

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA CODIGESTÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA, VINHAÇA E GLICEROL BRUTO EM REATOR COM ALIMENTAÇÃO SEMICONTÍNUA

e-Xacta

ISSN: 1984-3151

BIOGAS PRODUCTION FROM CO-DIGESTION OF WASTE WATER SWINE, VINASSE AND CRUDE GLYCEROL IN A SEMI CONTINUOUS OPERATING REACTOR

**Thompson Ricardo Weiser Meier¹; Paulo André Cremonez²; Adriane Cristina Mattjie³;
Emanuelle Iaçana Berté Parisotto⁴; Jonathan Dieter⁵; Joel Gustavo Teleken⁶**

- 1 Mestre em Bioenergia. UFPR, 2016. Técnico de Laboratório da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Palotina, Pr. thompson@ufpr.br.
- 2 Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, 2015. pa.cremonez@gmail.com.
- 3 Bacharel em Química. Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, 2012. acmattjie@gmail.com.
- 4 Mestre em Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2016. manuparisotto@gmail.com.
- 5 Doutor em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, 2013. Professor da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Palotina, Pr. jdieter@ufpr.br.
- 6 Doutor em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2013. Professor da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Palotina, Pr. joel.teleken@ufpr.br.

Recebido em: 30/08/2016 - Aprovado em: 06/11/2016 - Disponibilizado em: 30/11/2016

RESUMO: O estudo teve como objetivo a avaliação da produção de biogás utilizando como substrato misturas de glicerol bruto, vinhaça e água residual de suinocultura (ARS), visando o estudo dos efeitos destes substratos tanto na eficiência de tratamento dos efluentes, como no volume de gás produzido. Inicialmente, foi determinada a mistura ótima destes substratos utilizando reatores em escala laboratorial em regime batelada. Os melhores resultados tanto para a produção de metano quanto para a remoção da carga orgânica nos efluentes foram obtidos utilizando concentrações de vinhaça e glicerol nas concentrações de 5%. Já a mistura ótima destes substratos foi de 3,22 % para a vinhaça e 4,28 % de glicerol. Na sequência, foi realizada a biodigestão em regime semicontínuo utilizando as proporções obtidas para a mistura ótima, alcançando incrementos na produção de metano da ordem de 300%.

PALAVRAS-CHAVE: Biodigestão. Metano. Biogás.

ABSTRACT: *The study aimed to assess the biogas production using crude glycerol mixtures, vinasse and waste water swine (ARS) as substrate, aimed at study of effects of these substrates in the efficiency of effluent treatment, as the volume of gas produced. It was initially given the optimum mix of these substrates using laboratory-scale reactors in batch operation. The best results both for the production of methane as the removal of the organic load in effluents were obtained using concentrations of vinasse and glycerol at concentrations of 5%. Already the great mixture of these substrates was 3.22 percent to stillage and 4.28% glycerol. Following, the semi-continuous biodigestion using the proportions obtained for optimum mixing reached increments on methane production in the order of 300%.*

KEYWORDS: *Biodigestion. Methane. Biogas.*

1 INTRODUÇÃO

A codigestão anaeróbia é um processo que utiliza simultaneamente dois ou mais resíduos como substrato, e tem como principal objetivo incrementar a produção de biogás (BELLE *et al.*, 2015; YAO *et al.*, 2014; LINKE *et al.*, 2013).

Em processos que empregam a codigestão, é interessante que os substratos tenham características físico-químicas diferentes e que se complementem para resultar em maiores produções de biogás e eficiência na remoção da carga orgânica dos substratos (BELLE *et al.*, 2015).

Segundo Xie *et al.* (2011) e Sosnowski, Wieczorek e Ledakowicz (2003) a codigestão anaeróbia pode aumentar o rendimento de biogás, melhorar a capacidade de tamponamento do sistema, diminuir a inibição por potenciais tóxicos e proporcionar relação C/N adequada para o processo.

Jingura e Matengaifa (2009) afirmam que a codigestão proporciona benefícios múltiplos, tais como a facilitação de um desempenho estável, além gerar um produto digerido com baixo teor de matéria orgânica e um aumento na produção de biogás.

Entretanto, a proporção e composição dos substratos a serem usados na codigestão anaeróbia é um fator que interfere diretamente na estabilidade do processo (YAO *et al.*, 2014).

Nesse sentido, o glicerol bruto, por conter elevado teor de carbono, tende a melhorar o processo de produção de biogás e metano em substratos contendo grandes

quantidades de nitrogênio, como os resíduos suínos (CASTRILLÓN *et al.*, 2013).

Pesquisas realizadas com vinhaça indicam que é possível a produção de até $1000L_{CH_4} d^{-1}m^{-3}_{vinhaça}$. Entretanto, por se tratar de um resíduo de difícil degradação, a vinhaça tem sido codigerida com outros substratos que apresentem maior facilidade de serem metabolizados pelos microorganismos (LOVATO; RATUSZNEI; RODRIGUES, 2015).

