



PRODUÇÃO DE METANO EM REATORES ANAERÓBIOS HORIZONTAIS DE ALTA TAXA COM LEITO FIXO EM SÉRIE

METHANE PRODUCTION IN ANAEROBIC REACTOR HIGH RATE HORIZONTAL FIXED BED IN SERIES

Aureo Evangelista Santana Junior⁽¹⁾
Roberto Alves Oliveira⁽²⁾
Rose Maria Duda⁽³⁾

Resumo

O objetivo de nossa pesquisa foi avaliar o desempenho de quatro reatores anaeróbios horizontais de leito fixo (RAHLF), em série, quanto à remoção de matéria orgânica e produção de metano a partir da vinhaça, com o aumento gradual da carga orgânica volumétrica (COV). Também foi avaliado o efeito da recirculação do efluente sobre a estabilidade dos reatores RAHLF (valores de pH, alcalinidade e ácidos voláteis totais). Em nosso estudo alcançamos COV de 15 g DQO (L d)⁻¹, e após 380 dias de operação, observamos valores de produção volumétrica de metano superiores a 0,60 m³ CH₄ (m³ reator d)⁻¹, com porcentagem de metano de 70%. Este estudo é inédito, pois não existem trabalhos com reatores RAHLF para o tratamento de vinhaça, para a produção de metano.

Palavras-chave: Biogás. Metano. RAHLF. Vinhaça.

Abstract

The objective in our study was to evaluate the performance of four horizontal anaerobic fixed bed (HAIB) in series, as the removal of organic matter and methane production from vinasse, with the gradual increase in the volumetric organic load (OLR). Also evaluated was the effluent of the recirculation effect on the stability of HAIB reactors (pH, alkalinity and volatile fatty acids). In our study we reached OLR of 15 g COD (L d)⁻¹ and after 380 days of operation, volumetric production observed values above 0.60 m³ methane CH₄ (m³ reactor d)⁻¹, and the percentage of methane 70%. This study is original because there are no studies with HAIB reactors for the treatment of vinasse, for the production of methane.

Keywords: Biogas. Methane. HAIB. Vinasse.

¹ Tecnólogo em Biocombustíveis, Doutorando, Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal – SP. aureo.santana@gmail.com

² Eng^o Agrícola, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Rural, FCAV/UNESP, Jaboticabal – SP. oliveira@fcav.unesp.br

³ Eng^a Química, Prof^a. Doutora, Faculdade de Tecnologia, FATEC, Jaboticabal – SP. roseduda@zipmail.com.br



1 Introdução

A substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis tem sido extremamente importante em todo o mundo para estimular o crescimento de economias baseadas na sustentabilidade através do uso de recursos renováveis. Neste cenário, o Brasil se destaca em virtude do uso de etanol a partir da cana de açúcar (MORAES et al., 2015), que também é a principal cultura usada na produção de açúcar. Os principais subprodutos de processos de produção de etanol e açúcar são vinhaça e melaço.

Para cada litro de etanol produzido são gerados aproximadamente 13 L de vinhaça. A composição química da vinhaça depende das características do solo, variedade de cana, período de safra e processo industrial usado na produção de etanol, e geralmente a vinhaça tem uma elevada carga orgânica, de 25 a 65 g L⁻¹ em termos de demanda química de oxigênio (DQO), com pH próximo de 4,0 e temperaturas variáveis em torno de 80°C a 90°C (WILKIE et al., 2000). De acordo com Fuess *et al.* (2014), no Brasil a vinhaça é principalmente reutilizada por meio da fertirrigação em virtude do seu alto teor de água e de nutrientes, e segundo Rolim *et al.* (2013) se aplicada em doses excessivas, pode desequilibrar o complexo sortivo do solo e consequentemente contaminar o lençol freático.

