

## Codigestão de lodo de laticínio e leite de descarte para geração de energia por biogás

### Codigestion of dairy sludge and waste milk for energy generation with biogas

Vinicius Alexandre Cruz<sup>1</sup>, Leticia Guarnieri Vaz<sup>1</sup>, Dilcemara Cristina Zenatti<sup>2</sup>, Eduardo Henrique Baltrusch de Gois<sup>1</sup>, Orlando de Carvalho Junior<sup>1</sup>, Ricardo Nagamine Costanzi<sup>1\*</sup>

---

#### RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial de geração de biogás utilizando resíduos orgânicos gerados em indústria de laticínios: lodo flotado após centrifugação e o leite de descarte. O biogás é gerado na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e mostra-se como uma alternativa sustentável de disposição e tratamento de resíduos gerados nos processos industriais. O estudo da geração de biogás foi realizado em 14 biodigestores de bancada construídos em garrafas pet e seringa de 60 mL para o armazenamento do biogás gerado ao longo do tempo. No ensaio do delineamento experimental as proporções dos resíduos de laticínios em cada biodigestor foram delimitadas pelo método do delineamento composto central rotacional (DCCR) e o inóculo foi adicionado na proporção de 30% do volume ocupado pelos resíduos de laticínios. No ensaio da digestão de lodo e inóculo, os biodigestores foram limitados em 10% de sólidos totais. Os parâmetros analisados foram: pH, sólidos totais, sólidos voláteis e fixos, produção e análise qualitativa do biogás. Como principais resultados, obteve-se uma produtividade de biogás de 49,62 mL g<sup>-1</sup> de sólidos voláteis inseridos no biodigestor 5 e 46,77 mL g<sup>-1</sup> de sólidos voláteis no biodigestor. A análise qualitativa do biogás resultou em uma concentração média de 60% de CH<sub>4</sub> contido no biogás produzido.

**Palavras-chave:** Biodigestor; Resíduos de laticínios; Digestão anaeróbia.

---

#### ABSTRACT

This research aimed to evaluate the potential of biogas generation from the dairy industry waste: floated sludge after centrifugation and discarded milk. Biogas is generated in anaerobic digestion of organic waste and is a sustainable alternative for disposal and treatment of industrial waste process. The study of biogas generation was carried out in 14 bench biodigestors built in pet bottles, and syringes with a volume of 60 mL for the storage of biogas generated over time. In the experimental design the proportions of dairy residues used in each biodigester were determined by the central composite rotational design (CCRD) method. Inoculum was added at a rate of 30% of the total volume of dairy waste. In the sludge and inoculum digestion assay, digesters were limited to 10% total solids. The parameters analyzed were: pH, total solids, volatile and fixed solids, biogas production and qualitative analysis. The main results were a biogas productivity of 49.62 mL g<sup>-1</sup> of volatile solids in the biodigester 5 and 46.77 mL g<sup>-1</sup> of volatile solids in the biodigester 3. The qualitative analysis of biogas resulted in an average concentration of 60% of CH<sub>4</sub> contained in the biogas produced.

**Keywords:** Biodigester; Dairy waste; Anaerobic digestion.

---

<sup>1</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná

\*E-mail: ricardocostanzi@utfpr.edu.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná

## INTRODUÇÃO

O setor agroindustrial e a indústria de laticínios podem ser definidos como a junção de atividades que tem por objetivo o processamento de um único insumo, o leite, que possibilita a origem de diversos produtos de acordo com a tecnologia envolvida no processo, permitindo a elaboração de queijos, manteiga, creme, leite em pó, iogurtes, doces e outros derivados (VENTURINI; SARCINELLI; SILVA, 2007; HENARES, 2015).

De acordo com a FAO (2021), em 2020 a produção mundial de leite foi estimada em 906 bilhões de litros, com um aumento de 2,0% em relação ao ano de 2019, sendo o continente Asiático o maior produtor, seguido da Europa e América do Norte. A produção de leite na América do Sul foi de 82 bilhões de litros, um aumento de 2,0% comparado a 2019, destacando-se Argentina, Brasil, Chile, Uruguai e Colômbia como os maiores produtores. O Brasil é um dos maiores produtores de leite do mundo, ocupando a 5ª posição no ranking mundial. O país produziu em 2020 aproximadamente 36,75 bilhões de litros, representando 4,05% da produção mundial.

