFORMANCE OF THERMOPHILIC UASB REACTORS IN SERIES FOR BIOGAS PRODUCTION FROM VINASSE

Valciney Gomes de Barros⁽¹⁾

Rose Maria Duda⁽²⁾

Roberto Alves de Oliveira⁽³⁾

Resumo

Neste trabalho avaliou-se o desempenho de dois reatores UASB em série (R1 e R2) termofílicos, com a utilização de vinhaça de cana-de-açúcar e torta de filtro. Os reatores foram operados por 240 dias, com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 24 h no R1 e de 12 h no R2. As cargas orgânicas volumétricas (COV) aplicadas foram crescentes de 6,5 a 28,8 g DQOtotal (L d)⁻¹. A utilização da vinhaça com a torta-de-filtro contribuiu para o ajuste dos macronutrientes N e P recomendados para a digestão anaeróbia. As maiores eficiências de remoção de DQOtotal alcançadas foram de 71%, no sistema em série (R1+R2). Foi obtido produção volumétrica de metano de até 4,2 L CH₄ (L d)⁻¹ no R1 e de 1,7 m³ CH₄ (m³ d)⁻¹ no R2. As maiores percentagens de metano no biogás foram de 71% no R1 e de 83% no R2, com COV de 27,8 g DQOtotal (L d)⁻¹ no R1. A utilização dos reatores em série R1 e R2 contribuiu para o aumento na produção de metano e aumento da remoção de DQOtotal. A recirculação do efluente permitiu a correção do pH do afluente sem a adição de alcalinizantes.

Palavras-chave: Carga orgânica volumétrica. Digestão anaeróbia. Metano. Vinhaça de cana-de-açúcar.

Abstract

This study evaluated the performance of two UASB reactors in series (R1 and R2) under thermophilic conditions, with the use of vinasse sugarcane and filter cake. The reactors were operated for 240 days, with hydraulic retention time (HRT) of 1.0 d in R1 and 0.5 d. in R2. The organic load rate (OLR) applied were increased from 6.5 up to 28.8 g totalCOD (L d)⁻¹. The use of vinasse with filter cake contributed to the adjustment of the macronutrients N and P recommended for anaerobic digestion. The best total COD removal efficiencies were 71%, in the system in series (R1+ R2). The volumetric methane production increased with increasing OLR, reaching values of 4.2 L CH₄ (L d)⁻¹ in R1 and 1.7 L CH₄ (L d)⁻¹ in R2. The highest methane in the biogas percentages were 71% in R1 and 83% in R2, with OLR of 27.8 g totalCOD (L d)⁻¹ in R1. The use of UASB reactors in series R1 and R2 contributed to increasing in methane production and increase the total COD removal. The recirculation of the effluent allowed the pH correction of the influent without added alkalinising.

Keywords: Anaerobic digestion. Methane. Organic load rate. Sugarcane vinasse.

1 Introdução

¹Mestre em Microbiologia Agropecuária, UNESP - Jaboticabal - Departamento de Engenharia Rural. E-mail: valcineygb@yahoo.com.br

²Doutora. Docente da Fatec-Jaboticabal. E-mail: roseduda@zipmail.com.br

³Doutor. Docente da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP – Jaboticabal.



A maioria das indústrias sucroenergéticas no Brasil produzem açúcar, bioetanol e eletricidade (DIAS et al., 2014). O Brasil obteve, na safra de 2014/2015, 632 mil toneladas de cana-de-açúcar e produziu cerca de 35.548 mil toneladas de açúcar e 28,4 bilhões de litros de bioetanol (UNICA 2016). Atualmente, o setor sucroenergético tem enfrentado barreiras políticas e econômicas, pois as políticas adotadas para os combustíveis no país eliminaram a competitividade do etanol e impediram o desenvolvimento e expansão do setor sucroenergético (UNICA, 2014).

Durante o processo de produção de açúcar e bioetanol grandes quantidades de resíduos são geradas. Uma forma para melhorar o desenvolvimento desse setor pode ser o melhor aproveitamento desses resíduos. Fuess & Garcia (2014), em uma análise global sobre o potencial da digestão anaeróbia na recuperação de energia na indústria sucroenergética, descreveram que é possível recuperar de 3,5% a 10% da energia utilizando a digestão anaeróbia. Os autores afirmam que, considerando-se os aspectos financeiros, as economias anuais podem chegar até US\$ 30 milhões com a implantação da tecnologia da digestão anaeróbia em destilarias com produção de 365.000 m³ de etanol por ano.

O processo de produção de açúcar gera grandes quantidades de torta de filtro, estima-se que para cada tonelada de cana processada são produzidos 33 kg de torta de filtro (MAKUL; SUA-IAM, 2016). A torta de filtro possui característica esponjosa, coloração escura, forte odor e alto teor de umidade, é considerado o principal resíduo sólido da produção de açúcar, rica em nutrientes e possui concentração de fósforo e nitrogênio de 0,6% e 1,72% dos sólidos totais, respectivamente (JANKE et al., 2016).