O grande volume de vinhaça gerada, juntamente com a preocupação em reaproveitar esse resíduo na agroindústria canavieira está impulsionando estudos sobre tecnologias para o tratamento da vinhaça visando oferecer soluções economicamente viáveis para a indústria e sustentáveis para o meio ambiente.

A digestão anaeróbia da vinhaça aliada aos estudos em biorreatores representa uma alternativa eficaz para reduzir a carga poluente da vinhaça, permitindo a degradação de materiais orgânicos e resultando na produção de biogás, constituído essencialmente por 60 a 70% de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂). Além disso, o gás metano produzido no processo pode ser convertido em energia, o que pode contribuir para melhorar o equilíbrio energético na cadeia de produção do etanol (FUESS *et al.*, 2014). Outro estudo realizado por Nogueira et al., (2015) conclui que o uso de biogás para geração de energia elétrica, além de trazer benefícios para o meio ambiente, também ajuda na gestão de resíduos.

Diante do exposto, o tratamento anaeróbio da vinhaça pode reduzir o potencial poluidor, mantendo-se os nutrientes, e produzindo biogás que pode ser utilizado como fonte de energia nas instalações da destilaria. Visando melhorar o resultado do processo anaeróbio,

uma nova configuração de reator anaeróbio foi desenvolvida, o reator anaeróbio horizontal de leito fixo e alta taxa (RAHLF), que tem como principal característica a retenção da biomassa ativa dentro do reator por períodos maiores de tempo. Esta configuração de reator tem se apresentado como alternativa viável, com resultados extremamente satisfatórios (ZAIAT *et al.*, 1996).