A indústria de laticínios gera efluentes líquidos, emissões atmosféricas e resíduos sólidos provenientes de seu processo industrial. Os efluentes líquidos são constituídos principalmente de leite diluído, materiais sólidos flutuantes, como graxas, detergentes, lubrificantes e desinfetantes (HENARES, 2015) e originados principalmente devido ao processo de limpeza e lavagem dos equipamentos (GONÇALVES; MADERI; SANTOS, 2017). O soro é o principal agente poluidor dos laticínios (SILVA; SIQUEIRA; NOGUEIRA, 2018). Tenedini (2017) estima que para cada litro de leite beneficiado na indústria, sejam produzidos 2,3 L de efluente, com capacidade de cada litro de leite processado gerar até 6 litros de efluentes (VALIM; FRUGOLI, 2015).

Assim, o gerenciamento e tratamento adequado dos efluentes e resíduos sólidos gerados é de fundamental importância antes do lançamento em corpo receptor ou disposição no meio ambiente (HENARES, 2015).

Outro fator relevante das indústrias de laticínios é que podem ser caracterizadas como grandes consumidores de energia. Neste contexto, a digestão anaeróbia surge como uma alternativa importante para recuperar a energia contida nos resíduos pela possibilidade da geração de biogás.

O biogás é constituído por diversos gases, onde o metano e o dióxido de carbono apresentam-se em maiores quantidades. O potencial energético do biogás depende da quantidade de metano presente, devido ao seu poder calorífico (OZER, 2017).

Desta forma, este trabalho teve como tema conceitual a necessidade e obrigatoriedade de tratamento dos resíduos orgânicos das indústrias de laticínios visando obter energia para aproveitamento nos processos industriais por meio da produção de biogás e do seu uso potencial em várias vias tecnológicas.

## **MATERIAIS E METODOS**

A pesquisa foi desenvolvida nos Laboratórios do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Londrina.

Os biodigestores de escala de bancada foram operados em batelada e desenvolvidos em garrafas de plástico. Foram utilizadas 14 garrafas de 300 mL, seladas com tampas de plástico com lacre. Na tampa foi conectado um tubo de silicone e uma seringa de 60 mL.

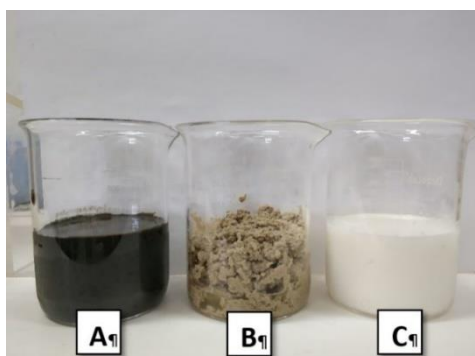
A medição dos gases foi realizada pelo deslocamento da seringa, sendo registrada a produção de biogás diariamente ao longo do tempo. Além disso, os biodigestores foram armazenados em uma incubadora bacteriológica a 35°C durante 8 dias, de modo a garantir a degradação na fase mesofílica.

Os resíduos empregados neste trabalho foram: lodo proveniente de biodigestor anaeróbio, lodo de laticínios e leite de descarte.

O lodo de biodigestor anaeróbio foi obtido na Universidade Estadual de Londrina (UEL), proveniente da digestão de resíduos orgânicos alimentares. Este lodo serviu como inóculo, que garante a existência de células viáveis de bactérias metanogênicas e de um ecossistema anaeróbio cuja função é viabilizar e acelerar o processo de digestão anaeróbia (ALVES, 2008; MACIEL 2009).

O lodo da estação de tratamento de indústria de laticínios foi obtido por uma indústria de laticínios localizada no Paraná. O leite de descarte foi realizado com leite de validade expirada de modo similar a um leite inadequado para consumo que é descartado na indústria de laticínios. A Figura 1 ilustra os resíduos utilizados.