Diversos estudos têm utilizado a codigestão de glicerol com outros substratos que contenham menor carga orgânica e maiores concentrações de nitrogênio, como a água residuária de suinocultura (ARS) (SERRANO *et al.*, 2014; ATHANASOULIA; MELIDIS; AIVASIDIS, 2014; MARTIN *et al.*, 2013; ASTALS; NOLLA-ARDÈVOLB; MATA-ALVAREZA, 2013; RIVERO; SOLERA; PEREZ, 2014; NARTKER *et al.*, 2014). Dessa forma, optou-se por realizar o estudo do perfil de produção de biogás e metano em reator de escala piloto com alimentação semi-contínua de água ARS, glicerol bruto e vinhaça.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 SUBSTRATOS E INÓCULO

Para a realização dos experimentos foram utilizados como substratos água residuária de suinocultura (ARS), glicerol bruto e vinhaça. O glicerol utilizado foi proveniente da produção de biodiesel empregando catálise homogênea básica (com hidróxido de sódio atuando como catalisador e metanol como álcool de cadeia curta), e utilizando como matéria-prima óleo

residual da cocção de alimentos; enquanto a vinhaça é proveniente da produção de bioetanol obtido da fermentação de caldo de cana-de-açúcar.

A ARS foi obtida de matrizeiro de suínos com capacidade para 900 animais localizado na cidade de Palotina-PR, enquanto que o glicerol residual e a vinhaça foram obtidos do Laboratório de Produção de Biocombustíveis, da Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina.

O inóculo utilizado nos experimentos foi obtido em propriedade localizada no município de Palotina-PR, Brasil, proveniente de biodigestor modelo canadense operado com resíduos líquidos de suinocultura.

Para a obtenção da composição da mistura ótima foi realizado o processo de biodigestão em escala laboratorial. Foi realizado um delineamento de misturas utilizando o Software Statistica v. 7.0, com aplicação da modelagem *simplex-centroid* com três repetições do ponto central para a obtenção das composições a serem testadas. Utilizando a ferramenta de “desejabilidade” foi possível a obtenção dos valores ótimos da composição da mistura.

2.2 BIODIGESTORES E GASÔMETROS

Para o sistema de biodigestores e gasômetros foram empregados dois reatores com operação semi-contínua construídos em PVC (polivinilcloro), com volume total de aproximadamente 65 litros. O volume de trabalho utilizado foi de 50 L. A Figura 1 contém o esquema construtivo dos biodigestores.

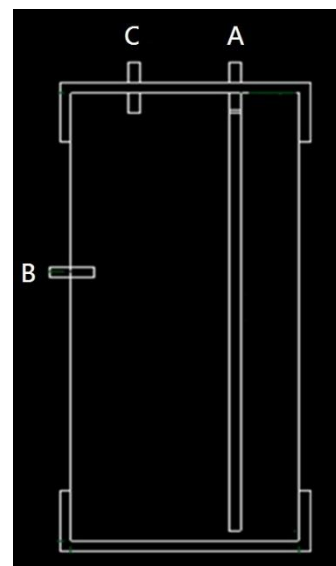


Figura 1 – Esquema construtivo dos biodigestores, onde: A) Entrada do substrato acoplado a mangueira de alimentação dos biodigestores; B) Saída do efluente; C) Saída do Biogás.
Fonte – Próprio autor.

Como é possível observar na Figura 1, os reatores foram construídos de tal forma que o substrato tenha um fluxo ascendente, minimizando a formação de uma camada espessa de lodo depositada no reator.

Os reatores foram dispostos em estufa e a temperatura mantida em 35 °C ($\pm 1,0$ °C) durante todo o processo empregando sistema contendo aquecedor e termostato digital marca FullGauge®, modelo TIC-17RGTi.

Todo o sistema de captação do efluente digerido e coleta do biogás foi construído externamente às estufas. Os gasômetros ficaram parcialmente submersos em tanques contendo solução 25 % (v/v) de cloreto de sódio e 3 % (v/v) de ácido sulfúrico, de forma a impedir a difusão do biogás e a dissolução do CO₂ presente no biogás (LARSEN, 2013).

Com essa disposição, o volume de biogás produzido pode ser determinado através do deslocamento vertical dos gasômetros e posterior correção para condições normais de temperatura e pressão (CNTP), empregando a Equação Geral dos Gases.

