



241 - OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA CO-DIGESTÃO DE LODO DE ESGOTO COM RESÍDUOS PROVENIENTES DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUTÍVEIS

Allison Ruan de Morais Silva⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Atualmente é Aluno de mestrado no programa de Pós-graduação em Engenharia Química (EQA/UFSC).

Ana Cláudia Andrade Alves⁽²⁾

Graduanda em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Bolsista de iniciação científica PIBIC no Laboratório de Tratamento Biológico de Resíduos (LTBR/UFSC).

Agenor Furigo Júnior⁽³⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). D.Sc. em Engenharia Química pela UFRJ. Professor Titular do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos (EQA/UFSC).

Hugo Moreira Soares⁽⁴⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). D.Sc. em Engenharia Ambiental University of Massachusetts (EUA). Professor Titular do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos (EQA/UFSC).

Janaína dos Santos Ferreira⁽⁵⁾

Doutora em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Escola de Química (TPQB/EQ/UFRJ). Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Engenheira Química pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Atualmente é Professora no curso de Engenharia Ambiental EaD pela UFSCar e Pesquisadora no Programa de Pós-graduação em Engenharia Química na Universidade Federal de Santa Catarina (EQA/UFSC).

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Química e de Engenharia de Alimentos, Córrego Grande - Florianópolis - SC - CEP: 88040-900 - Brasil - Tel: +55(48)3721-2511-e-mail:allisonruanms@gmail.com; janajane@hotmail.com;

RESUMO

O presente trabalho apresenta resultados do estudo da co-digestão em escala de bancada de lodo secundário de esgoto (LS) com resíduos provenientes de biocombustíveis, a saber, glicerol bruto (GB) proveniente da produção de biodiesel e vinhaça (VI) oriundos da produção de etanol. Diferentes proporções binárias (Lodo:Resíduos) foram avaliadas em um primeiro ensaio: 100% LS (controle); 99%LS:1%GB; 99,5%LS:0,5%GB; 90%LS:10%VI; 95%LS:5%VI, seguido de um segundo ensaio com misturas ternárias nas proporções: 89%LS:1%GB:10%VI; 94%LS:1%GB:5%VI; 89,5%LS:0,5%GB:10%VI e 94,5%LS:0,5%GB:5%VI, e ajuste de pH inicial para 7,5. Para o primeiro ensaio houve um aumento de biogás nas condições com maiores percentagens de VI e em menores percentagens de GB. Já no segundo ensaio houve aumento da produção de biogás e tamponamento do sistema para condições ternárias que não continham 1% de GB. A melhor condição encontrada foi para a mistura ternária (89,5%LS:10%VI:0,5GB). Para essa condição obteve-se um aumento de aproximadamente 5,4 vezes na produção de biogás em relação ao controle, não prejudicando a estabilidade do processo, uma vez que a remoção de sólidos suspensos voláteis (SSV) foi de 53,5% contra 37,5% para o controle. Outro indicativo da boa digestão anaeróbica e estabilidade do processo foi a relação Acidez volátil total e Alcalinidade total (AVT/AT) que foi de 0,11 no final do ensaio, dentro da faixa ótima para metanogênese.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos de Biocombustíveis, Co-Digestão Anaeróbica, Biogás.



INTRODUÇÃO

O esgotamento dos recursos fósseis e o aumento da geração de resíduos são importantes desafios enfrentados pela sociedade (CHERUBINI, 2010). De acordo com Bernal et al., (2017), são questões fundamentais para o planejamento energético de muitos países a redução do consumo de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa através da implantação de energias renováveis, diversificando e expandindo a matriz energética.

O interesse em energia proveniente de combustíveis de biomassa, como bioetanol e biodiesel, aumentou devido às suas vantagens como a redução das emissões de gases de efeito estufa, desenvolvimento regional, estrutura social e agricultura e segurança do suprimento (DEMIRBAS, 2017; REIJNDERS, 2006). A produção de bioetanol e biodiesel gera uma quantidade significativa de resíduos, sendo o glicerol e a vinhaça, respectivamente, os principais.