No processo de produção do bioetanol são geradas grandes quantidades de vinhaça, para cada litro de etanol produzido da cana-de-açúcar são gerados aproximadamente 10-15 L de vinhaça. Este resíduo apresenta séria preocupação ambiental por causa de seus problemas de poluição (WILKIE; RIEDESEL; OWENS, 2000). No Brasil, a vinhaça é utilizada principalmente na fertirrigação, em virtude da presença de matéria orgânica e nutrientes. Porém, a aplicação de vinhaça de forma indiscriminada no solo pode contaminar as águas superficiais e subterrâneas (SATYAWALI; BALAKRISHNAN, 2007)

Alternativamente, a digestão anaeróbia da vinhaça pode ser utilizada para o aumento na produção de energia e contribuição na questão da sustentabilidade nas indústrias sucroenergéticas, através da estabilização da matéria orgânica e a produção do gás metano, que pode ser utilizado para a produção de energia (FUESS; GARCIA, 2014; KAPARAJU; SERRANO; ANGELIDAKI, 2010). Na digestão anaeróbia a disponibilidade de nutrientes é um fator importante para o crescimento microbiano (ALPHENAAR et al., 1993). O fósforo e



o nitrogênio estão entre nutrientes necessários para a estimulação nutricional dos microrganismos metanogênicos, pois a deficiência de fósforo reduz a atividade desses microrganismos (ALPHENAAR et al., 1993).

Os valores de fósforos e nitrogênio recomendados para a digestão anaeróbia estão relacionados com a concentração da matéria orgânica do substrato. Geralmente, a vinhaça de cana-de-açúcar não atende as quantidades necessárias de fósforo e nitrogênio adequados para atender a digestão anaeróbia. Portanto existe a necessidade de suplementação desses nutrientes e a torta-de-filtro é uma alternativa interessante. Deve-se ressaltar que na digestão anaeróbia da vinhaça grande parte dos nutrientes permanecem no efluente, os nutrientes presentes na vinhaça e aqueles obtidos a partir dos suplementos no tratamento anaeróbio pode ser reciclado através da utilização do efluente na fertirrigação e do lodo na fertilização da cana-de-açúcar (BARROS; DUDA; OLIVEIRA, 2016).

Nos últimos anos, têm sido destacados vários trabalhos utilizando vários tipos de vinhaça como substrato de reatores UASB. Segundo Ferraz Jr et al. (2016) o trabalho de Souza et al. (1992) representa a única referência de digestão anaeróbia direcionada a vinhaça de cana-de-açúcar no Brasil. Souza et al. (1992) avaliaram o desempenho de um reator UASB, em escala piloto, utilizando lodo granulado como inóculo no tratamento da vinhaça de cana-de-açúcar, o reator UASB foi operado sob condições termofílicas com COV aplicadas de 25 a 30 g DQO (L d)⁻¹, as maiores eficiências de remoção de DQO alcançadas foram de 72%. Van Haandel et al. (2014) avaliaram a conversão anaeróbia da vinhaça proveniente do processo de destilação da cachaça em quatro reatores UASB sob condições mesofílicas e termofílicas, alcançando condições de estabilidade com COV entre 40 e 50 g DQO (Ld)⁻¹. España-Gamboa et al. (2012) avaliaram a COV ideal para a operação do reator UASB modificado tratando vinhaça da produção de etanol de melaço, os autores relataram que a COV considerada ideal foi a COV de 17,1 g DQOtotal (L d)⁻¹, com produção específica de metano de 0,263 L CH₄ (g DQO removida)⁻¹ e concentração de metano no biogás de 84%.

Estudos recentes têm reportado a utilização de sistema único para a produção de metano a partir da vinhaça (ESPAÑA-GAMBOA et al., 2012; FERRAZ JR et al., 2016; VAN HAANDEL et al., 2014) e Sistemas combinados para produção de hidrogênio no primeiro estágio (acidogênico) e metano e metano no segundo estágio (metanogênico) (FENG et al., 2015; FERRAZ JR et al., 2016; NASR et al., 2012).

Ferraz Jr et al. (2016) destacou a utilização de sistema de dois estágios, composto por reator acidogênico de leito fixo seguido de reator metanogênico de manta de lodo (APBR-UASB II), o sistema de dois estágio (APBR-UASB II) removeu até 74,6% da DQOtotal,



Sistemas compostos de dois estágio acidogênico-metanogênico visando a recuperação de energia têm reportado a contribuição de hidrogênio no rendimento energético total de 11% (LUO et al., 2011), 18,5% (NASR et al., 2012). Ferraz Júnior et al. (2016b) destacou que a produção de hidrogênio não é competitiva em relação a produção de metano.