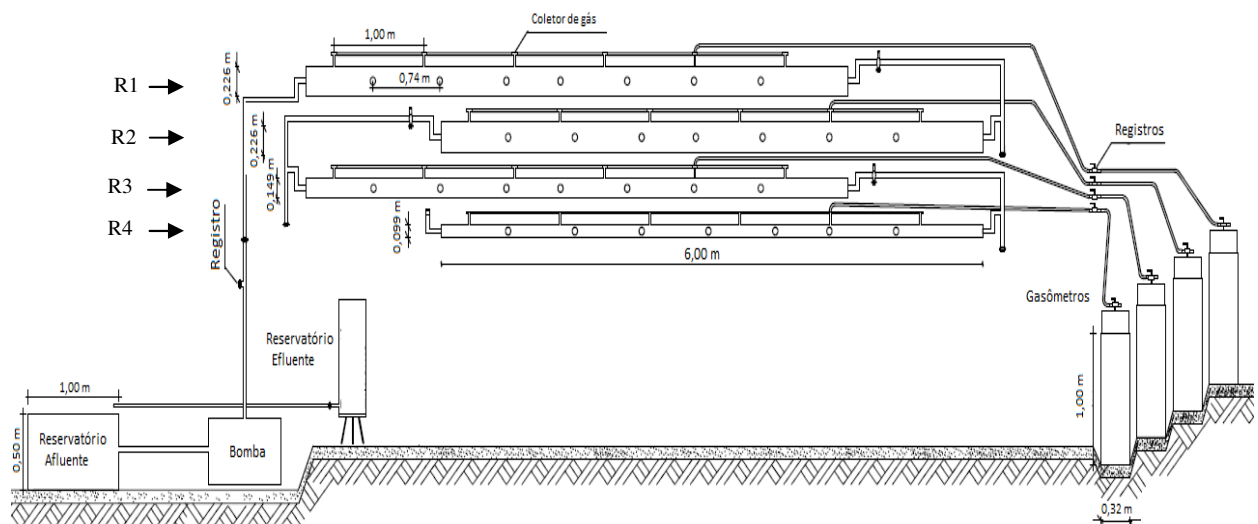
2 Material e Métodos

O sistema de tratamento foi composto de uma caixa de armazenamento do afluente e quatro reatores anaeróbios horizontais de leito fixo e alta taxa (RHALF) em escala piloto, construídos conforme descrito por Zaiat *et al.*, (1994) e instalados em série. O R1 foi alimentado utilizando-se uma bomba, com intuito de propiciar a regularização das vazões do afluente no R1 e conseqüentemente no R2, R3, R4. Nos reatores foram utilizados anéis de eletroduto corrugado (conduíte) como meio suporte, com 87% de índice de vazios. Os diâmetros, comprimentos, volumes totais e úteis e TDH aplicados nos RHALF estão descritos na (Tabela 1) e também um esquema do sistema de tratamento dos reatores (Figura 1). O TDH total do sistema (R1+R2+R3+R4) foi de 5,3 dias.

TABELA 1 - Valores do volume total e útil, comprimento e tempo de detenção hidráulica (TDH) aplicados nos quatro reatores anaeróbios horizontais de alta taxa com leito fixo (RHALF), em série, R1, R2, R3 e R4.

Reatores	Diametro (m)	Comprimento (m)	Volume Total (L)	Volume útil (L)	TDH (d)
R1	0,226	6,0	241	209	2,0
R2	0,226	6,0	241	209	2,0
R3	0,149	6,0	105	91	0,9
R4	0,099	6,0	46	40	0,4

FIGURA 1 - Representação esquemática do sistema de tratamento com reatores anaeróbios horizontais de leito fixo e alta taxa (RHALF).





O afluente utilizado para a alimentação dos reatores RHALF após a partida foi a vinhaça in natura de uma Usina Sucroenergética, coletada semanalmente, de abril a novembro de 2014 (safra 1) e abril a novembro de 2015 (safra 2). Como a vinhaça in natura possui demanda química de oxigênio total (DQO_{total}) de aproximadamente 45 g L^{-1} , para obtenção das COV aplicadas foi necessário diluir a vinhaça, com o efluente do reator RHALF (R4).

No afluente e efluentes dos reatores RHALF foram determinados o nitrogênio amoniacal, pH, alcalinidade total e parcial, de acordo com metodologia descrita no APHA (2005) e os ácidos voláteis totais de acordo com metodologia descrita por Dillalo e Albertson (1961). A concentração do biogás foi determinada por cromatografia gasosa, conforme descrito no APWA (2005) e o volume de biogás foi medido utilizando gasômetros.

3 Resultados e Discussão

Neste estudo utilizando vinhaça como substrato foram observados valores de produção volumétrica de metano de até $1,121; 1,380; 0,797; 1,473 \text{ N m}^3 \text{ CH}_4 (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$, nos reatores R1, R2, R3 e R4, respectivamente (Figura 2A), com porcentagem de metano de aproximadamente 70%. A produção volumétrica de metano aumentou com a aplicação de COV maiores, na safra de 2014 e 2015 (Figura 2A).