O aumento significativo na produção de biodiesel gerou excedente de glicerol resultando na desvalorização do preço do glicerol bruto, sendo ele um importante subproduto da produção de biodiesel. Em geral, 1 kg de glicerol é formado para cada 10 kg de biodiesel produzido. Além disso, o glicerol é uma substância de fácil biodegradabilidade e apresenta uma alta produção teórica de metano (0,43 Nm³ CH₄ / kg glicerol), além de ser facilmente armazenada por um longo período. Logo, o glicerol pode ser caracterizado como um co-substrato ideal para o processo de digestão anaeróbica (ATHANASOULIA et al., 2014; FERREIRA et al., 2018).

O Brasil, além de ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, também lidera a produção de açúcar e etanol, conquistando cada vez mais o mercado externo com o uso de biocombustível como alternativa energética. A vinhaça é um dos principais resíduos da produção de bioetanol, sendo gerados entre 10-15 L de vinhaça ao se produzir 1 L de etanol. Outrossim, além do grande volume gerado, apresenta grande potencial poluidor. A vinhaça é uma suspensão aquosa de compostos orgânicos e minerais sólidos, contendo vinho que não é arrastado durante a etapa de destilação, além de quantidades residuais de álcool, de açúcar e voláteis mais pesados. A possibilidade de geração de energia a partir da digestão anaeróbica da vinhaça foi estudada por diversos autores, verificando-se um grande potencial energético nesse resíduo (BERNAL et al., 2017; SANTOS et al., 2011).

O processo de digestão anaeróbica é frequentemente encorajado por sua capacidade de reduzir o volume de matéria orgânica biodegradável, desviando este material de aterros sanitários. Porém, geralmente, o valor atrelado aos produtos finais é o que promove a aceitação da tecnologia, sendo comum a aplicação da digestão anaeróbica visando à produção de biogás com foco na concentração de metano (HORAN; YASER; WID, 2018).

O processo de digestão anaeróbica simples pode ter algumas desvantagens relacionadas às propriedades do substrato, sendo resolvido através de co-digestão com alguns substratos, pois podem fornecer nutrientes que são deficientes e ao mesmo tempo exercer um efeito sinérgico positivo sobre a mistura, levando a uma digestão estável e melhora no rendimento de biogás (MATA-ALVAREZ, 2014).

O lodo de esgoto é um subproduto gerado em estações de tratamento de águas residuais. Devido a sua produção contínua e em grandes quantidades, tem se tornado um problema ambiental mundial. A eliminação desse subproduto é um desafio e representa normalmente até 50% dos custos operacionais globais de uma estação de tratamento (ZHAO, 2010). Huiliñir et al., (2017), afirma que o modelo de gestão de disposição do lodo de esgoto vem mudando e aderindo ao seu uso para geração de produtos. O lodo de esgoto é um substrato rico em proteínas, caracterizado por uma relação carbono/nitrogênio relativamente baixa, alta capacidade de tamponamento e substancial conteúdo orgânico biodegradável. Devido a estas características é comumente utilizado como co-substrato em processos de degradação da matéria orgânica (KOCK et al., 2016; TYAGI et al., 2018).

Diante do exposto, esse trabalho teve como objetivo avaliar a co-digestão de misturas binárias e ternárias, em escala de bancada, de lodo de esgoto secundário (LS) com diferentes proporções de glicerol bruto (GB) e vinhaça (VI), a fim de encontrar uma condição ótima para produção de biogás junto à estabilização do processo.

METODOLOGIA

Origem e Caracterização dos Resíduos

O lodo secundário utilizado foi coletado no final da linha de recirculação de um sistema de lodos ativados de uma ETE localizada na cidade de Florianópolis no Estado de Santa Catarina, e armazenado a 4°C até o momento do uso (Figura 1).



Figura 1. Elevatória de retorno de lodo dos Sistemas de Lodos Ativados.
Fonte: Próprio Autor.

A coleta do lodo ativado secundário (LS) foi realizada em de janeiro de 2019. Para a caracterização do lodo, foram determinados pH, umidade, sólidos totais (voláteis e fixos) e demanda química de oxigênio (DQO). Os resíduos da produção de biocombustíveis, glicerol bruto (GB) e a vinhaça (VI) foram coletados de uma planta de produção de biodiesel e bioetanol, respectivamente. O glicerol bruto e a vinhaça foram caracterizados em termos de conteúdo de glicerol, DQO, pH, umidade e sólidos totais (voláteis e fixos). Os resultados, para ambos os resíduos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos Substratos utilizados durante os experimentos.