A utilização de sistemas compostos de dois reatores anaeróbios metanogênicos em série (UASB R1 e R2) pode trazer resultados interessantes para a tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar proveniente da destilação do etanol hidratado. Portanto, Neste trabalho avaliou-se o desempenho de dois reatores anaeróbios em série (UASB R1 e R2) utilizando vinhaça de cana-de-açúcar com torta de filtro, com potencial para melhorar o rendimento energético das indústrias sucroenergéticas através da produção de metano e melhorar a qualidade do efluente para a fertirrigação.

2 Material e Métodos

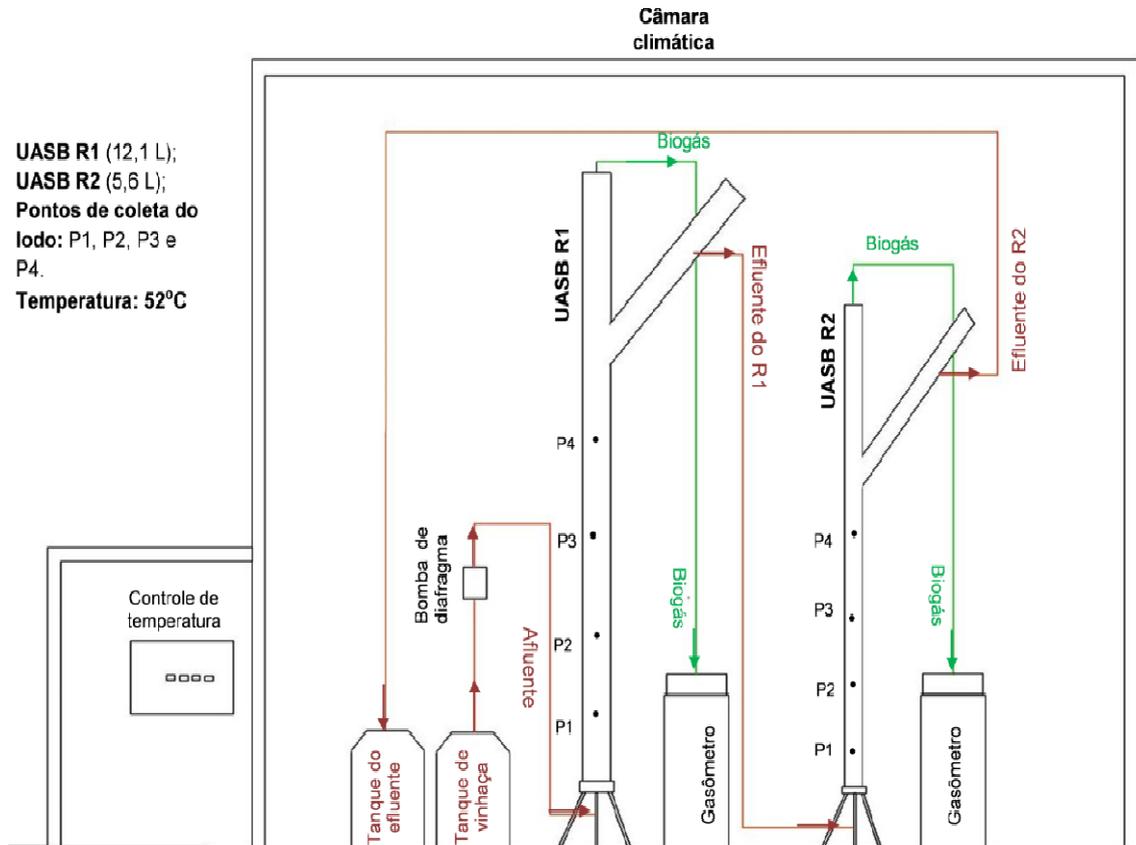
Instalações experimentais

A unidade experimental foi composta por dois reatores UASB em série, R1 e R2, operados na faixa de temperatura termofílica 55°C, com volumes de 12,1 (R1) e 5,6 L (R2), tanques para armazenagem do afluente e do efluente, bomba de diafragma, e gasômetros, conforme ilustrado na Figura 1.

Lodo de inóculo e afluente utilizado

Para a inóculo dos reatores UASB (R1 e R2) foi utilizado lodo granulado de uma usina sucroenergética da região de Ribeirão Preto, coletado em um sistema de tratamento anaeróbio da vinhaça utilizando reator UASB sob condições termofílicas, adaptado a COV de 5,0 g DQOtotal (L d)⁻¹, com concentrações de sólidos totais (ST) de 41,1 g L⁻¹ e de sólidos voláteis (SV) e 20,4 g L⁻¹. A quantidade de lodo utilizado corresponde a 30% do volume de cada reator.

Figura 1- Representação esquemática do sistema de tratamento com os reatores UASB em série (R1 e R2) em condições termofílicas.