**Figura 1** – Tipos de resíduos utilizados A) Lodo anaeróbio, B) Lodo de laticínio industrial e C) leite de descarte.



Fonte: autoria própria

As proporções de lodo de laticínios e leite adicionadas nos biodigestores foram determinadas por um planejamento estatístico, pelo método do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). A proporção de inóculo foi definida como constante com valor de 30% do volume ocupado pelo lodo de laticínios e de leite no biodigestor. Desta forma, duas variáveis independentes foram definidas: volume adicionado de lodo de laticínios e leite de descarte para avaliação da produção de biogás, o qual foi a variável dependente. O resultado do planejamento estatístico é mostrado na Tabela 1.

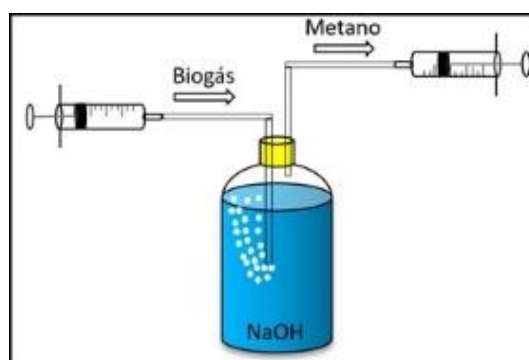
**Tabela 1** - Valores reais de lodo de laticínios e leite de descarte determinados pelo método DCCR para os biodigestores

Biodigestor	Valores codificados		Valores reais	
	Lodo de laticínios	Leite de descarte	Lodo de laticínios (mL)	Leite de descarte (mL)
1	-1	-1	16,3	4,8
2	1	-1	40,4	4,8
3	-1	1	16,3	25,7
4	1	1	40,4	25,7
5	-1,41	0	11,3	15,3
6	1,41	0	45,4	15,3
7	0	-1,41	28,4	0,5
8	0	1,41	28,4	30,0
9	0	0	28,4	15,3
10	0	0	28,4	15,3
11	0	0	28,4	15,3

Fonte: autoria própria

A análise qualitativa do biogás foi realizada com a utilização da técnica de identificação volumétrica do metano pelo método de deslocamento de volume. O sistema foi montado baseando-se na técnica descrita em Foresti *et al.* (2005), que tem como princípio a utilização da solução de hidróxido de sódio (NaOH) 50 g L<sup>-1</sup> para capturar o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), conforme mostra o esquema representado na Figura 2.

**Figura 2** – Esquema do Sistema de medição do metano.



Fonte: autoria própria

O sistema foi montado com a utilização de uma garrafa vedada contendo a solução de NaOH. Na tampa da garrafa foram realizados dois furos, um para conectar um tubo de silicone junto a uma seringa vazia para aferição do metano (CH<sub>4</sub>) e o outro furo para conectar a seringa que contém o biogás proveniente dos biodigestores após o fim do período de digestão analisado. Logo após, o metano é liberado na forma gasosa, resultando em um deslocamento na seringa vazia. Assim, o volume deslocado na seringa, corresponderá ao volume de CH<sub>4</sub> produzido nos biodigestores.

Foram realizadas análises físico-químicas, afim de caracterizar os resíduos antes e após o processo de biodigestão. Os parâmetros avaliados foram: pH, sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis e ácido graxos voláteis para o inóculo, lodo de laticínios e leite de descarte (Tabela 2):

**Tabela 2** – Metodologias utilizadas para análise das variáveis.

Variable	Method
pH	4500 H+ B - APHA (2001)
Sólidos Suspensos Totais	2540 D- APHA (2001)
Sólidos fixos e voláteis	2540 E APHA (2001)
Ácidos graxos	Kapp (1984) descrito em BUCHAUER (1998)

Fonte: autoria própria

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho são provenientes da realização de duas etapas de ensaios na produção de biogás ao longo do tempo. A primeira etapa foi realizada com lodo de FAD (flotação por ar dissolvido), leite de descarte e inóculo em sistema de bancada pelo método estatístico de delineamento experimental.