Parâmetros	Substratos		
	Lodo Secundário	Glicerol Bruto	Vinhaça
pH	7,0	8,0	4,5
SST (mg/L)	6.553	nd	10.320
SSV (mg/L)	4.840	nd	5.676
SST/SSV	0,74	nd	0,55
DQO (mg/L)	293	1.119.000	16.400
Metanol (mg/L)	nd	19	2.300
Glicerol (%)	nd	74	nd
Umidade (%)	97,8	92,2	96,5

nd =não determinado.

Experimentos de Co-digestão Anaeróbia em Frascos de Penicilina

Os ensaios em bancada foram realizados em frascos de penicilina de 100 mL com volume útil de 90 mL. Diferentes proporções de misturas binárias (LS:GB ou LS:VI): (99%LS:1%GB;99,5%LS:0,5%GB;90%LS:10%VI;95%LS:5%VI) foram conduzidas num primeiro ensaio, seguindo-se um segundo ensaio com misturas ternárias (LS:GB:VI):

(89%LS:1%GB:10%VI;94%LS:1%GB:5%VI; 89,5%LS:0,5%GB:10%VI e 94,5%LS:0,5%GB:5%VI). Tanto as misturas binárias quanto as misturas ternárias tiveram o pH inicial corrigido com NaHCO₃ para valores de pH entre 7,0 e 7,5. Após a introdução das misturas, os frascos foram selados com tampões de borracha e selos de alumínio, acoplados à seringas plásticas de 60 mL para a medição do volume de biogás produzido por deslocamento do êmbolo. Esses experimentos foram realizados sob temperatura ambiente (24°C), sem agitação, até estabilização da produção de biogás. A estabilização da produção de biogás foi estabelecida quando os frascos incubados não apresentaram variação no volume de biogás em um intervalo de 24 horas (Figura 2).



Figura 2: Frasco tipo penicilina usado nos ensaios de co-digestão anaeróbia sob temperatura ambiente a 24°C.

Alíquotas iniciais foram tomadas para verificação de pH e concentrações iniciais de sólidos suspensos voláteis (SSV), glicerol e DQO. Após a estabilização da produção de biogás, os frascos foram abertos e as medições finais dos mesmos parâmetros foram realizadas com adição da análise de acidez e alcalinidade total.

Métodos Analíticos

Os ácidos voláteis totais (AVT) e alcalinidade total (AT) foram determinados de acordo com Dilallo e Albertson (1961) e Ripley et al. (1986), respectivamente. O teor de glicerol foi medido de acordo com Bondioli e Della Bella (2005). DQO, pH e sólidos suspensos totais ou sólidos totais (voláteis e fixos) foram medidos de acordo com procedimentos padrão (APHA, 2005).

RESULTADOS

Caracterização dos Substratos

Analisando os dados da tabela 1, o lodo utilizado apresenta baixas concentrações de SST, provavelmente devido à instabilidade que ocorre nas estações de tratamento de esgoto (ETE) durante o período de verão, no qual a cidade de Florianópolis-SC praticamente triplica sua população. Apesar da baixa concentração de SSV a relação SSV/SST foi de 0,74. Em geral lodos de ETE (primário e secundário) apresentam valor médio da relação SSV/SST de 0,65, estando, portanto, o valor acima do esperando apesar da baixa concentração de SSV (4.840 mg/L).

O glicerol bruto (Tabela 1), por sua vez, revelou baixa concentração de metanol e elevada concentração de DQO, dentro de valores encontrados na literatura (NGHIEM et al., 2014; LÓPEZ et al., 2009). A baixa concentração de metanol indica que há uma recuperação eficiente deste reagente, utilizado na maioria das reações de transesterificação para produção de biodiesel. Tais concentrações não seriam inibitórias na digestão anaeróbia.



A caracterização da vinhaça (Tabela 1), apesar de uma boa relação de SSV/SST que foi de 0,55, indicando considerável quantidade de matéria orgânica biodegradável, esta apresenta o pH bastante ácido (4,5) e elevada concentração de metanol (2.300 mg/L). Tanto o pH quanto a concentração elevada de metanol podem prejudicar a digestão anaeróbia. O pH ácido está dentro da faixa reportada na literatura, segundo a qual, para resíduos alimentares, indicaram valores de pH na faixa entre 4 e 6, de acordo com a composição dos resíduos. (3,25-4,97) (PARSAEE et al., 2019). Quanto à umidade (96,6%), pode-se dizer que é praticamente a mesma do lodo em questão e dentro da faixa ótima para digestão anaeróbia (70-90%) (FERREIRA et al., 2018).