2.3 ALIMENTAÇÃO DOS BIODIGESTORES

Com o intuito de comparar o incremento na produção de biogás, a alimentação dos biodigestores foi dividida em três fases. Durante a Fase 1 optou-se por adotar sistema batelada para a adaptação dos microrganismos aos biodigestores. Já nas fases seguintes os biodigestores foram operados com alimentação semicontínua, o período de retenção foi fixado em 15 dias, resultando em uma alimentação diária de 3,33 L de substrato. Foi realizado o acompanhamento diário dos parâmetros pH (potencial hidrogeniônico), DQO (demanda química de oxigênio), ST (sólidos totais) e SV (sólidos voláteis), tanto na mistura de substratos quanto no efluente dos reatores. Durante a Fase 2 foi realizada a alimentação somente com ARS até que os biodigestores estabilizassem, ou seja, até que a produção diária de biogás e metano não sofresse alteração durante um período de 10 dias.

Só então foi iniciada a Fase 3, com a alimentação do biodigestor com a mistura otimizada contendo ARS, glicerol bruto e vinhaça. Essa Fase perdurou até que os biodigestores tivessem sua produção de biogás estabilizada.

Tanto os substratos como o efluente dos biodigestores foram submetidos a testes de potencial hidrogeniônico (pH), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais (ST) e sólidos totais voláteis (SV) com o propósito de avaliar a eficiência no tratamento dos resíduos empregados na biodigestão. As metodologias empregadas nas análises estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Métodos empregados na determinação dos parâmetros.

Parâmetro	Método
pH	Potenciométrico (4500-H* / APHA, 1995)
DQO	Colorimétrico (5220-D / APHA, 1995)
ST	Gravimétrico (2540-B / APHA, 1995)
SV	Gravimétrico (2540-E / APHA, 1995)

Fonte – Próprio autor.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás foi caracterizado quanto ao teor de metano e dióxido de carbono. Para as análises, foi empregado o kit de análise de biogás da empresa AlfaKit®, com metodologia utilizada pela rede oficial de laboratórios de solos da EMBRAPA (Empresa

Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e que apresenta precisão de 2,5 %. A ficha técnica do kit de análise utilizado está contida na Tabela 2.

Tabela 2. Ficha técnica e limite de detecção do kit de análise do biogás.

Parâmetro	Método	Informação
Metano/Dióxido de Carbono	ORSAT	0-100 % Resolução de 2,5 %

Fonte – Alfakit.ind.br (2013).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a otimização da mistura foram realizados ensaios de escala laboratorial e a partir dos resultados obtidos foi construído o gráfico de desejabilidade (Figura 2) a fim de maximizar a produção de biogás, porcentagem de metano, volume de metano, remoção de DQO,

remoção ST e SV, e pH mais próximo da neutralidade. Além disso, o gráfico de desejabilidade teve como objetivo minimizar os contaminantes do biogás: ácido sulfídrico e amônia. Dessa forma, a partir do gráfico, foram obtidos os valores ótimos de composição da mistura.

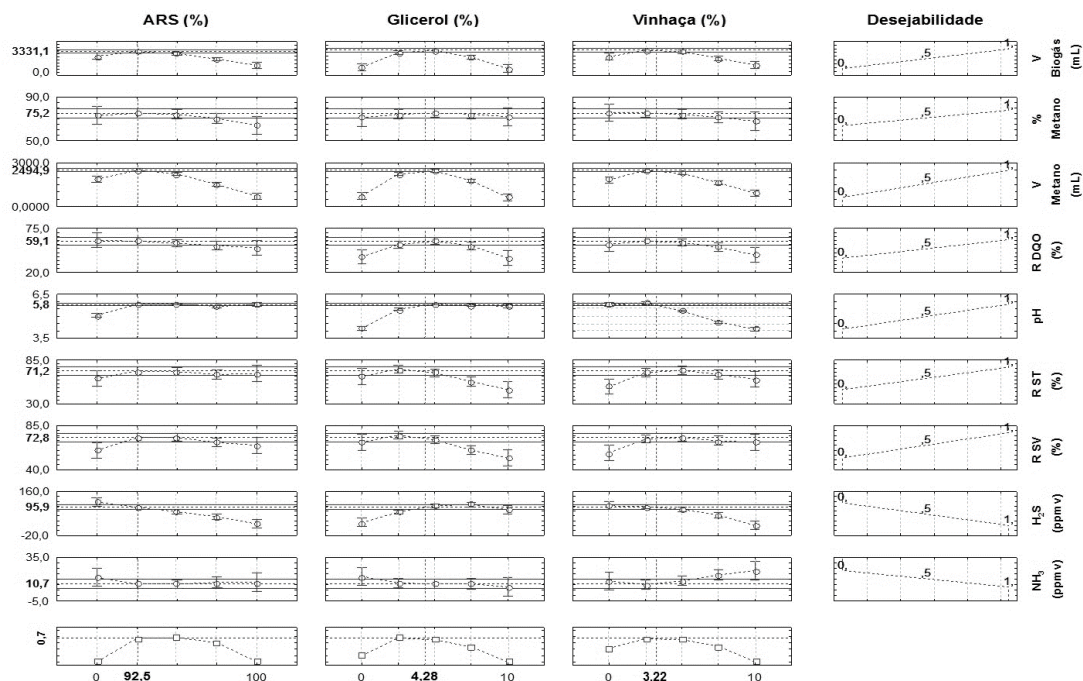
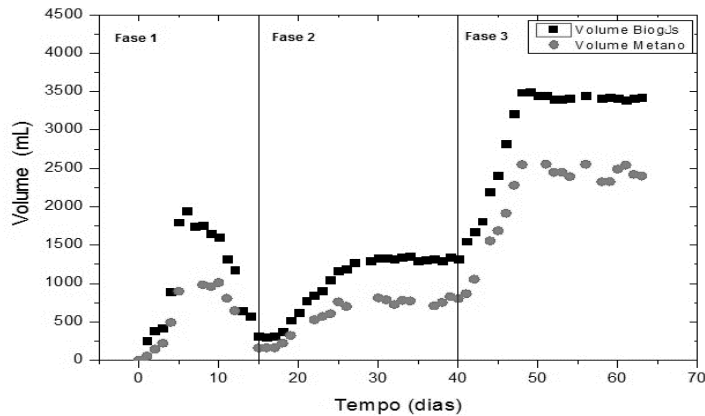