A caracterização físico-química dos resíduos da indústria de laticínios permite avaliar e discretizar processos e análises relativos ao potencial de produção de biogás. As medições e análises dos resíduos orgânicos (RO) utilizados neste trabalho são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3-** Caracterização dos resíduos do Sistema de biodigestão

Resíduos	pH	Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	Teor de Umidade (%)	Sólidos Totais (ST) (%)	Sólidos Voláteis (SV) (%)	Sólidos Fixos (SF) (%)
Inoculum	7,85	10.010	95,66	4,34	65,68	34,32
dairy sludge	5,42	581	79,78	20,22	93,49	6,51
waste milk	6,74	5.520	90,51	9,49	92,22	7,78

Fonte: autoria própria

O pH dos resíduos inóculo e leite de descarte possui valor adequado para tratamento por processos anaeróbios (ZILOTTI, 2012) com valores de 7,85 e 6,74, respectivamente. O pH do lodo de laticínios possui um valor relativamente baixo (menor que 6,0) para tratamento por sistemas biológicos. Assim, uma mistura composta foi realizada para propiciar valores de pHs iniciais maiores que 6,0 nos biodigestores.

Os sólidos presentes no lodo foram característicos de lodos de FAD subsequente a uma centrífuga com valor médio de 20,22%, com destaque para a quantidade de sólidos voláteis presentes, 93,49%, que indica uma quantidade predominante de matéria orgânica no lodo de ETE (estação de tratamento de efluentes) da indústria de laticínios.

O leite apresentou sólidos totais no valor de 9,49%, próximo de valores obtidos por Ribas *et al.* (2004), que encontrou valores de 11,78 a 12,83%. O inóculo apresentou sólidos totais de 4,34% e sólidos voláteis de 2,85%, correspondente a 65,68% dos sólidos totais, valores próximos ao lodo anaeróbio utilizado como inóculo no trabalho de Heberle (2013), que apresentou valores de ST de 6,64%, SV de 63,08% e SF de 36,92%.

Assim, pode-se caracterizar os resíduos utilizados neste trabalho como substratos orgânicos que apresentam potencial para a geração de biogás devido aos valores elevados de SV, maiores que 90%. Fato que indica presença de matéria orgânica que pode ser convertida em biogás no processo anaeróbio.

Além disso, o pH do leite de descarte apresenta pH próximo do neutro e o pH do inóculo apresenta um valor próximo de 8,0. Fato que auxilia a neutralização do pH do lodo de laticínios com valor abaixo de 6,0. Desta forma, a combinação dos resíduos favorece o desenvolvimento do ecossistema biológico em reator anaeróbio.

O ensaio do delineamento experimental proposto foi realizado no período de 08/10/2019 a 12/10/2019. Durante este período houve a medição diária do biogás produzido. A paralisação na produção do biogás, foi observada a partir do 4º dia, pois inexistiram deslocamentos positivos nas seringas. A Tabela 4 apresenta o volume total acumulado de biogás.

**Tabela 4** – Volume acumulado de biogás no sistema.

<b>Biodigestor</b>	<b>Lodo de laticínio (mL)</b>	<b>Leite (mL)</b>	<b>Inóculo (mL)</b>	<b>Biogás (mL)</b>
1	16,3	4,8	7,40	30,0
2	40,4	4,8	15,4	30,0
3	16,3	25,7	16,1	171,0
4	40,4	25,7	24,2	166,0
5	11,3	15,3	10,1	89,0
6	45,4	15,3	21,5	70,0
7	28,4	0,5	9,70	56,0
8	28,4	30,0	21,9	182,0
9	28,4	15,3	15,8	99,0
10	28,4	15,3	15,8	92,0
11	28,4	15,3	15,8	110,0
Inóculo	0,0	0,0	50,0	0,0

Fonte: autoria própria

O inóculo apresentou valores nulos na produção de biogás. Isto está fortemente associado a efluentes digeridos que neste trabalho possuem a função de diluir os sólidos do lodo e permitir que microrganismos adaptados possam realizar o processo de acidogênese e metanogênese a partir do substrato.

Pode-se observar que nos biodigestores 1 e 2 ocorreram as menores produções de biogás em contraposição ao biodigestor 7, pois o volume de lodo relativo ao volume de

leite nestes sistemas eram de 3,40, 8,42 e 56,80, respectivamente. A maior geração de biogás em termos de volume ocorreu no primeiro dia de digestão, com mais de 80% da produção total.