Ensaio de Co-Digestão envolvendo misturas Binárias

Na Tabela 2 são apresentados resultados obtidos no primeiro ensaio de co-digestão anaeróbia de lodo de esgoto com misturas binárias (LS+GB e LS+VI). Nota-se que, exceto pra mistura binária 99LS+1GB que teve uma queda de pH de 7,5 pra 5,8 e uma relação AVT/AT de 1,88, todas as demais condições mantiveram o pH na faixa ótima para digestão anaeróbia, bem como uma boa relação AVT/AT entre 0,2 e 0,5, que indicam boa capacidade de tamponamento (CHERNICHARO, 2007).

Houve o aumento da produção específica de biogás (PEB) para todas as misturas binárias testadas, entretanto devido à acidificação da condição com 99LS+1GB, provavelmente esse aumento de biogás se deu em função de gases produzidos (CO₂ e H₂) na fase acidogênica, uma vez que os microrganismos metanogênicos sofrem inibição em valores de pH menores que 6,3 (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994). Para as demais misturas, muito provavelmente a composição de biogás deve ter em sua maioria metano, que estaria de acordo com o pH e também a relação AVT/AT encontrados.

O valor da PEB foi maior em todas as misturas binárias. Entretanto, a melhor condição encontrada podemos dizer que foi para misturas binárias contendo 90LS+10VI e 99,5LS+0,5GB, com valores de 178 e 145 mLbiogás/gSSVaplicados, respectivamente, contra 96 mLbiogás/gSSVaplicados na condição controle, pois para essas misturas houve tamponamento do sistema como já discutido anteriormente. A baixa remoção de SSV para misturas contendo glicerol bruto deve-se ao fato de o GB ser uma ótima fonte de carbono e se caracterizar por elevada biodegradabilidade. Ferreira et. al. (2018), também reportaram valores entre 15 e 20% para remoção de SSV na co-digestão de lodo secundário com glicerol bruto.

Tabela 2: Resumo dos principais parâmetros analisados ao final ^b do ensaio com lodo secundário com glicerol bruto (GB) e/ou vinhaça (VI).

Mistura Lodo:Resíduo (v/v)(%)	Parâmetros ^a					
	pH inicial	pH final	Remoção SSV (%)	Biogás ^b (mL)	PEB ^c (mL/g SSV _{apl.})	AVT/AT
Controle	7,0	7,0	37,5±1,5	41,6±2	95,9±0,5	0,25
95LS:5VI	7,5	7,5	28,9±1,9	51,4±3	132,1±1,5	0,20
90LS:10VI	7,4	7,4	31,8±0,8	69,4±5	177,9±18	0,37
99LS:1GB	7,3	5,8	19,4±0,7	132,0±26,0	306,5±10	1,88
99,5LS:0,5GB	7,5	7,1	24,2±1,7	60,6±2,3	145,4±1,8	0,44

^a média ± desvio-padrão. ^b aos 45 dias. ^c medido a 24°C/1 atm. PEB = produção específica de biogás.

Ensaio de Co-Digestão envolvendo misturas Ternárias

Na Tabela 3 são apresentados resultados obtidos no segundo ensaio de co-digestão anaeróbia de lodo de esgoto com misturas ternárias (LS+VI+GB). Nota-se que, assim como nos ensaios com misturas binárias, aqui também houve queda do pH para misturas ternárias contendo 1%GB. A relação AVT/AT também ficou fora da faixa sugerida para uma boa digestão anaeróbia pra misturas contendo 1%GB. Para as demais misturas, tanto a faixa de pH (7-7,5) quanto a relação AVT/AT (0,11- 0,25) indicaram um bom tamponamento do sistema.

Houve o aumento da produção específica de biogás (PEB) para todas as misturas ternárias assim como para as misturas binárias testadas. Entretanto, devido à acidificação das misturas contendo 1% de GB, como já dito



anteriormente, o aumento de biogás decorreu dos gases produzidos na fase acidogênica (CO₂ e H₂). Assim como nas misturas binárias, para misturas ternárias o tamponamento do sistema, bem como outros fatores além da relação AVT/AT, contribuíram para uma boa digestão anaeróbia e provavelmente a composição desse biogás deve conter uma quantidade significativa de gás metano.