Condições de operacionais dos reatores

Os reatores foram operados por 240 dias. As cargas orgânicas volumétricas (COV) aplicadas foram crescentes de 6,5 a 28,8 g DQOtotal (L d)⁻¹ (Figura 2). Os reatores UASB foram operados com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 24 h no R1 e de 12 h no R2. Para correção do pH da vinhaça e aproveitamento da alcalinidade gerada nos reatores foi utilizado a recirculação do efluente. Para atender as necessidades de nutrientes da digestão anaeróbia da vinhaça foi realizada a utilização da torta de filtro como fonte de fósforo e nitrogênio, e de outros nutrientes.

Tabela 1- Condições de operação dos reatores em série UASB R1 e UASB R2

Parâmetros	COV g DQOtotal (L d) ⁻¹				TDH	Correção do PH
	5,9	9,8	18,1	27,8		
					24 h(R1) e 12 h(R2)	Recirculação do efluente
Período de operação (dias)	1 a 60	60 a 120	20 a 180	180 a 240	1 a 240	1 a 240

Vinhaça de cana de açúcar com torta de filtro

O afluente utilizado para a alimentação do sistema de tratamento anaeróbio termofílico foi vinhaça de cana-de-açúcar in natura, proveniente da destilação do etanol hidratado, com a torta de filtro, coletada em indústrias sucroenergéticas da região de Ribeirão Preto.

A quantidade utilizada de torta de filtro por litro de vinhaça foi de 40 g. Para estabelecer este critério foi utilizado como base a relação de fósforo e nitrogênio recomendada ao processo de digestão anaeróbia (DQO: N: P. = 350 : 5 : 1) (Chernicharo, 2007). A DQO da vinhaça utilizada foi de 45.000 mg L⁻¹, para atender as necessidades de N e P da digestão anaeróbia da vinhaça são necessários 643 mg de N e 129 mg de P para cada litro de vinhaça (Tabela 2).

Tabela 2. Quantidades de Nitrogênio (N) e fósforo (P) presentes na vinhaça in natura, e na vinhaça com a torta de filtro..

Parâmetros	Vinhaça (<i>in natura</i>)	Vinhaça
		+ 40 g deTorta de filtro (solução 2)
N	470 (g L ⁻¹)	685 (g L ⁻¹)
P	62 (g L ⁻¹)	136 (g L ⁻¹)
DQO:N:P	350:3,6:0,48	350:5,3:1,1

Exames e determinações no afluente e efluente e produção de biogás

Os parâmetros analisados incluem pH, alcalinidade total, parcial e intermediária (AT, AP e AI), ácidos voláteis totais (AVT), demanda química de oxigênio total (DQO total), sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), nitrogênio total Kjeldahl (N_{TK}) e fósforo total (P_{total}). As amostras de afluentes e efluentes dos reatores foram coletadas duas vezes por semana para exames de pH, AT, AP, AI, DQO total, AVT e os exames foram determinados de acordo com metodologias descritas por Apha (2005) e Dilallo and Albertson (1961). As amostras de N_{TK} e P_{total} foram coletadas semanalmente, e as amostras de ST e SV foram coletadas mensalmente, os exames foram determinadas conforme metodologias descritas por Apha (2005). A produção de biogás foi medida diariamente utilizando gasômetros (OLIVEIRA, 1997) e sua composição determinada semanalmente por cromatografia gasosa (APHA, 2005).



3 Resultados e Discussão

Fatores ambientais

A carga orgânica volumétrica (COV) nos reatores foi crescente, os valores médios de COV aplicadas foram de 5,9; 9,8; 18,1; e 27,8 g DQOtotal (L d)⁻¹ (Tabela 1), o aumento gradual da COV foi realizado para a adaptação do lodo de inóculo e para a verificação das condições de estabilidade com COV maiores.

Os fatores ambientais de pH, alcalinidade e ácidos voláteis são muito importantes e estão fortemente relacionados no controle e operação dos sistemas anaeróbios (CHERNICHARO, 2007). Os valores médios do pH do afluente dos reatores R1 e R2 variaram de 6,6 a 7,9 (Tabela 3). Os valores médios do pH do efluente do reator R1 e variaram de 7,75 a 8,05 e do R2 variaram de 8,19 a 8,56.

Os valores médios das concentrações de ácidos voláteis totais (AVT) observados no efluente do R1 e no efluente do R2 com o aumento gradual da COV, e valores médios de Alcalinidade total (AT) e parcial (AP) estão apresentados na Tabela 3. Os valores médios de alcalinidade total (AT) aumentaram do afluente do R1 para o efluente do R2, os valores de AT foram de 1865, 2520, 3306, 4202 mg L⁻¹ e 2042, 3182,5073, 4763 mg L⁻¹, respectivamente, com o acréscimo gradual da COV. A acumulação do AVT podem promover decréscimo no pH e conseqüentemente a falência do processo. As maiores concentrações de AVT foram de 2785 mg L⁻¹ no efluente do R1 e de 2575 mg L⁻¹ no efluente do R2. As maiores concentrações de AT foram de 4946 mg L⁻¹ no efluente do R1 e de 5073 mg L⁻¹ no efluente do R2, e as maiores concentrações de AP nos efluentes do R1 e R2 foram de 2486 e 1987 mg L⁻¹, respectivamente.

