



251 - PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DA CO-DIGESTÃO DE LODO DE ESGOTO COM RESÍDUOS ORGÂNICOS E GLICEROL BRUTO EM ESCALA PILOTO

Janaína dos Santos Ferreira⁽¹⁾

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 Júnior no Programa de Pós-graduação em Engenharia Química na Universidade Federal de Santa Catarina (EQA/UFSC).

Isaac Volschan Jr.⁽²⁾

Engenheiro Civil e Sanitarista pela Universidade Santa Úrsula (USU). D.Sc. em Engenharia de Produção (PEP/UFRJ). Professor Associado do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica/UFRJ.

Magali Christe Cammarota⁽³⁾

Engenheira Química pela Escola de Química (EQ/UFRJ). D.Sc. em Bioquímica (IQ/UFRJ). Professor Associado do Departamento de Engenharia Bioquímica, Escola de Química/UFRJ.

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: janajanee@hotmail.com;

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a codigestão anaeróbia de uma mistura ternária de lodo de esgoto com orgânicos (resíduos alimentares-RA) e glicerol bruto (GB) em escala piloto, a fim de aumentar a produção de metano em estações de tratamento de esgoto. Dois digestores anaeróbios (volume útil de 320 L) foram operados simultaneamente por 60 dias sob temperatura de 24°C média. O biodigestor denominado controle (D1), era alimentado apenas com lodo, já o biodigestor que recebeu a mistura ternária (lodo, RA e GB) foi denominado D2. A alimentação dos biodigestores foi realizada em regime semi-contínuo. O Tempo de detenção hidráulica (TDH) foi de 30 dias para ambos os biodigestores. O biodigestor alimentado apenas com lodo de esgoto apresentou maior instabilidade durante todo o período de operação, tendo em sua composição de biogás 23% de metano, remoção de sólidos voláteis (SV) de 65,3% e produção específica de metano (PEM) de 98,5 LNCH₄/kg/SV_{adicionado}. Já para o biodigestor com a mistura ternária obteve-se 43% de metano, remoção de SV de 73,4% e PEM de 174,5 LN de CH₄/ kg VS_{adicionado}. Os balanços de massa e energia mostraram que através da recuperação de metano, a mistura ternária contribuiu 12 vezes mais energeticamente do que os biodigestores alimentados com lodo de esgoto puro.

PALAVRAS-CHAVE: Co-digestão Anaeróbia, Resíduo Orgânico e Industrial, ETE Sustentável.

INTRODUÇÃO

A geração de efluentes de origem sanitária e industrial em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) pode gerar resíduos na forma sólida ou semissólida, denominados lodos. Os custos com gerenciamento do lodo são de aproximadamente 60% de todo custo de uma ETE (VON SPERLING, 2014).

Dentre as tecnologias para tratamento e aproveitamento do lodo de ETE a produção e o aproveitamento do biogás proveniente da digestão e co-digestão anaeróbia tornam-se uma solução cada vez mais atrativa, como uma tecnologia viável para produção de energia renovável, satisfazendo de certa forma, as crescentes preocupações com a segurança energética, impactos ambientais e aumento do custo de energia para o tratamento de águas residuais. A co-digestão, em especial, associada a outros resíduos de alto conteúdo de carbono, destaca-se como uma estratégia já comprovadamente viável (JENICEK et al., 2013).

No Brasil, a disposição de lodo de esgoto doméstico na agricultura segue a Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Resolução CONAMA nº 375/06) (BRASIL, 2006). Uma alternativa bastante interessante para destinação do lodo de esgoto digerido e/ou no caso do lodo de esgoto co-digerido com outros resíduos, seria o uso agrícola, pois promove a reciclagem de nutrientes, sendo benéfico ao cultivo de plantas e às características físico-químicas e biológicas do solo. Essa é uma alternativa mundialmente consolidada, que no Brasil, apesar de ser um país agroindustrial, é pouco explorada (PILNÁCEK ET AL., 2019).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a co-digestão de uma mistura ternária (lodo, resíduo alimentar e glicerol bruto) visando ao aumento da produção de metano. O estudo foi conduzido em escala piloto, com proporções da mistura (volume de lodo: volume de resíduo alimentar: volume de glicerol), pré-estabelecidos de estudos anteriores.