Figura 2 – Gráfico de desejabilidade do processo de biodigestão anaeróbia.
Fonte – Próprio autor.

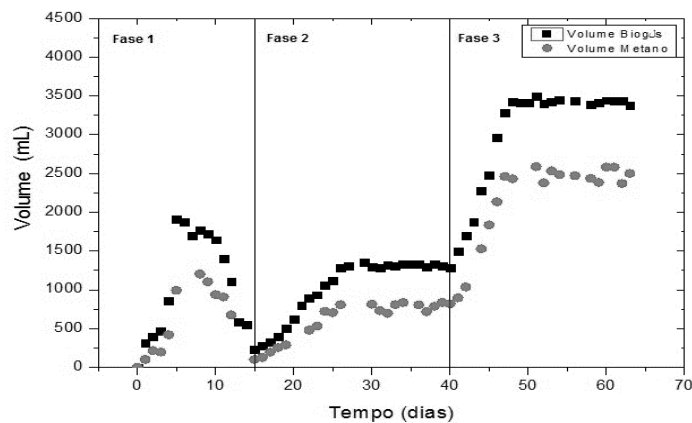
A composição ideal da mistura obtida foi de 92,5 % de ARS, 4,28 % de glicerol residual e 3,22 % de vinhaça. O valor ótimo determinado para o glicerol corrobora outros estudos que avaliaram o glicerol como aditivo na biomassa visando a produção de biogás (CREMONEZ, 2015; MARTÍN *et al.*, 2013). Valores maiores de glicerol podem promover a acidificação do meio pela grande disponibilidade de matéria orgânica disponível, que acelera a fase acidogênica da

biodigestão.

A partir dos resultados obtidos para a produção de biogás e metano nos reatores foi possível acompanhar o perfil de produção destes gases, que está expresso na Figura 3 (A e B).



A



B

Figura 3 – Perfil de produção de biogás e metano em mL. A- Biodigestor 1; B- Biodigestor 2.
Fonte – Próprio autor.

Durante os primeiros 15 dias de biodigestão, enquanto o sistema foi operado em regime batelada utilizando como substrato somente ARS, foi observado em ambos os biodigestores um período de máxima produção, que persistiu por 5 dias, tanto de biogás, alcançando valores próximos a 2000 mL.d⁻¹, como de metano, cuja produção ficou em torno de 1000 mL.d⁻¹. Após esse período, ocorreu uma queda na produção desses gases provocada pela redução da disponibilidade de carga orgânica no substrato. A partir do 15º dia, os biodigestores foram operados em sistema semicontínuo, no entanto, foi utilizado como substrato até o 40º dia somente ARS. Nesse

período foi verificado que a produção de biogás levou cerca de 10 dias para estabilizar. A produção média de biogás no biodigestor 1 foi de 1318 mL.d⁻¹ com uma porcentagem média de metano de 58,8 % resultando em um volume de 775 mL.d⁻¹ deste gás. Já o biodigestor 2 apresentou uma produção média de 1313 mL.d⁻¹ de biogás com porcentagem média de metano de 59,5 % resultando em uma produção média de 782 mL.d⁻¹. Após a estabilização dos biodigestores com ARS como substrato, foi observada que a produção diária tanto de biogás como de metano foi inferior aos valores máximos obtidos enquanto os biodigestores

foram operados em batelada. Isto ocorreu por que quando o sistema opera com alimentação semicontínua, o substrato apresenta um gradiente negativo de carga orgânica conforme percorre o biodigestor.