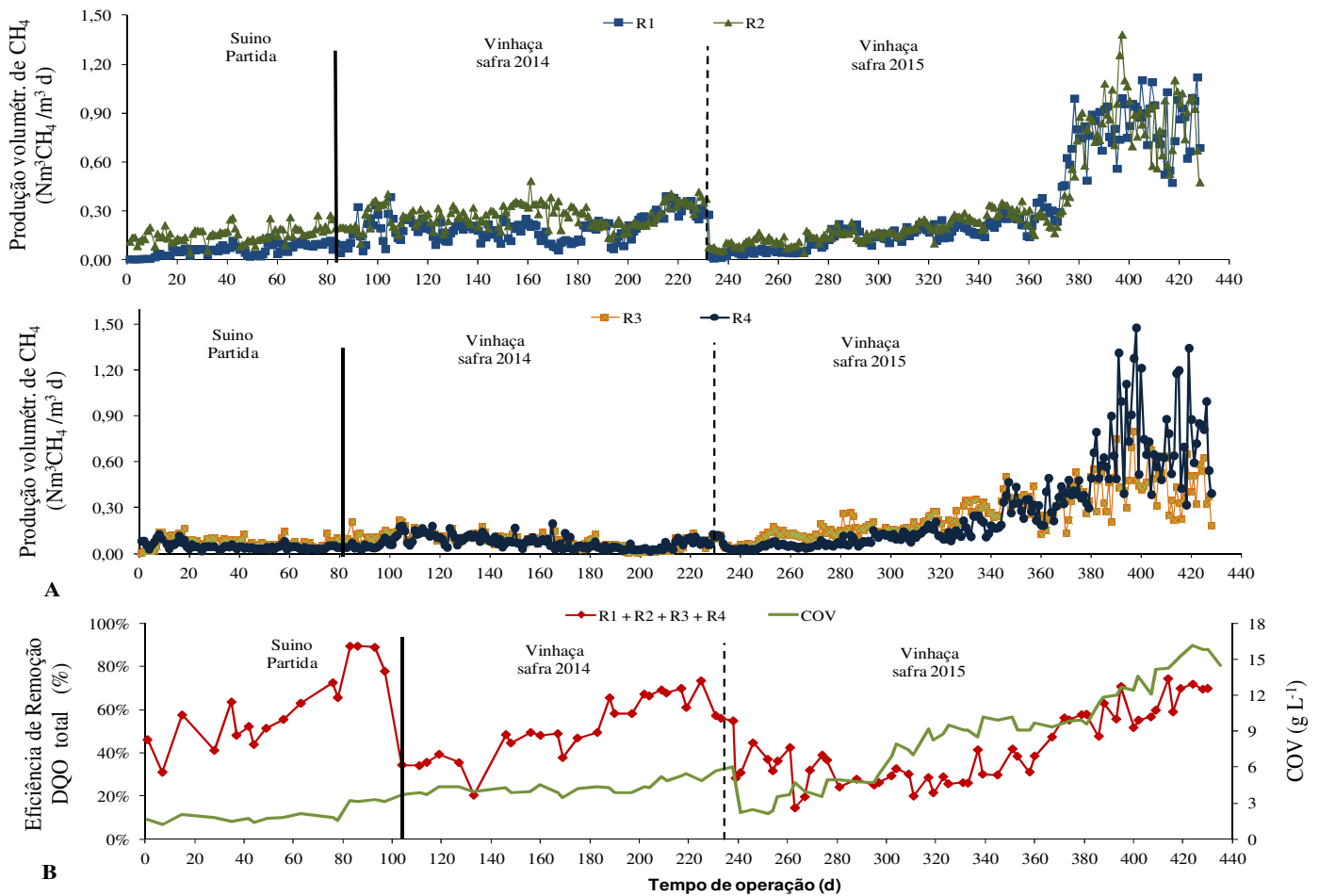
O aumento da COV resultou no aumento gradual da produção de biogás, devido à maior disponibilidade do substrato a ser convertido em biogás (GROVER et al., 1999).

Colin *et al.*, (2007) utilizando um reator RAHLF, para o tratamento de águas residuárias da produção de amido de mandioca, operando com COV de até $11,8 \text{ g DQO (L d)}^{-1}$ e um TDH de aproximadamente 9,5 h, observaram concentrações de metano de 69 a 81%, indicando que nos RAHLF pode-se obter biogás com boas porcentagens de metano, como também observado neste trabalho. Oliveira e Bruno (2013), avaliaram em seu estudo a partida de três reatores anaeróbios horizontais instalados em série, para o tratamento de águas residuárias do processamento de frutos do café por via úmida, que foram preenchidos com meios suporte de anéis de bambu e fibra de coco, respectivamente, aplicando COV no R1 de $25,0 \text{ g DQO}_{total} (\text{L d})^{-1}$ com TDH de 30 h para cada reator, obtiveram eficiências na remoção de DQO_{total} em torno de 80%, com produções volumétricas e específicas metano de $1,50 \text{ L (L reator d)}^{-1}$ e $0,16 \text{ L (g DQO}_{removido})$, respectivamente, em condição estável no sistema.