As maiores concentrações de AVT e as maiores concentrações de alcalinidade total (AT) e parcial (AP) nos efluentes foram observadas com a aplicação de COV de 18,1 e 27,8 DQOtotal (L d)⁻¹. O aumento da AP no R1 e no R2 contribui para o tamponamento das concentrações de ácidos voláteis, sem causar queda no pH. A acumulação dos AVT no tratamento da vinhaça foi mencionada por Espinosa et al. (1995) e van Haandel et al. (2014), a acumulação de AVT pode ser resposta típica do reator para mudanças rápidas de COV, que pode promover decréscimo no pH e conseqüentemente a falência do processo. Portanto, a utilização dos reatores em série R1 e R2 contribui para a diminuição das concentrações de AVT, para o aumento na AT e AP, e melhorou a qualidade do efluente, que foi utilizado na

recirculação para correção do pH da vinhaça dispensando uso de alcalinizantes químicos.

Tabela 3- Valores médios do pH, alcalinidade total (AT), alcalinidade parcial (AP), relação AI/AP, ácidos voláteis totais (AVT), do afluente e efluentes dos reatores UASB em série R1 e R2, com o aumento gradual da COV no R1.

COV (gDQOtotal (L d) ⁻¹)		pH	AT (mg L ⁻¹)	AP (mg L ⁻¹)	AI/AP	AVT (mg L ⁻¹ de CH ₃ COOH)
5,9 c.v. 9,9	Afluente	7,25	1865	872	1,19	1370
	c.v.	4,0	15,8	27,1	13,2	12,1
	Efluente R1	7,95	2033	1097	1,0	1339
	c.v.	4,6	19,2	30,8	58,7	13,6
	Efluente R2	8,56	2042	1070	1,02	1352
	c.v.	2,2	17,9	30,0	44,1	19,4
9,8 c.v. 19,3	Afluente	6,86	2520	1246	1,17	1861
	c.v.	3,8	22,60	26,9	8,6	33,1
	Efluente R1	8,00	3350	1985	0,68	1581
	c.v.	2,51	22,7	17,2	32,5	43,9
	Efluente R2	8,43	3182	1885	0,68	1542
	c.v.	2,1	21,5	15,2	29,6	42,7
18,1 c.v. 13,1	Afluente	6,59	3306	1436	1,36	3282
	c.v.	4,5	20,6	34,6	9,5	12,5
	Efluente R1	7,75	4946	2486	1,02	2785
	c.v.	4,3	8,6	13,5	29,5	16,3
	Efluente R2	8,19	5073	2608	0,96	2575
	c.v.	3,1	7,2	11,4	20,5	23,2
27,8 c.v. 3,2	Afluente	7,61	4202	2691	1,21	2345
	c.v.	1,8	13,3	11,4	8,2	24,9
	Efluente R1	8,05	4407	2364	0,89	2333
	c.v.	2,8	11,1	11,5	39,3	31,8
	Efluente R2	8,41	4763	2987	0,6	1692
	c.v.	3,1	11,6	8,2	30,8	38,5