Os biodigestores 3, 4 e 8 se destacaram na produção de biogás, com 171, 166 e 182 mL respectivamente. Isso ocorreu devido a contribuição do leite no processo, visto que nesses biodigestores, encontra-se a maior fração deste resíduo que contém em sua composição elevado teor orgânico.

O volume de biogás produzido, está diretamente relacionado com a quantidade e o tipo de resíduo inserido nos biodigestores. A Tabela 5 mostra a relação de volume produzido pelo volume total ocupado dos resíduos em cada biodigestor.

**Tabela 5** - Volume de biogás produzido por volume de resíduos nos biodigestores.

<b>Biodigestor</b>	<b>Volume total ocupado dos resíduos + inóculo (mL)</b>	<b>Biogás (mL)</b>	<b>mL Biogás por mL de resíduos (lodo+leite)</b>
1	30,1	30,0	1,42
2	64,5	30,0	0,66
3	59,7	171,0	4,07
4	94,2	166,0	2,51
5	37,8	89,0	3,35
6	86,4	70,0	1,15
7	41,2	56,0	1,94
8	83,0	182,0	3,12
9	62,1	99,0	2,27
10	62,1	92,0	2,11
11	62,1	110,0	2,52
Inóculo	50,0	0,0	0,00

Fonte: autoria própria

A relação de mL de biogás produzido por mL de resíduos mostra que os biodigestores 3, 5 e 8 obtiveram os melhores resultados, pois neles se encontram uma maior quantidade de leite quando comparada com a quantidade de lodo de laticínios, mostrando novamente a contribuição do volume de leite no potencial de geração de biogás.

Pode-se verificar que o leite de descarte tem o maior potencial para produzir biogás. Sem a inserção dos biodigestores 1 e 2 na elaboração do Gráfico 2, observou-se uma linha de tendência linear com um coeficiente de regressão próximo de 0,85.



O volume de leite inserido nos biodigestores 4, 6, 7, 9, 10 e 11 era menor que o do lodo de laticínios, o que ocasionou uma menor relação de biogás produzido por volume total de resíduos.

Observou-se que a partir do 4º dia ocorreu inativação das bactérias metanogênicas, verificada pela não produção de biogás. Essa interrupção pode ter acontecido por conta do acúmulo de ácido graxos voláteis no biodigestor, provenientes da degradação dos compostos orgânicos (etapa da acidogênese), que por consequência provocaram a redução no valor de pH do resíduo orgânico.

Para a obtenção de uma boa eficiência no processo de digestão anaeróbia, se faz necessário propiciar ao sistema condições estáveis de pH na faixa de 6,5 a 7,5 com a manutenção da relação ácido carbônico/carbonato em uma situação de tamponamento. Dessa forma, quando toda alcalinidade é consumida não há a neutralização dos ácidos gerados, consequentemente, houve o acúmulo de ácidos voláteis que por sua vez reduzem o pH, tornando o sistema quimicamente instável (ZILOTTI, 2012).

A análise de teor de sólidos foi realizada nos biodigestores que produziram biogás na proporção maior que 1:1 (volume de biogás produzido por volume de resíduo) para possibilitar um estudo mais minucioso dos resultados apresentados. O teor de umidade e de sólidos foram determinados para o início e o final do experimento. A Tabela 6 apresenta os valores iniciais de umidade e sólidos.

**Tabela 6** – Caracterização do teor de umidade e de sólidos dos sistemas de biodigestores.

Biodigestor	Inicial			
	Teor de umidade (%)	ST (%)	SV (%)	SF (%)
1	85,70	14,30	78,18	11,82
2	84,68	15,32	78,59	11,41
3	89,54	10,46	84,66	15,34
4	87,90	12,10	84,82	15,17
5	89,27	10,73	84,69	15,31
6	85,90	14,10	77,98	12,02
7	84,71	15,29	85,13	14,86
8	88,84	11,16	84,73	15,27
9	87,59	12,41	84,85	15,14
10	87,59	12,41	84,85	15,14
11	87,59	12,41	84,85	15,14

Fonte: autoria própria

Houve uma redução generalizada da fração de SV nos ST, com exceção do biodigestor 7. Isto pode ter ocorrido pela falta de homogeneização adequada do lodo de FAD no início do preparo dos biodigestores.