A partir do 40º dia, iniciou-se a alimentação dos biodigestores com a mistura otimizada nos reatores em batelada, contendo ARS, glicerol e vinhaça nas proporções de 92,5 %, 4,28 % e 3,22 % respectivamente. Logo no segundo dia de alimentação da mistura, já foi verificado um aumento na produção de metano, no reator 1, ao 42º dia a produção de metano que tinha uma média de 775 mL.d⁻¹ produziu 802 mL, enquanto que o reator 2 que tinha uma média de 782 mL.d⁻¹ produziu 837 mL. Já no quinto dia de alimentação com a mistura otimizada, as produções de metano foram de 1688 mL no reator 1 e de 1835 mL no reator 2.

Após o início da alimentação com a mistura otimizada, o processo de biodigestão levou 8 dias para estabilizar. A produção média de biogás foi de 3425 mL.d⁻¹ e de 3423 mL.d⁻¹ para os biodigestores 1 e 2, respectivamente. Resultando em um incremento

na produção de biogás de 259,8 % para o biodigestor 1 e de 260,7 % para o biodigestor 2.

Com relação à composição do biogás, a porcentagem média de metano produzida no biodigestor 1 passou de 58,8 % quando alimentado somente com ARS, para 71,2 % quando alimentado com a mistura de ARS, vinhaça e glicerol, enquanto que no biodigestor 2 a porcentagem de metano passou de 59,5 % para 72,3 %.

Dessa forma, a produção média de metano passou a ser de 2440 mL d⁻¹ no biodigestor 1 e de 2476 mL.d⁻¹ no biodigestor 2. Assim, a produção de energia no biodigestor 1 passou de 27,7 KJ.d⁻¹ para 87,3 7 KJ.d⁻¹, enquanto que no biodigestor 2 a produção de energia passou de 27,9 KJ.d⁻¹ para 88,6 KJ.d⁻¹. Para ambos os biodigestores o incremento na produção de energia ficou próximo a 60 KJ.d⁻¹, cerca de três vezes a geração de energia quando utilizado somente ARS como substrato.

A Figura 4 contém a produção acumulada de metano durante um período de 10 dias após a estabilização dos biodigestores com ARS e com as misturas de ARS, vinhaça e glicerol.

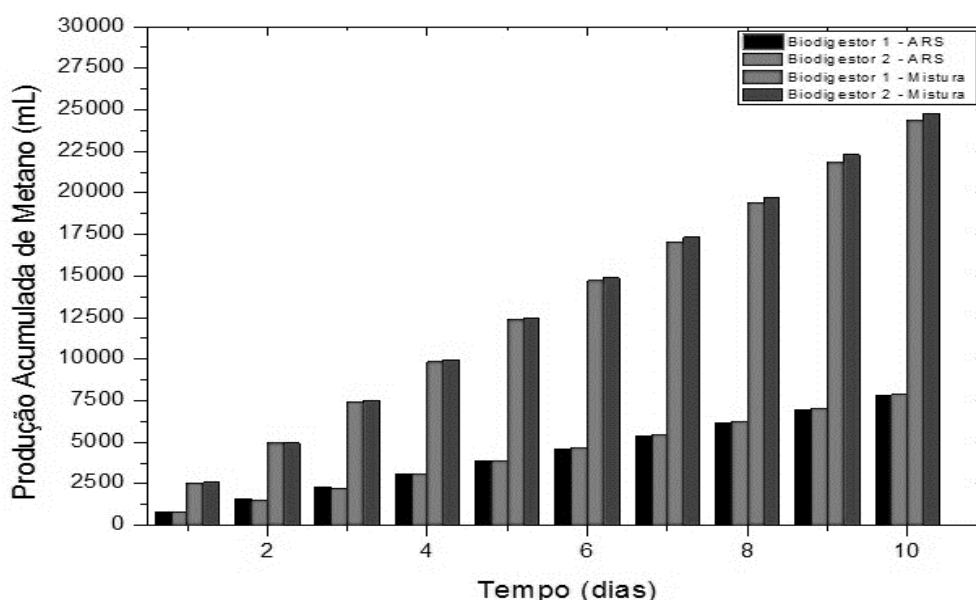


Figura 4 – Produção acumulada de metano.
Fonte – Próprio autor.