O valor da PEB foi maior em todas as misturas ternárias, assim como para as misturas binárias. A melhor condição encontrada foi para as misturas ternárias contendo 89,5LS+10VI+0,5GB, com valor de 520 mLbiogás/gSSVaplicados contra 96 mLbiogás/gSSVaplicados na condição controle (100% LS). Para essa mistura, também obteve-se a maior remoção de SSV (54%) contra (37,5%) para o controle. Apesar de não obtermos dados da relação C/N das misturas binárias/ternárias, essa relação deve estar favorável a metanogênese nessas condições, no caso com maior percentagem de VI e menor percentagem de GB. Na literatura a relação C/N para vinhaça pura fica na faixa de 11-15, valor ótimo para digestão anaeróbia (PARSAEE et al., 2019).

Tabela 3: Resumo dos principais parâmetros analisados ao final^b do ensaio com lodo secundário com glicerol bruto (GB) e Vinhaça (VI).

Mistura Ternária Lodo:VI:GB (v/v)(%)	Parâmetros ^a					
	pH inicial	pH final	Remoção SSV (%)	Biogás ^b (mL)	PEB ^c (mL/g SSV _{apl.})	AVT/AT
Controle	7,0	7,0	37,5±1,5	41,6±2	95,9±0,5	0,25
94,5LS:5VI:0,5GB	7,5	7,5	51,5±2,9	199,0±5,3	156,4±1,7	0,24
89,5LS:10VI:0,5GB	7,5	7,5	53,5±1,3	200,2±5	520,4±25,4	0,11
94LS:5VI:1GB	7,5	6,5	18,9±0,8	152,2±6,0	350,5±1,8	0,91
89LS:10VI:1GB	7,5	6,7	15,5±1,3	141,8±2,3	413,3±17	0,71

^a média ± desvio-padrão. ^b aos 45 dias. ^c medido a 24°C/1 atm. PEB = produção específica de biogás.

Misturas Binárias Vs Misturas Ternárias

Na Figura 3 é apresentada a evolução da produção de biogás na co-digestão de lodo com todas as misturas binárias e ternárias. Nota-se que houve estabilização na produção de biogás a partir do 30º dia para a maioria das condições binárias e após o 45º dia para as condições ternárias. Nota-se ainda que, para todas condições contendo 1% de GB, houve certa inibição na produção de biogás no início do processo. Tal inibição deve-se ao fato da instabilidade no sistema que já foi comprovada pelos valores de pH e relação AVT/AT mencionados acima.

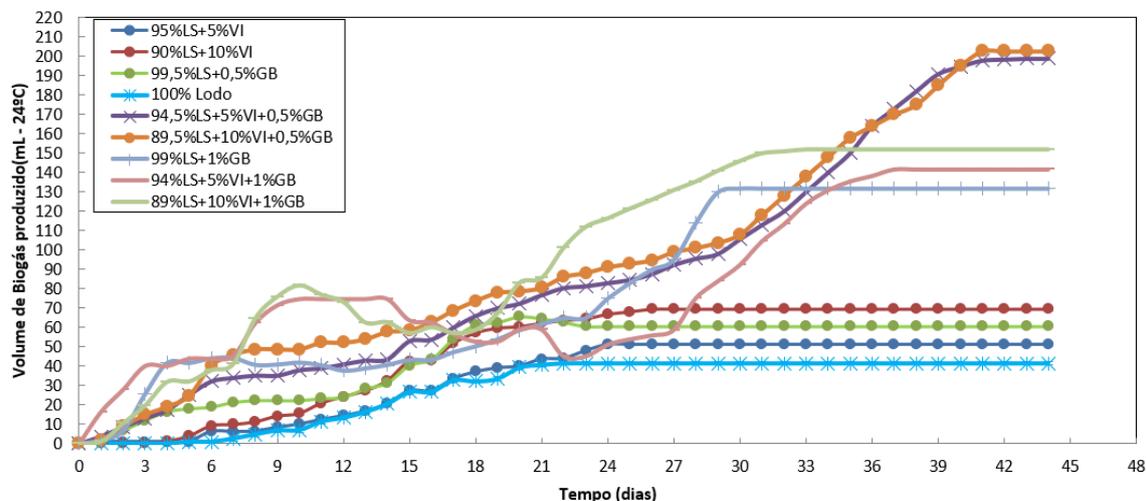


Figura 3: Volume de biogás (24°C) acumulado com lodo puro (100% lodo) e misturas binárias e ternárias até 45 dias de ensaio.