Porém, observa-se que ainda existe uma fração relativamente alta de SV, acima de 80% dos ST. Este fato evidencia a possibilidade de aumento de produção nos valores de volume de biogás, pois o processo anaeróbio cessou devido à redução do pH nos testes realizados.

A Tabela 7 apresenta o valor de redução de SV nos biodigestores em valores mássicos e percentuais e o volume de biogás produzido por gramas de SV iniciais da biodigestão.

**Tabela 7** – Redução mássica de sólidos voláteis nos biodigestores.

Biodigestores	Final			
	Redução do teor de SV inicial (%)	Redução (g SV)	mL de Biogás por g de SV	mL de Biogás por g de SV removido
1	28,60	0,65	13,20	46,15
2	25,17	0,64	11,80	46,88
3	25,61	1,26	34,76	135,71
4	41,00	3,56	19,11	46,63
5	43,49	1,38	28,05	64,49
6	27,54	1,40	13,77	50,00
7	31,09	1,42	12,26	39,44
8	45,29	3,26	25,29	55,83
9	32,42	1,90	16,89	52,11
10	29,75	1,74	15,73	52,87
11	36,61	2,14	18,82	51,40

Fonte: autoria própria

As maiores reduções de SV ocorreram nos Biodigestores 3, 5 e 8 com valores acima de 40%. A menor redução ocorreu no Biodigestor 3 com valor de 25,61%. Porém, os sistemas com maiores eficiências na biotransformação do material carbonáceo para metano e gás carbônico foram os Biodigestores 3 e 5.

Santos *et al.* (2015) utilizam para indústria de laticínios valores de referência iguais a 0,60 Kg SV m<sup>-3</sup> para a produção de biogás. O índice deste trabalho foi de 11,80 a 34,76 Kg SV m<sup>-3</sup>. Estes valores corroboram com a necessidade de aumento da

alcalinidade para possibilitar a continuidade do processo anaeróbio e consequente diminuição dos índices para valores mais próximos da literatura.

O processo de degradação anaeróbia dos resíduos de laticínios transformou parte da matéria orgânica em biogás e parte em material lixiviado, acarretando no aumento de umidade em todos biodigestores. A variação de umidade foi de 84,71% a 93,76% nos biodigestores. Observa-se a menor variação no biodigestor 3 (16,3 mL de lodo e 25,7 mL de leite), de apenas 2,5%, enquanto que no biodigestor 7 (28,4 mL de lodo e 0,5 mL de leite) houve a maior variação, de 5,0%.

Comparando o biodigestor 3 com o 4 que iniciaram o processo com a mesma quantidade de leite (25,7 mL), porém com quantidade de lodos diferentes (16,3 e 40,4 mL respectivamente), fica evidente a contribuição do teor de umidade no processo, pois o biodigestor 3 iniciou a digestão com o maior teor de umidade do que o 4, produzindo maior volume de biogás com a menor produção de lixiviado. Gadelha (2005) afirma que biodigestores úmidos apresentam maior potencial de geração de biogás.

Após o processo de digestão anaeróbia, verifica-se que o maior percentual de redução de ST ocorreu no biodigestor 8 (contendo 28,4ml de lodo de laticínios e 30,0mL de leite) com 43,00% de redução, resultando na mistura em que mais produziu biogás (182mL), seguido pelo biodigestor 4 (40,4mL de lodo e 25,7mL de leite) com redução de 39,78% e terceira maior produção de biogás (166mL).

O biodigestor 3 obteve a menor taxa de redução de ST, 23,78% com a segunda maior produção de biogás (171mL), denotando a influência dos ST no início do processo, visto que continha menor quantidade de ST (10,46%) comparado ao biodigestor 4 (12,10%). De forma geral, esses resultados indicam a conversão da matéria orgânica em biogás, uma vez que o aumento de SF foi proporcional a redução de SV.