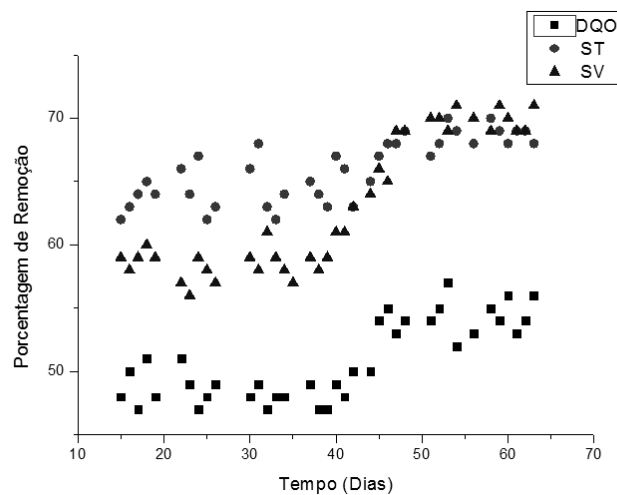
Os resultados obtidos para a produção acumulada de biogás utilizando vinhaça e glicerol são bastante promissores visto que, na Figura 4, é possível evidenciar um expressivo aumento na produção de metano durante um período de dez dias, comparado ao volume de metano produzido utilizando apenas ARS.

Nartker *et al.* (2014) adicionaram glicerol em águas residuais em concentrações entre 19 e 65 % da taxa orgânica total das misturas. A faixa ótima de adição de glicerol ficou entre 25 e 60 %, obtendo um acréscimo na produção de metano entre 82 e 280 %. Já Papong *et al.* (2014) obtiveram incrementos na produção de até 108 %, através da adição de glicerol em águas residuárias.

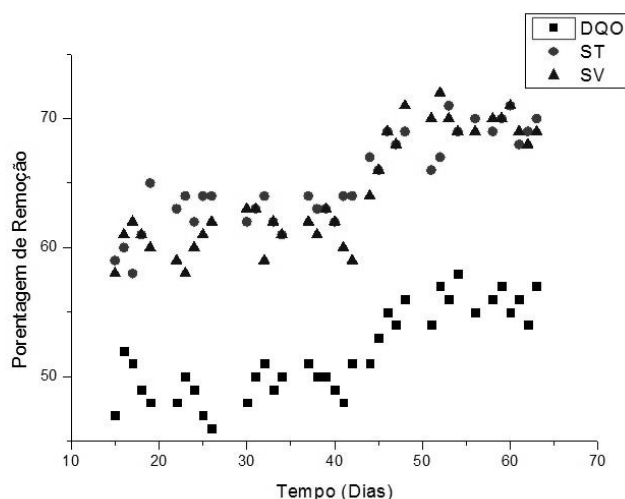
Durante a operação dos biodigestores, foi possível a comparação da produção de metano utilizando somente ARS e a mistura otimizada. Os resultados indicaram um incremento na produção de metano na

ordem de 314,8 % para o biodigestor 1 e de 316,6 % para o biodigestor 2. Esses valores ficaram acima dos obtidos por outros autores que adicionaram apenas glicerol na ARS, demonstrando que a vinhaça também contribuiu para os incrementos obtidos na produção deste gás, possivelmente devido aos diversos micronutrientes necessários aos microrganismos que não estão presentes no glicerol e na ARS.

Durante o processo de biodigestão, foram avaliadas também a taxa de remoção de DQO (RDQO), remoção de sólidos totais (RST), remoção de sólidos voláteis (RSV) e pH do efluente. Contudo, o acompanhamento desses parâmetros só foi possível após os biodigestores passarem a operar em regime de alimentação semicontínuo, uma vez que não há saída de efluente durante a operação em batelada. A Figura 5 (A e B) contém os resultados verificados para a RDQO, RST e RSV nos biodigestores 1 e 2 a partir do 15º dia de operação.



A



B

Figura 5 – Taxa de Remoção de DQO (%). A- Biodigestor 1; B- Biodigestor 2.

Fonte – Próprio autor.

Em ambos os biodigestores foi verificado um aumento na eficiência de remoção tanto de DQO, quanto de ST e SV, quando os mesmos passaram a receber a mistura de ARS, vinhaça e glicerol bruto como substrato. A Tabela 3 contém os valores médios de

RDQO, RST e RSV quando os reatores operavam de forma estabilizada recebendo ARS e a mistura otimizada como substrato, bem como o volume de metano produzido diariamente.

Tabela 3. Comparação do processo de biodigestão anaeróbia utilizando como substrato ARS e a mistura otimizada.

	Operação com ARS 30° ao 40° dia		Operação com Mistura 50° ao 60° dia		Valor estimado para a mistura*
	B 1	B 2	B 1	B 2	
Metano (mL.dia ⁻¹)	775 ± 38	782 ± 50	2440 ± 90	2476 ± 76	-
RDQO (%)	48,1 ± 1,0	49,7 ± 1,1	54,3 ± 1,6	56,0 ± 1,2	59,1
RST (%)	64,6 ± 2,0	62,6 ± 1,2	68,7 ± 1,1	69,0 ± 1,7	71,4
RSV (%)	64,5 ± 1,9	62,7 ± 1,1	69,7 ± 0,8	69,8 ± 1,1	72,8

Os valores são médias seguidas de seus respectivos desvios padrão. B1) Biodigestor 1; B2) Biodigestor 2.