A Figura 4 apresenta um resumo dos principais parâmetros avaliados na co-digestão de misturas binárias e ternárias com resíduos de biocombustíveis.

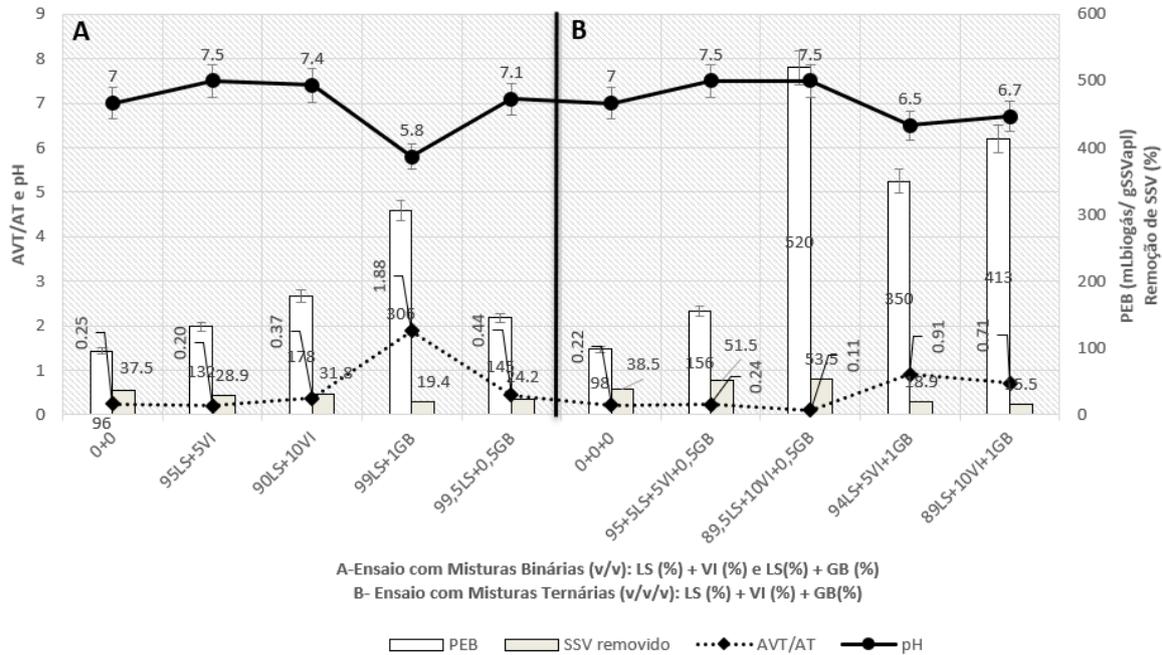


Figura 4: Produção Específica de Biogás, Remoção de SSV, relação AVT/AT e pH para todos ensaios de co-digestão envolvendo as misturas binárias e ternárias.

De acordo com a figura 4, podemos afirmar que, para misturas binárias, a melhor condição seria para maior percentagem de VI e menor percentagem de GB, que comprovamos nos resultados com as misturas ternárias, nos quais a melhor condição encontrada foi com 10% VI e 0,5% GB adicionados ao lodo secundário. Para essa condição houve um aumento de 5,4 vezes na produção de biogás em relação ao controle.