Em nosso estudo, a partir dos 380 dias de operação, no R1 e R2, foram observados valores de produção volumétrica superiores a $0,60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{m}^3 \text{ reator d})^{-1}$ (Figura 2A), e esses

valores são próximos aos observados por BARROS (2013), que observou valores médios de $0,624 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{m}^3 \text{ reator d})^{-1}$ tratando vinhaça em um reator UASB, com COV de $7,5 \text{ g DQO} (\text{L d})^{-1}$.

FIGURA 2 – (A) Produção volumétrica de CH_4 nos reatores anaeróbios horizontais de alta taxa com leito fixo (RAHLF), R1, R2, R3 e R4, (B) eficiência de remoção de demanda química de oxigênio total ($\text{DQO}_{\text{total}}$), carga orgânica volumétrica (COV).



Foram observadas eficiências de remoção de $\text{DQO}_{\text{total}}$ superiores a 60% no final do período de partida, safra 1 e safra 2, indicando que nos reatores RAHLF, é possível obter boas remoções, após um período de adaptação (Figura 2B).

Os valores médios do pH do afluente mantiveram-se próximos de 7,0. O pH próximo a 7,0 facilita o início da metanogênese, embora possa ocorrer estabilidade na produção de metano em uma faixa mais ampla de pH, 6,0 e 8,0. Os valores médios da alcalinidade total (AT) e parcial (AP) aumentaram do R1 para o R4, com o aumento da COV, na partida, safra 1 e safra 2 (Tabela 2). As maiores concentrações médias de AVT foram observadas no R1, com valor médio de 3430 mg L^{-1} e COV de $15 \text{ g DQO}_{\text{total}} (\text{L d})^{-1}$ (Tabela 2). Com a recirculação

do efluente, parte dos ácidos produzidos retornaram ao processo, porém a recirculação mostrou-se benéfica para a melhoria da alcalinidade no sistema.

De acordo com Murto et al., (2004), concentrações adequadas de amônia no reator anaeróbio auxiliam o tamponamento, em virtude da capacidade de formação de NH_4HCO_3 . Neste trabalho, foram observados valores de nitrogênio amoniacal crescentes do afluente para o efluente do R4 (Tabela 2), indicando que ocorreu a amonificação.

TABELA 2 - Valores médios de pH, alcalinidade total (AT), alcalinidade parcial (AP), ácidos voláteis totais (AVT), e nitrogênio amoniacal (N-am) no afluente e efluentes dos RAHLF (R1, R2, R3 e R4), instalados em série, durante os dias de operação.

COV	Reator	pH	AT (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	AP (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	AVT (mg L^{-1})	N-am (mg L^{-1})
1,5 a 3,0 (Partida)	Afluente	7,1	1808	954	642	422
	c.v. (%)	7	41	53	46	9
	R1	7,3	2019	1332	551	416
	c.v. (%)	3	35	36	32	15
	R2	7,3	2087	1517	403	473
	c.v. (%)	3	33	35	55	12
	R3	7,4	2094	1482	402	482
	c.v. (%)	3	32	36	53	11
	R4	7,4	2205	1617	384	501
	c.v. (%)	3	27	25	49	12
3,0 a 6,0 (Safra 1)	Afluente	7,0	4877	2737	2367	433
	c.v. (%)	2	27	28	33	31
	R1	7,2	4356	2715	1817	462
	c.v. (%)	3	18	24	35	34
	R2	7,5	4800	3609	958	479
	c.v. (%)	3	18	19	65	29
	R3	7,6	6046	4680	766	503
	c.v. (%)	2	26	28	66	37
	R4	7,7	6077	4660	656	545
	c.v. (%)	3	26	29	77	39
2,0 a 15,0 (Safra 2)	Afluente	7,1	7221	3631	3282	417
	c.v. (%)	3	21	21	32	27
	R1	7,3	5257	2659	3430	451
	c.v. (%)	3	23	29	34	29
	R2	7,6	5309	3175	2611	450
	c.v. (%)	2	22	21	36	29
	R3	7,7	8156	5241	2214	445
	c.v. (%)	2	23	23	37	31
	R4	7,7	8088	5296	1971	409
	c.v. (%)	2	22	21	40	29