METODOLOGIA

Origem e Caracterização dos Resíduos

O lodo foi proveniente de sistema de lodos ativados convencional do Centro Experimental de Saneamento Ambiental (CESA-UFRJ), localizado na Universidade Federal do Rio de Janeiro, e caracterizado em relação aos sólidos totais fixos (STF) e voláteis (STV), carbono, nitrogênio e umidade (APHA, 2005). O resíduo alimentar (RA) foi proveniente do Restaurante Universitário do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Este RA foi submetido a uma redução de tamanho e homogeneização, sendo triturado em liquidificador com adição de água (o suficiente para que a umidade da mistura fosse igual a do lodo utilizado) e, posteriormente, submetido a uma caracterização físico-química. O Glicerol bruto foi quantificado pelo método de Bondioli e Bella (2005), demais parâmetros (umidade, sólidos, DQO) foram determinados por métodos padrão (APHA, 2005). Os resultados, dos resíduos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do lodo, Resíduo Alimentar e Glicerol.

Parâmetro	Resíduo Alimentar
pH	5,15
Umidade (%)	73,2
Carbono (%) ^a	51,6
Nitrogênio (mg/g) ^a	8,0
Fósforo (mg/g) ^a	0,03
Carboidratos (mg/g) ^a	83,3
Proteínas (mg/g) ^a	97,7
Óleos e graxas (mg/g) ^a	260,4
Sólidos Totais (mg/g) ^b	267,68
Sólidos Fixos (mg/g) ^b	16,31
Sólidos Voláteis (mg/g) ^b	251,37

^a mg/ g base seca; ^b mg/g peso úmido

Parâmetro	Lodo CESA
ST (mg/L)	1846
STF mg/L)	926
STV mg/L)	920
C (%) ^a	36,2
N (%) ^a	3,8
Umidade (%)	98,5

^a g/100 g base seca

Parâmetro	Glicerol
% Glicerol (m/m)	74,0
Salinidade (mg Cl ⁻ /L)	37100
Metanol (mg/L)	19
DQO (g/L)	1119
Carbono Total (g/L)	411
Umidade (%)	8

Partida e Operação dos Biodigestores Piloto

Antes da operação dos biodigestores com a mistura ternária (lodo, resíduo orgânico e glicerol bruto) ocorreu a partida desses biorreatores, os quais foram operados por 200 dias em TDHs diferentes (15 e 30 dias) a fim de se encontrar a melhor condição bem como a adaptação dos biodigestores. Uma bomba de recirculação garantia que, a cada 8 horas, todo o volume do digestor fosse recirculado, como sugere a literatura (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

A alimentação dos biodigestores (volume útil de 320 litros) foi realizada em regime semi-contínuo, duas vezes por semana. Um determinado volume de lodo secundário (40L) era descartado e repostado, de modo que o tempo de detenção hidráulica (TDH) pré-determinado fosse mantido. Um desenho esquemático de todo o procedimento de alimentação e descarte de lodo nos digestores é mostrado na Figura 1. Além das alimentações e retiradas semi-contínuas, a cada seis meses era realizado um descarte de lodo do fundo dos digestores (lodo digerido) e esse mesmo volume era repostado com lodo bruto, a fim de manter a eficiência do processo, conforme recomendado na literatura (JORDÃO & PESSÔA, 2014).

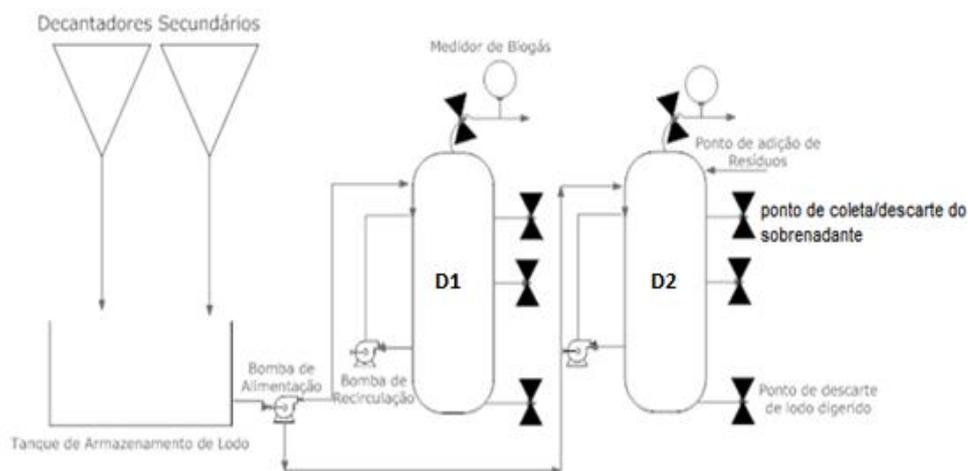


Figura 1. Desenho esquemático do sistema experimental dos biodigestores.
Fonte: Ferreira et al. (2018)

Monitoramento dos biodigestores em escala piloto

Os parâmetros de monitoramento dos biodigestores em escala piloto foram: volume e composição de biogás, sólidos suspensos totais (fixos e voláteis), pH, temperatura e alcalinidade. Algumas análises como pH, temperatura e produção de biogás eram diárias, já outras como sólidos, alcalinidade e composição do biogás eram semanais.