Wang (2019) salienta a importância dos sólidos voláteis para análise da avaliação do rendimento do biogás. Quanto maior a concentração de sólidos voláteis, maior produção de biogás, contribuindo assim para maximizar a quantidade de energia disponível para uso e venda de excedente.

O volume de biogás produzido por unidade de sólidos voláteis teve média de 31 mL g<sup>-1</sup> SV<sup>-1</sup>, com o biodigestor 5 se destacando entre os demais (49,62mL g<sup>-1</sup> SV<sup>-1</sup>). A produtividade foi menor do que a obtida por Kubaská *et al.* (2010), que alcançaram a produtividade de 472 mL g<sup>-1</sup> SV<sup>-1</sup> em um ambiente controlado, onde a temperatura no reator encontrava-se em 37°C e o tempo de digestão foi de aproximadamente 18 dias.

O pH nos biodigestores foi levantado no início e no final do processo de degradação, enquanto que os AGV foram medidos somente no final. A Tabela 8 mostra os resultados obtidos.

**Tabela 8** - pH dos biodigestores e AGV no final do experimento.

Biodigestores	pH		AGV (mg L <sup>-1</sup> )
	Initial	Final	Final
1	5,66	5,56	6726,8
2	5,60	5,52	6726,8
3	6,01	5,34	6346,7
4	5,82	5,49	6346,7
5	5,97	5,27	6346,7
6	5,67	5,41	6634,1
7	5,58	6,50	6907,4
8	5,92	5,29	6627,1
9	5,79	5,43	6767,2
10	5,79	5,44	6767,2
11	5,79	5,41	6627,1

Fonte: autoria própria

Todos os biodigestores iniciaram o processo próximo do pH 6,0, porém abaixo da faixa de pH ótima (6,5 – 7,5) para os microrganismos metanogênicos. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se redução do pH em todos biodigestores, todavia os valores se mantiveram entre 5,0 e 6,0.

A queda do pH ocorreu devido a produção e acúmulo dos AGV no sistema. Observou-se um pequeno aumento do pH no biodigestor 7, indicando uma produção de alcalinidade pela ocorrência do processo anaeróbico completo. Porém, o biodigestor 7 também cessou sua produção a partir do 4º dia.

Os valores de AGV demonstram que houve a sua produção durante o processo de acidogênese. Segundo Chernicharo (1997), quando o sistema está em condições favoráveis com quantidade de bactérias metanogênicas suficientes, as mesmas utilizam os AGV produzidos na velocidade em que estes são formados.

Kondusamy e Kalamdhad (2014) realizaram a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos alimentares e observaram que em concentrações superiores a 2000 mg L<sup>-1</sup> de ácidos a atividade microbiana foi inibida afetando assim a geração de biogás. A concentração de AGV alcançou valores maiores que 6000 mg L<sup>-1</sup> e a produção de biogás foi interrompida nessas condições. Kjeldsen e Christensen (1990) observaram que

concentrações de ácidos (acético, propiônico e butírico) acima de 6000 mg L<sup>-1</sup> causaram efeito inibitório na atividade dos microrganismos.

## CONCLUSÕES

O uso de biomassa para a geração de energia é uma forma importante de modificar o papel dos resíduos no sistema industrial visando proporcionar e agregar valor econômico e ambiental aos processos de tratamento de efluentes.

Assim, este trabalho teve como principais conclusões:

- Os resíduos utilizados neste trabalho como substrato possuem valores adequados de SV para tratamento por processos anaeróbios para gerar energia por vias de queima ou por moto gerador.
- O lodo de laticínios apresentou características ácidas para processos anaeróbios de tratamento, necessitando de misturas mais propícias para gerar resíduos de cogeração com pHs acima de 7,0, ou seja, com pH neutro.
- A produção de biogás durou poucos dias nos biodigestores devido ao acúmulo de AGV, reduzindo o pH do meio e inibindo a atividade dos microrganismos. Fato que denota a necessidade de inserção de alcalinizantes nos sistemas de bancada para geração de biogás.
- As misturas contidas nos biodigestores com as maiores frações de leite em relação ao lodo de laticínios, se mostraram com maior potencial para geração de biogás.
- Os resultados indicam a viabilidade de produção e utilização de biogás em sistemas de tratamento de efluentes nas indústrias de laticínios a partir de resíduos de descarte dos processos industriais e do lodo gerado na ETE.