COV – carga orgânica volumétrica; C.V – coeficiente de variação. RAHLF – reatores anaeróbios horizontais de leito fixo



4 Conclusão

A recirculação com efluente do reator R4 mostrou-se benéfica para o conjunto de reatores mantendo o pH do sistema nas condições ideais para produção de metano, sem a necessidade da utilização de alcalinizantes comerciais. A produção volumétrica de metano foi crescente com o aumento da COV em todos os reatores e após 380 dias de operação dos reatores foram observados, nos reatores R1, R2 valores superiores a $0,60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{m}^3 \text{ reator d})^{-1}$. A utilização dos reatores RAHLF, instalados em série, foi importante para manter as eficiências de remoção do sistema de tratamento estáveis. Portanto, o conjunto de reatores anaeróbio, pode ser uma alternativa econômica e robusta para o tratamento da vinhaça apresentando viabilidade na produção de metano em temperatura ambiente.

5 Agradecimentos

À CAPES pelo suporte com bolsa de estudos para o primeiro autor e auxílio financeiro para realização deste trabalho.

6 Referências

APHA; AWWA; WPCF - **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington, 2005.

COLIN, X.; FARINET, J.-L.; ROJAS, O.; ALAZARD, D. Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support. **Bioresource Technology**, Lausanne, v.98, p.1602 – 1607, 2007.

BARROS, V. G. **Conversão anaeróbia de vinhaça e melaço em reatores UASB inoculados com lodo granulado**. 2013. 69 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O. E. Volatile acids by direct titration. **Journal Water Pollution Control Federation**, Alexandria, v. 33, n. 4, p. 356-365, 1961.

FUESS, Lucas Tadeu; GARCIA, Marcelo Loureiro. Anaerobic digestion of stillage to produce bioenergy in the sugarcane-to-ethanol industry. **Environmental technology**, v. 35, n. 3, p. 333-339, 2014.



GROVER, R.; MARWAHA, S. S.; KENNEDY, J. F. Studies on the use of an anaerobic baffled reactor for the continuous anaerobic digestion of pulp and paper mill black liquors. **Process Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 6-7, p. 653-657, 1999.

MORAES, Bruna S.; ZAIAT, Marcelo; BONOMI, Antonio. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888-903, 2015.

MURTO, M.; BJÖRNSSON, L.; MATTIASSON, B. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. **Journal of Environmental Management**, Londres, v.70, p.101–107, 2004.

NOGUEIRA, Carlos Eduardo Camargo et al. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 300-305, 2015.

OLIVEIRA, Roberto A. de; BRUNO, Natani. Start-up of horizontal anaerobic reactors with sludge blanket and fixed bed for wastewater treatment from coffee processing by wet method. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 2, p. 353-366, 2013.

ROLIM, Mário M. et al. Influência de uma lagoa de distribuição de vinhaça na qualidade da água freática. **Revista Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. v. 8, n. 1, 2013.

ZAIAT, M.; CABRAL, A. K. A.; FORESTI, E. Horizontal-flow anaerobic immobilized sludge reactor for wastewater treatment: conception and performance evaluation. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 11, p. 33-42, 1994.

ZAIAT, M.; CABRAL, A. K. A.; FORESTI, E. Cell wash-out and external mass transfer resistance in horizontal-flow anaerobic immobilized sludge reactor. **Water Research**, v. 30, n. 10, p. 2435-2439, 1996.

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**, Kidlington, v. 19, n. 2, p. 63-102, 2000.