O volume de biogás era mensurado através de medidores de volume de biogás da marca Ritter TG 0,5/1, com vazão máxima de 1 L/h, acompanhados de um software (RIGAMO) que registra o volume de biogás medido a cada 30 min. A composição do biogás foi mensurada em equipamento portátil (GEM 2000 da marca LANDTEC).

O registro de biogás era fechado por aproximadamente 30min, até que se acumulasse uma quantidade de biogás suficiente para a leitura. Então, o aparelho era conectado à mangueira e realizada a leitura por cerca de 1 min ou até que as percentagens de CH₄ e CO₂ estabilizaram, sendo este procedimento feito em triplicata. O pH e a temperatura foram monitorados por controladores automatizados da marca ETATRONDS (eControl), sendo os dados armazenados a cada 30 min em um cartão SD acoplado ao sistema.

RESULTADOS

Codigestão em biodigestores semi-contínuos em escala piloto

Os parâmetros medidos durante os 60 dias de operação da codigestão após adição da mistura ternária estão resumidos na Tabela 2, divididos em dois períodos de operação de 30 dias cada.

Fica evidente, pelo aumento da PEM em relação ao controle, que a mistura ternária favoreceu a metanogênese. Uma das explicações para o valor da PEM de 174,5 mL CH₄/g SVaplicados contra 98,5 mL CH₄/g SVaplicados, totalizando um aumento de 1,8 vezes, deve-se à boa relação AVT/AT (0,3), à sinergia entre os substratos e também à maior disponibilidade de carbono proveniente de glicerol bruto (ATHANASOULIA et al., 2014).

Além disso, notou-se que a remoção de SV (73,4%) na codigestão da mistura ternária foi melhor em relação ao controle (65,3%). Esses valores para mistura ternária comprovam a boa sinergia entre os substratos para codigestão e aumento da produção de metano, já que para as misturas binárias em batelada (lodo+GB) ou (lodo+RA) reportado por Ferreira et al., (2017) em escala de bancada sob temperatura controlada não se obteve uma eficiência de remoção de SV tão elevada, atingindo valores em média de 18% e 67%, respectivamente.

Tabela 2. Principais Resultados obtidos durante 60 dias de operação dos biodigestores semi-contínuos em escala piloto, operados com TDH 30d.

Parâmetro	D1 (Controle)		D2 (Mistura ternária)	
	1º mês	2º mês	1º mês	2º mês
T (°C)	24,5±1,9	22,5±1,2	24,5±1,9	23,2±0,6
pH _f	6,9±0,3	6,9±0,1	5,6±0,5	6,1±0,5
AVT/AT	0,43±0,18	0,25±0,11	1,31±0,85	0,32±0,06
Remoção SV (%)	35,4±20,3	65,3±7,3	42,9±21,4	59,2±21,5 (73,4±6,0) ^c
CH ₄ (%)	23,3±7,5	20,7±5,9 (23,0±1,6) ^c	14,0±7,1	37,2±9,6 (43,0±4,2) ^c
PEB (mL/g SSV _{apl}) ^a	369,2	440,1	665,9	464,4
PEM (mL CH ₄ /g SSV _{apl}) ^b	86,0	98,5	93,2	174,5

^a = determinadas em gráfico de volume acumulado x SSV aplicados ou removidos acumulados; ^b valor calculado a partir da PEB (Produção Específica de Biogás) e % CH₄; ^c valor obtido em período estável. f = final.

Pode-se ainda dizer, que sob temperatura média de 24°C, obteve-se melhores resultados em comparação aos ensaios com misturas ternárias sob temperatura controlada (30°C) em escala de bancada (FERREIRA et al., 2017).

Balanco de Massa e Energia

Levando em consideração os resultados obtidos na operação dos biodigestores em escala piloto, dados da literatura e recomendações de Andreoli et al. (2001), foi realizado um balanço de massa e energia. Na Tabela 3 são apresentados valores utilizados no balanço de massa e energia dos biodigestores D1 e D2, sendo utilizada uma base de cálculo de 1 dia para o balanço. Considerando uma vazão de 10,7 L/d de lodo secundário ou da mistura ternária nos biodigestores e uma densidade de 1 kg/L para ambas as misturas, partiu-se de uma massa de 10,7 kg.