CONCLUSÕES

A co-digestão de misturas binárias e ternárias com lodo secundário e resíduos de biocombustíveis (glicerol bruto e vinhaça) resultou no aumento significativo da produção de biogás sem prejudicar a estabilização do sistema. A melhor condição encontrada foi para mistura ternária contendo 89,5,5% de LS, 10% VI e 0,5%GB, a qual manteve o tamponamento do sistema (AVT/AT = 0,11), e aumento de cerca de 5,4 vezes a produção de biogás em relação ao controle.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) desenvolvido pelo projeto sob número: 154331/2018-0.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. *American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18 ed., New York, 2005.
2. ATHANASOULIA, E., MELIDIS, P. & AIVASIDIS, A. *Co-digestion of sewage sludge and crude glycerol from biodiesel production. Renewable Energy*, 62, 73–78, 2014.
3. BONDIOLI, P. & DELLA BELLA, L. *An alternative spectrophotometric method for the determination of free glycerol in biodiesel. European Journal of Lipid Science and Technology*, 107(3), 153–157, 2005.
4. CHERNICHARO, C.A L. *Reatores anaeróbios – Edição revisada e ampliada*. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFGM, 379, 2007.
5. DEMIRBAS, A. *Tomorrow 's biofuels : Goals and hopes. Environmental Effects Tomorrow 's biofuels : Goals and hopes*, 39,673-679, 2017.
6. DILALLO, R., ALBERTSON, O. R. *Volatile acids by direct titration. Journal Water Pollution Control Federation*, 23, 356-365, 1961.
7. FERREIRA, J. S., VOLSCHAN, I., CAMMAROTA, M.C. *Co-digestion of sewage sludge with crude or pretreated glycerol to increase biogas production. Environmental Science and Pollution Research*, 25(22), 21811–21821, 2018.
8. LÓPEZ, J.A.S.; SANTOS, M.M.; PÉREZ, A.F.C., *Anaerobic digestion of glycerol derived from biodiesel manufacturing. Bioresource Technology*, v. 100, p. 5609–5615, 2009.
9. MATA-ALVAREZ, J., DOSTA, J., ROMERO-GUIZA., M. S. FONOLL., X. PECES., M., ASTALS, S. *A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427, 2014.
10. NGHIEM, L.D.; NGUYEN, T. T., MANASSA, P., FITZGERALD, K. S., VIERBOOM, S. *Co-digestion of sewage sludge and crude glycerol for on-demand biogas production. International Biodeterioration and Biodegradation*, v. 95, p. 160–166, 2014.
11. PARSAAE, M., KIANI, D., K., M., KARIMI, K. *A review of biogas production from sugarcane vinasse. Biomass and Bioenergy*, 117–125, 2019.
12. RIPLEY, L.E., BOYLE, W. C., CONVERSE, J. C. *Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digester of high-strength wastes. Journal Water Pollution Control Federation*, 58, 406-411, , 1986.
13. SANTOS, R.F., BORSOI, A., SECCO, D., SOUZA., M. S.N., CONSTANZI., R.N. *Brazil's potential for generating electricity from biogas from stillage. Bioenergy Technology*, 11,425–432., 2011.
14. BERNAL, A. P. *Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO2 emissions. Journal of cleaner production*, v. 151, p. 260-271, 2017.
15. CHERUBINI, F. *The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. Energy conversion and management*, v. 51, n. 7, p. 1412-1421, 2010.
16. REIJNDERS, L. *Conditions for the sustainability of biomass based fuel use. Energy policy*, v. 34, n. 7, p. 863-876, 2006.
17. SANTOS, R. F. *Braziland Potential for Generating Electricity from Biogas from Stillage. In: World Renewable Energy Congress-Sweden; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden. Linköping University Electronic p. 425-432. Press, 2011.*
18. HORAN, Nigel; YASER, Abu Zahrim; WID, Newati (Ed.). *Anaerobic Digestion Processes: Applications and Effluent Treatment*. Springer, 2018.
19. ZHAO, L. *Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge. Water Research*, v. 44, n. 20, p. 6144-6152, 2010.
20. HUILIÑIR, C., PINTO-VILLEGAS, P., CASTILLO, A., MONTALVO, S., GUERRERO, L. *Methane potential from sewage sludge: Effect of an aerobic pretreatment and fly ash addition as source of trace elements. Waste Management*, v. 64, p. 140-148, 2017.
21. KOCH, Konrad et al. *Co-digestion of food waste in a municipal wastewater treatment plant: comparison of batch tests and full-scale experiences. Waste management*, v. 47, p. 28-33, 2016.
22. VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. *Tratamento anaeróbio de esgoto. Um manual para regiões de clima quente*. Ed. Campina Grande, Brasil: Universidade da Paraíba, 1999.
23. TYAGI, V. K. *Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 93, p. 380-399, 2018.