* Valor estimado para a mistura refere-se ao valor obtido através do gráfico de desejabilidade.

Fonte – Próprio autor.

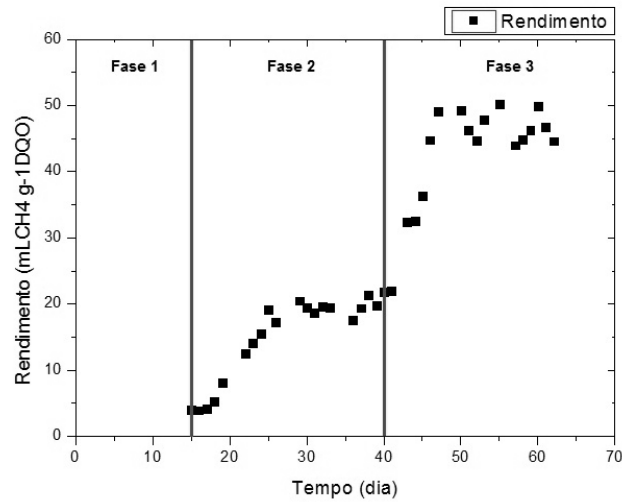
Apesar do aumento nas taxas de RDQO, que foram da ordem de 6,2 % no biodigestor 1 e de 6,3 % no biodigestor 2, as taxas continuam abaixo dos resultados encontrados na literatura tanto para

biodigestão da vinhaça como para a ARS com adição de glicerol.

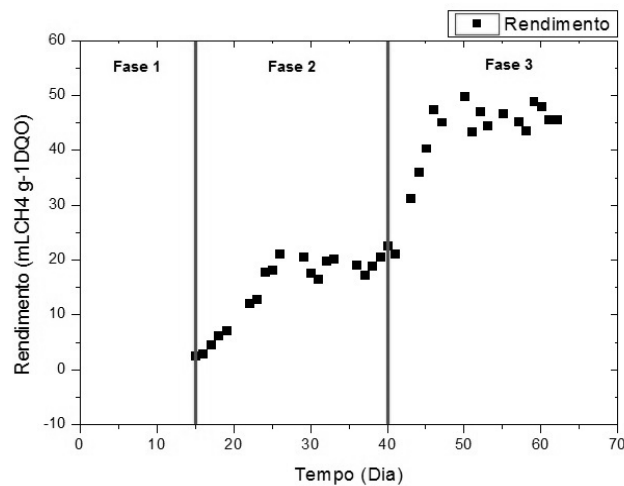
Entretanto, foi verificado que o rendimento na produção de metano em função da DQO consumida

(Figura 6, A e B) passou de $19,7 \pm 1,2 \text{ mL}_{\text{CH}_4} \text{ g}^{-1}\text{DQO}$ quando alimentado apenas com ARS (Fase 2) para $46,8 \pm 2,2 \text{ mL}_{\text{CH}_4} \text{ g}^{-1}\text{DQO}$ no biodigestor 1 quando o mesmo passou a ser alimentado com a mistura

otimizada (Fase 3). Já no biodigestor 2, o rendimento passou de $18,8 \pm 1,4 \text{ mL}_{\text{CH}_4} \text{ g}^{-1}\text{DQO}$ na Fase 2, para $46,2 \pm 2,1 \text{ mL}_{\text{CH}_4} \text{ g}^{-1}\text{DQO}$ na Fase 3.



A



B

Figura 6. Perfil de Rendimento na produção de metano em função da DQO consumida no Biodigestor 1 (A) e Biodigestor 2 (B).
Fonte – Próprio autor.

Pode-se constatar através da Figura 6, que os valores obtidos para os biodigestores de alimentação semicontínua durante a Fase 1 de alimentação (somente ARS) ficaram próximos aos obtidos no tratamento em batelada que continha apenas ARS, (tratamento 1), que apresentou rendimento de $17,6 \text{ mL}_{\text{CH}_4} \text{ g}^{-1}\text{DQO}$.

Já o rendimento para os biodigestores de alimentação semicontínua durante a Fase 3 (mistura otimizada de substratos), foi igual ao valor estimado através do gráfico de desejabilidade para a mistura otimizada ($45,3 \text{ mL}_{\text{CH}_4} \text{ g}^{-1}\text{DQO}$) considerando o intervalo de confiança obtido durante esta fase do perfil de produção para ambos os biodigestores.

Os resultados obtidos em ambos os biodigestores para a RST e RSV quando alimentados com a mistura otimizada foram superiores quando comparados a alimentação somente com ARS, demonstrando uma maior eficiência na remoção da carga orgânica e de sólidos.