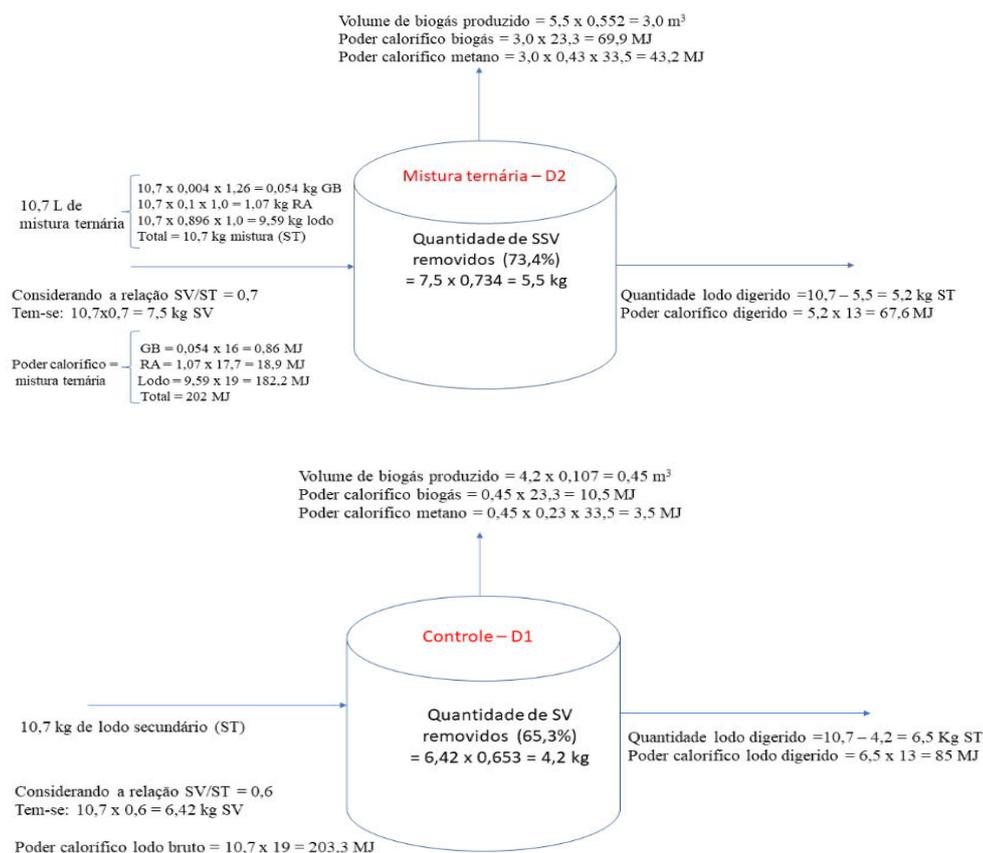
No balanço de massa e energia apresentado na Figura 2, verifica-se que no digestor D1 o biogás produzido diariamente a partir da digestão do lodo pode gerar 3,5 MJ, enquanto o lodo digerido mantém um potencial energético de 85 MJ. A soma da energia produzida (88,5 MJ) é menor que a obtida do lodo bruto. No digestor D2 os valores de energia produzida (110,8 MJ) são 25% maiores que em D1, tornando a digestão anaeróbia mais interessante do ponto de vista energético.

O volume de metano produzido diariamente em D2 (1,29 m³) é 12 vezes maior que o produzido em D1 (0,103 m³), comprovando que a codigestão da mistura ternária contribui para o aumento da produção de metano. Ao converter metano em energia elétrica, uma produção mensal de 38,7 m³ de metano poderia gerar 1296 MJ/mês ou 360 kWh/mês. Considerando um consumo energético de 167 kWh/mês por família constituída de 3 pessoas, em média (EPE, 2014), o valor obtido seria suficiente para fornecer a energia consumida por duas famílias.

necessários para efetuar o balanço de massa e energia em D1 e D2.