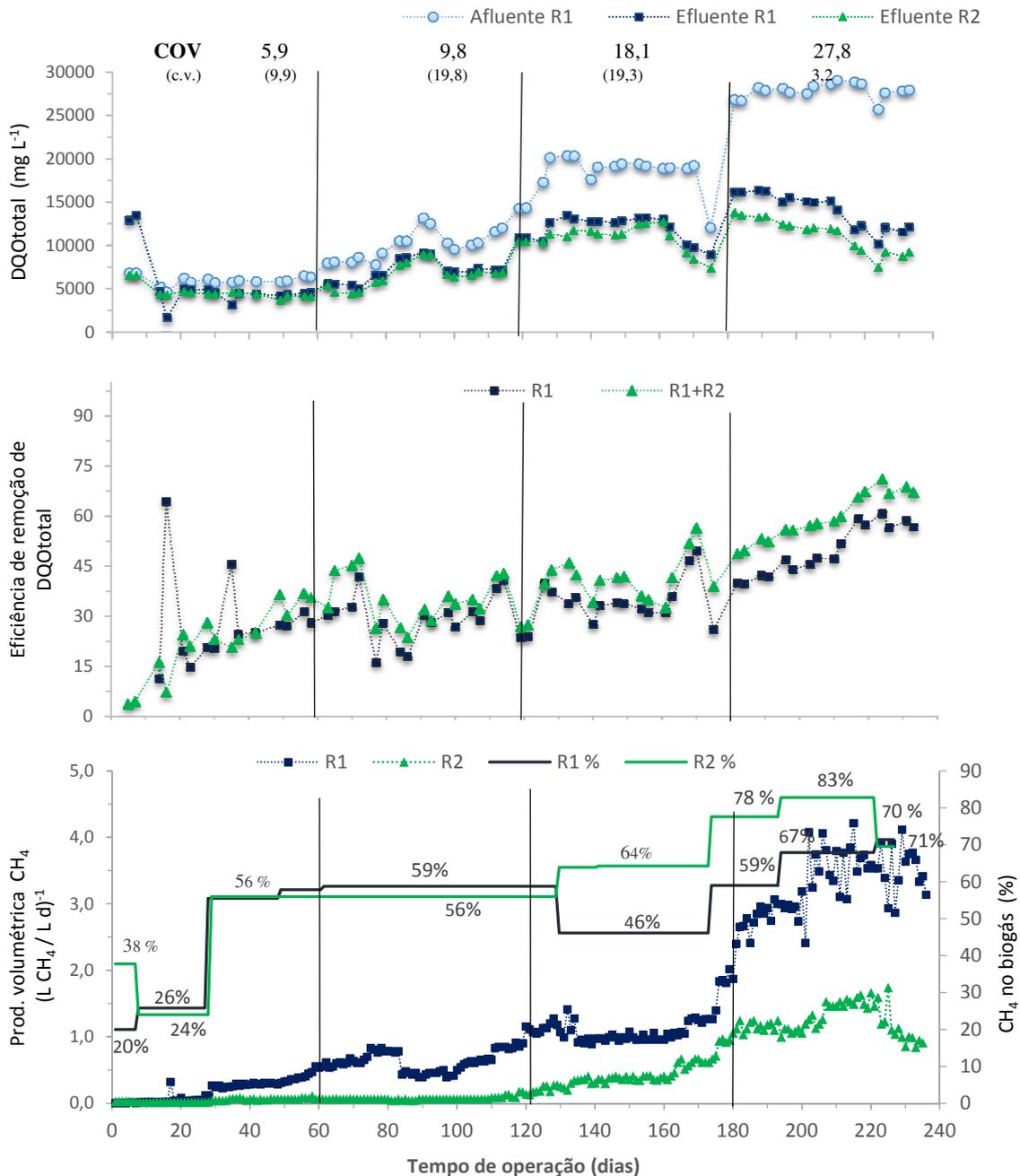
Remoção de DQO e produção de biogás

Os valores médios da demanda química de oxigênio total do afluente, com a diluição da vinhaça no efluente, foram crescentes, de 5898 até 27814 mg L⁻¹. A remoção da DQO total aumentou com o aumento da COV (5,9 a 27,8 g DQOtotal (Ld)⁻¹), atingindo valores de 61 % no R1, no final da operação dos reatores. Em relação ao sistema de tratamento em série (R1+R2) a remoção de DQOtotal atingiu valores de 71%, no final da operação dos reatores (Figura 2), com COV no R1 de 27,8 g DQOtotal (L d)⁻¹.

Os valores de produção volumétrica de metano e concentração de metano no biogás estão apresentados na Figura 2. A produção volumétrica de metano aumentou com o aumento da COV, alcançando valores de 4,2 m³ CH₄ (m³ d)⁻¹ no R1 e de 1,7 m³ CH₄ (m³ d)⁻¹ no R2. As maiores percentagens de metano no biogás foram de 71% no R1 e de 83% no R2, com as maiores aplicações de COV no R1 de 27,8 g DQOtotal (L d)⁻¹. Os resultados obtidos a partir deste estudo sugerem que a utilização com a utilização de reatores UASB em série pode produzir biogás com teor de metano elevado no R2, cujas concentrações foram superiores ao

R1 com as maiores COV aplicadas.

Figura 2- Valores de produção volumétrica de metano, demanda química de oxigênio total (DQOtotal), concentração de metano no biogás e eficiência de remoção de DQOtotal nos reatores UASB em série R1 e R2. COV no R1: carga orgânica volumétrica (g DQOtotal (L d)⁻¹). c. v.: coeficiente de variação (%)



Nutrientes

Os valores médios de nitrogênio total Kjeldahl (N_{TK}) e fósforo total (P_{total}) no afluyente, em virtude da suplementação, foram crescentes, de 134 a 423 mg L⁻¹ e de 14 a 46 mg L⁻¹, nos reatores R1 e R2, respectivamente (Tabela 4). As relações DQO:N:P no afluyente variaram de

350:7,9:0,8 a 350:8,9:0,9, no R1 e R2. Estes valores estão próximos aos preconizados por Chernicharo (2007) para que sejam atendidas as necessidades dos microrganismos na fermentação metanogênica. Os valores de NK e P-total, no efluente do R2 foram inferiores aos observados no afluente e no efluente do R1, e variaram de 92 a 301 mg L⁻¹ e de 4 a 23 mg L⁻¹, respectivamente.