Dessa forma, considerando o aumento nas taxas de remoção de sólidos e carga orgânica, bem como o rendimento da conversão de DQO em metano, é possível afirmar que o processo de codigestão de ARS, vinhaça e glicerol bruto pode ser utilizado visando não só a produção energética, mas também o tratamento destes resíduos.

4 CONCLUSÃO

A adição do glicerol como substrato no processo de codigestão foi determinante para a obtenção dos elevados incrementos na produção de biogás e

metano.

Apesar do aumento de todos os parâmetros avaliados quando comparados ao período em que os biodigestores foram operados somente com ARS, apresentaram valores abaixo dos estimados. Isso pode ser justificado pelo modo de operação dos biodigestores, pois os valores foram estimados através da função de “desejabilidade”, obtidos para biodigestores de escala laboratorial e em batelada. Nesse caso, todo o substrato dentro do biodigestor apresenta características homogêneas, enquanto que os biodigestores operados em regime semicontínuo ou contínuo apresentam características heterogêneas, com um perfil negativo de carga orgânica e sólidos na medida em que percorrem o biodigestor.

De forma geral, os resultados obtidos utilizando a ARS, glicerol e vinhaça foram bastante positivos, uma vez que sua codigestão alcançou incrementos na produção de biogás superiores a 300%.

REFERÊNCIAS

ALFAKIT. **Alfakit.ind.br**, 2013.

APHA. 1995. **Standard methods**. 19th Edition. American Public Health Association, Washington, DC.

ASTALS, S.; NOLLA-ARDÈVOLB, V.; MATA-ALVAREZA, J. Thermophilic codigestion of pig manure and crude glycerol: Process performance and digestate stability. **Journal of Biotechnology**, v.166, n.3, p.97–104. 2013.

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.

BELLE, A. J. *et al.* Anaerobic co-digestion of forage radish and dairy manure in complete mix digesters. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 178, p. 230–237, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.036>>.

CASTRILLÓN, L. *et al.* Methane production from cattle manure supplemented with crude glycerin from the biodiesel industry in CSTR and IBR. **Bioresource Technology**, v. 127, p. 312-317, 2013.

CREMONEZ, P. A. **Digestão Anaeróbia de Polímero Orgânico a Base de Fécula de Mandioca**. 2015. 93 p. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia de Energia na Agricultura, Unioeste.

JINGURA, R.M.; MATENGAIFA, R. Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 1116-1120, 2009.

LARSEN, A.C. *et al.* Anaerobic co-digestion of crude glycerin and starch industry effluent. **Eng. Agric.**, v.33, n.2, p.341-352. 2013.

LINKE, B. *et al.* Mesophilic anaerobic co-digestion of cow manure and biogas crops in full scale German biogas plants: a model for calculating the effect of

hydraulic retention time and VS crop proportion in the mixture on methane yield from digester and from digestate storage at different temperatures. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 130, p. 689–695, 2013.

LOVATO, G.; RATUSZNEI, S. M. ; RODRIGUES, J. A. D. . Geração de Bioenergia (H₂ e CH₄) com Resíduos Industriais (Glicerol e Vinhaça) Integrando o Processo Produtivo Agroindustrial (Biodiesel e Álcool) com a Valorização de Resíduos e Adequação Ambiental. **Química & Derivados**, v. 556, p. 32-34, 2015.

MARTÍN, M.A. *et al.* Semi-continuous anaerobic co-digestion of orange peel waste and residual glycerol derived from biodiesel manufacturing. **Waste Management**, v.33, n.7, p.1633-1639. 2013.

NARTKER, S. *et al.* Increasing biogas production from sewage sludge anaerobic co-digestion process by adding crude glycerol from biodiesel industry. **Waste Management**, v. 34, p. 2567- 2571, 2014.

PAPONG, K. *et al.* Anaerobic co-digestion of canned seafood wastewater with glycerol waste for enhanced biogas production. **Energy Procedia**, v52, p. 328-336, 2014.

RIVERO, M.; SOLERA, R.; PEREZ, M. Anaerobic mesophilic co-digestion of sewage sludge with glycerol: Enhanced biohydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.39, p.2481-2488. 2014.

SERRANO, A. *et al.* Improvement of mesophilic anaerobic co-digestion of agri-food waste by addition of glycerol. **Journal of Environmental Management**, v.140, p.76-82. 2014.

SOSNOWSKI, P.; WIECZOREK, A.; LEDAKOWICZ, S. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. **Advances in Environmental Research, Amsterdam**, v. 7, n. 3, p. 609-616, 2003.

XIE, S. *et al.* Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of pig manure and grass silage. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 102, n. 10, p. 5728–5733, 2011.

YAO, Y. *et al.* Water free anaerobic co-digestion of vegetable processing waste with cattle slurry for methane production at high total solid content. **Energy**, Londres, v. 74, p. 309-313, 2014.