Parâmetros	Biodigestores		Referências
	D1	D2	
Relação SV/ST	0,6	0,7	Este estudo
Sólidos voláteis removidos (%)	65,3	73,4	Este estudo
Porcentagem de metano no biogás (%)	23,0	43,0	Este estudo
PEB (m ³ /kg SSV _{removidos})	0,107	0,552	Este estudo
Poder calorífico do lodo bruto (MJ/kg ST)	19,0		Kim e Parker (2008)
Poder calorífico do lodo digerido (MJ/kg ST)	13,0		Andreoli et al. (2001)
Poder calorífico do resíduo alimentar (MJ/kg ST)	17,7		Giudicianni et al. (2015)
Poder calorífico do glicerol bruto (MJ/kg ST)	16,0		Bohon et al. (2011)
Poder calorífico do biogás (MJ/m ³)	23,3		Andreoli et al. (2001)
Poder calorífico do metano (MJ/m ³)	33,5		Jordão e Pessôa (2014)

PEB = Produção Específica de Biogás.



**Figura 2. Balanço de massa e energia para os biodigestores semi-contínuos em escala piloto.
Fonte: Ferreira et al., (2018).**



CONCLUSÕES

A co-digestão da mistura ternária mostrou-se mais eficiente em relação ao controle (apenas lodo). Notou-se um aumento de 1,8 vezes na PEM, que foi de 174,5 mL CH₄/g SV aplicados, sem prejudicar a estabilização do sistema que mostrou uma remoção de SV de 73% para TDH de 30 dias. No balanço de massa e energia, verificou-se um aumento de 12 vezes na energia produzida pela mistura ternária em relação ao controle. A acidificação causada pela adição de glicerol bruto e resíduos de alimentares ao lodo devem ser evitados através do ajuste de pH no início de operação do digestor. A maior carga orgânica introduzida no digestor alimentado com a mistura ternária proporcionou uma maior disponibilidade de produtos biológicos biodegradáveis e, conseqüentemente, uma maior produção de biogás /metano. Além do potencial energético verificado nesse trabalho, a verificação do potencial dos resíduos co-digeridos seria uma outra alternativa sustentável e ambientalmente correta, além de um possível atendimento a resolução CONAMA nº 375/06.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI, C. V.; PINTO, M. A. T. Processamento de lodos de estações de tratamento de esgotos (ETTs). In: Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. p. 282.
2. ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodos de esgotos – tratamento e disposição final. In: Rio de Janeiro: ABES, 2001. p. 484.
3. APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18. ed. New York: American Public Health Association, 2005.
4. ATHANASOULIA, E.; MELIDIS, P.; AIVASIDIS, A. *Co-digestion of sewage sludge and crude glycerol from biodiesel production*. *Renewable Energy*, v. 62, p. 73–78, 2014.
5. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, 2006.
6. BOHON, M. D. et al. *Glycerol combustion and emissions*. *Proceedings of the Combustion Institute*, v. 33, n. 2, p. 2717–2724, 2011.
7. BONDIOLI, P.; DELLA BELLA, L. *An alternative spectrophotometric method for the determination of free glycerol in biodiesel*. *European Journal of Lipid Science and Technology*, v. 107, n. 3, p. 153–157, 2005.
8. EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. 1. ed. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2014.
9. FERREIRA, J. S.; CAMMAROTA, M. C.; VOLSCHAN, I. *Optimization of Methane Production Based on Mixture Content of Sewage Sludge, Food Waste, and Glycerol*. *Journal of Energy and Power Engineering*, v. 11, n. 9, p. 569–583, 2017.
10. FERREIRA, J. S.; VOLSCHAN, I.; CAMMAROTA, M. C. *Enhanced Biogas Production in Pilot Digesters Treating a Mixture of Sewage Sludge, Glycerol, and Food Waste*. *Energy and Fuels*, v. 32, n. 6, 2018.
11. GIUDICIANNI, P. et al. *Thermal and mechanical stabilization process of the organic fraction of the municipal solid waste*. *Waste Management*, v. 44, p. 125–134, 2015.
12. JENICEK, P. et al. *Energy self-sufficient sewage wastewater treatment plants: Is optimized anaerobic sludge digestion the key*. *Water Science and Technology*, v. 68, n. 8, p. 1739–1743, 2013.
13. JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.
14. KIM, Y.; PARKER, W. A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 5, p. 1409–1416, 2008.
15. PILNÁČEK, V., INNEMANOVÁ, P., ŠERES, M., MICHALIKOVÁ, K., STRANSKÁ, WÍMMEROVÁ, L., & CAJTHAML, T. *Micropollutant biodegradation and the hygienization potential of biodrying as a pretreatment method prior to the application of sewage sludge in agriculture*. *Ecological Engineering*, 2019.
16. VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. In: 4a ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. p. 470.