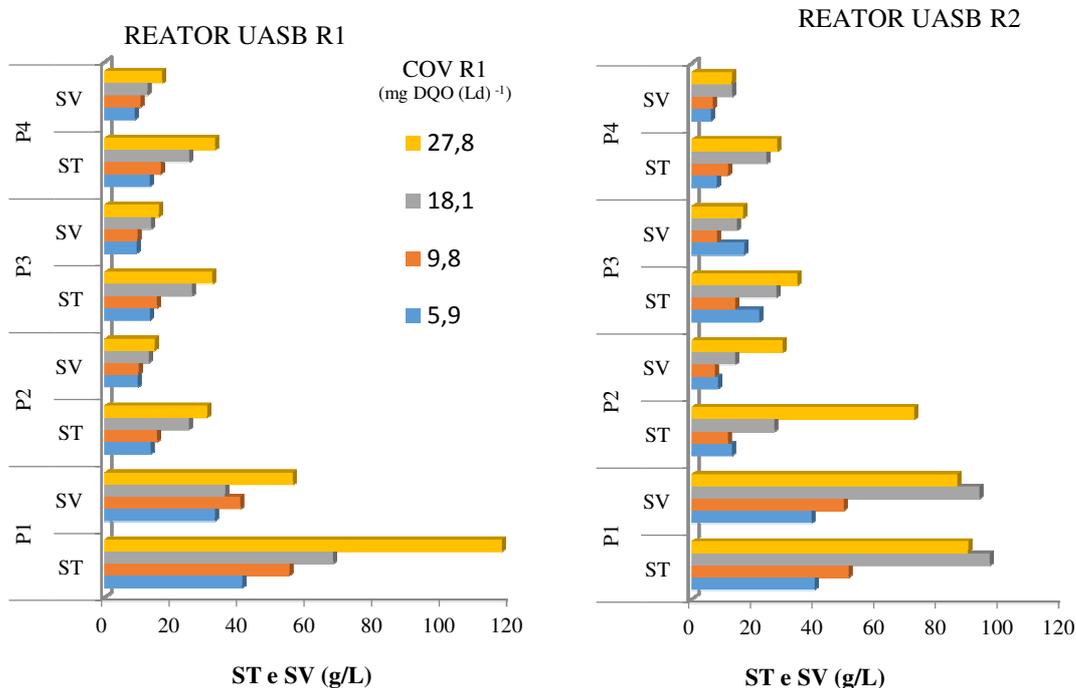
Tabela 4- Valores médios de demanda química de oxigênio total (DQO_{total}), Nitrogênio Kjeldal (N_{TK}), Fósforo total (P_{total}) e os valores das relações DQO:N:P no afluente e efluentes dos reatores UASB, em série, R1 e R2.

Parâmetros	COV (gDQO _{total} (L d) ⁻¹) no R1	5,9		9,8		18,1		27,8	
		c.v. 9,9	c.v.	c.v. 19,8	c.v.	c.v. 19,3	c.v.	c.v. 3,2	c.v.
DQO (mg L ⁻¹)	Afluente	5898	9,9	9761	19,1	18114	13,1	27814	3,2
DQO:N	Afluente	350: 7,9	-	350: 8,0	-	350:7,9	-	350:8,8	-
N_{TK} (mg L ⁻¹)	Afluente	134,6	24,4	203,6	20,5	407,6	14,3	423,5	5,8
	Efluente R1	102,0	16,2	221,8	37,4	342,2	24,8	312,2	5,7
	Efluente R2	92,6	21,5	167,4	41,7	289,2	15,4	301,0	3,2
DQO:P	Afluente	350:0,8	-	350:0,8	-	350:0,8	-	350:0,9	-
P (mg L ⁻¹)	Afluente	14,3	24,8	21,3	55,0	39,5	7,8	46,1	6,4
	Efluente R1	8,32	24,6	12,8	23,8	16,3	37,9	25,2	6,2
	Efluente R2	4,53	27,4	6,24	50,1	15,32	38,8	23,6	5,3

Sólidos totais e voláteis

As concentrações de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) no lodo dos reatores aumentaram com o aumento da COV (Figura 3), indicando que houve crescimento na manta de lodo. Os maiores valores médios de ST e SV ocorreram no ponto inferior (P1) do R1 e R2. No R1 os valores de ST e SV foram 117 g (L)⁻¹ e 55 g (L)⁻¹, no R2 os valores de ST e SV foram 97 g (L)⁻¹ e 90 g (L)⁻¹.