## REFERÊNCIAS

ALVES, I. R. F. S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, CTG - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008

- APHA. AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
- BUCHAUER, K. 1998. Comparison of two simple titration procedures to determine volatile fatty acids in influents to waste-water and sludge treatment processes. **Water SA**. v. 24, n. 1.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológicos de águas residuárias: reatores anaeróbios**. 1 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1997.
- FAO. 2021. **Dairy Market Review**. April, 2021. Rome. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/cb4230en/cb4230en.pdf>>. Acesso em: 10 de junho de 2021.
- FORESTI, E. et al. **Fundamentos do trabalho anaeróbio**. In: Campos, J. R. (Coord.). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 29-52.
- GADELHA, E. P. **Avaliação de inóculos metanogênicos na aceleração do processo de degradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos**. 2005. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2005.
- GONÇALVES, N. P.; MADERI, T. R.; SANTOS, P. F.. Avaliação das práticas ambientais em indústrias de laticínios–estudo de caso. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 13, n. 2, 2017.
- HEBERLE, A. N. A. **Biogás gerado a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes suplementado com óleo vegetal residual**. 2013. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2013.
- HENARES, J. F. **Caracterização do efluente de laticínio: análise e proposta de tratamento**. 2015. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.
- KONDUSAMY, D.; KALAMDHAD, A. S. **Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production**. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 2, n. 3, p. 1821-1830, 2014.
- KUBASKÁ, M; SEDLÁČEK, S.; BODÍK, I; KISSOVÁ, B. **Food Waste as Biodegradable Substrates for Biogas Production**. In: 37th International Conference of SSCHE. Tatranské Matliare, Slovakia, 2010.
- KJELDSEN, P.; CHRISTENSEN, T. H. **Leaching test to evaluate pollution potential of combustion residues from an iron recycling industry**. Waste Management & Research, 8, 277-292, 1990.
- MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2009. 333 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- ÖZER, B.. Biogas energy opportunity of Ardahan city of Turkey. **Energy**, v. 139, p. 1144-1152, 2017.
- RIBAS, N. P.; HARTMANN, W.; MONARDES, H. G.; ANDRADE, U. V. C. **Sólidos totais do leite em amostras de tanque nos estados do Paraná, Santa Catarina e São Paulo**. Revista Brasileira de Zootecnia, v. 33, n. 6, p. 2343 – 2350, 2004.

SANTOS, J. T. S.; SOUZA, D. F. S.; ABUD, A. K. S.; OLIVEIRA JUNIOR, A. M. **Feasibility estimation of biogas production from wastewater of the dairy industry in the state of Sergipe using modeling and simulation.** *Exacta – EP*, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 229-237, 2015.

SILVA, R. R.; SIQUEIRA, E. Q.; NOGUEIRA, I. S.. Impactos ambientais de efluentes de laticínios em curso d'água na Bacia do Rio Pomba. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 217-228, 2018.

TENEDINI, M. V.. **Avaliação da eficiência do tratamento biológico, tipo lodo ativado, de uma indústria de laticínio.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso.

VALIM, A. C. S.; FRUGOLI, A. L.. **CINÉTICA DA DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA DE EFLUENTE DE LATICÍNIO EM REATOR BATELADA.** Poços de Caldas, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso.

VENTURINI, K. S.; SARCINELLI, M. F.; SILVA, L. C. **Processamento do leite.** Espírito Santo: Pró-reitoria de Extensão – Programa Institucional de Extensão, 2007.

WANG, H.. Propriedades Físicas de Esterco Leiteiro Pré e Pós-Digestão Anaeróbia. **Ciências Aplicadas**, v. 9, n. 13, pág. 2703, 2019.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica.** 2012. 39 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - UNIOESTE, Cascavel, 2012.

*Recebido em: 12/04/2022*

*Aprovado em: 15/04/2022*

*Publicado em: 19/04/2022*