Figura 3- Concentrações de Sólidos Totais (ST) e de Sólidos Voláteis (SV) nos pontos de coletas do reator UASB, R1 e R2, em função das cargas orgânicas volumétricas (COV) aplicados no R1.



4 Conclusões

A utilização dos reatores UASB em série contribuiu para o aumento de remoção de DQO_{total}, aumento na produção de metano e estabilidade dos reatores anaeróbios. A utilização da vinhaça com a torta-de-filtro contribuiu para o ajuste das concentrações de N e P recomendadas para a digestão anaeróbia. A recirculação do efluente permitiu o ajuste do pH do afluente para faixas consideradas ótimas sem a necessidade de adição de alcalinizantes. Com o aumento gradual da COV foi possível alcançar COV de 28g DQO_{total} (L d)⁻¹ no R1 em condições de estabilidade, com eficiência de remoção de DQO_{total} até 71% no sistema de tratamento em série R1+R2 e produção volumétrica de metano de até 4,2 L CH₄ (L d)⁻¹ no R1 e concentrações de metano no biogás de 83% no R2.

5 Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.



Referências

- APHA, AWWA. WEF, 2005. **Standard methods for the examination of water and wastewater**, v. 21, p. 258-259, 2005
- ALPHENAAR, P. A. et al. Phosphorus Requirement in High-Rate Anaerobic Wastewater Treatment. v. 27, n. 5, p. 749–756, 1993.
- BARROS, V. G.; DUDA, R.; OLIVEIRA, R. A. Biomethane production from vinasse in UASB reactors inoculated with granular sludge. **Brazilian Journal of Microbiology**, *in press*, 2016.
- CHERNICHARO, C. A. D. L. **Anaerobic Reactors**. IWA Publishing, 2007. v. 04
- DIAS, M. O. DE S. et al. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. **Environmental Development**, v. 15, p. 35–51, 2014.
- DILALLO, R.; ALBERTSON, O. E. Volatile acids by direct titration. **Journal Water. Pollution Control Federation**, Alexandria, v. 33, n. 4, p. 356-365, 1961.
- ESPAÑA-GAMBOA, E. I. et al. Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. **Biotechnology for Biofuels**, v. 5, n. 1, p. 82, 2012.
- ESPINOSA, A. et al. Effect of trace metals on the anaerobic degradation of volatile fatty acids in molasses stillage. **Water Science and technology**, v. 32, n. 12, p. 121-129, 1995.
- FENG, S. et al. Effect of water, metallic ions, fatty acid and temperature on oxidative stability of 1-octacosanol from sugarcane rind. **Food chemistry**, v. 182, p. 171–7, 1 set. 2015.
- FERRAZ JR, A. D. N. A. et al. Thermophilic anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse. **Renewable Energy**, v. 89, p. 245–252, 2016.
- FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. **Journal of environmental management**, v. 145, p. 210–29, 1 dez. 2014.
- JANKE, L. et al. Comparison of start-up strategies and process performance during semi-continuous anaerobic digestion of sugarcane filter cake co-digested with bagasse. **Waste Management**, v. 48, p. 199–208, 2016.
- KAPARAJU, P.; SERRANO, M.; ANGELIDAKI, I. Optimization of biogas production from wheat straw stillage in UASB reactor. **Applied Energy**, v. 87, n. 12, p. 3779–3783, 2010.
- LUO, G. et al. Enhancement of bioenergy production from organic wastes by two-stage anaerobic hydrogen and methane production process. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 18, p. 8700–8706, 2011.
- MAKUL, N.; SUA-IAM, G. **Characteristics and utilization of sugarcane filter cake waste in the production of lightweight foamed concrete**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2016.



NASR, N. et al. Comparative assessment of single-stage and two-stage anaerobic digestion for the treatment of thin stillage. **Bioresource Technology**, v. 111, p. 122–126, 2012.

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. (vol. I e II). Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997

SATYAWALI, Y.; BALAKRISHNAN, M. Removal of color from biomethanated distillery spentwash by treatment with activated carbons. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 14, p. 2629–2635, 2007.

UNICA (2014). UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE. AÇÚCAR. Em meio a maior crise de sua história, produtores de cana-de-açúcar aguardam conclusão das políticas públicas em benefício do setor, Brasil, 2014. Disponível em < <http://www.unica.com.br/imprensa/>> Acesso em: 10 fev. 2015.

UNICA (2016). UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE. AÇÚCAR. Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra 2014/2015. Disponível em< <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.>> Acesso em: 20 fev. 2016.

VAN HAANDEL, A. et al. Methanosaeta dominate acetoclastic methanogenesis during high-rate methane production in anaerobic reactors treating distillery wastewaters. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 89, n. 11, p. 1751–1759, 2014.

WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K. J.; OWENS, J. M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, n. 2, p. 63–102, ago. 2000.