



PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESTOS DE ALIMENTOS EM UM REATOR DE MISTURA COMPLETA EM ESCALA DOMICILIAR: EXPERIMENTO DE LONGA DURAÇÃO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.XII-016>

Gilberto Martins (*), Antonio Celso Cavalieri Lins de Souza

* Universidade Federal do ABC – UFABC. Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas – CECS. Gilberto.martins@ufabc.edu.br

RESUMO

A destinação adequada dos resíduos sólido urbanos, especialmente de sua fração orgânica, é um grande desafio para as autoridades municipais. Sua segregação na fonte aumenta sobremaneira a viabilidade de qualquer tratamento posterior. A participação ativa dos geradores pode se estender para seu processamento, desde que haja tecnologias adequadas para a escala em que ela ocorre, tornando-os efetivos *stakeholders* do processo. Este trabalho procura avaliar a possibilidade de se realizar a digestão anaeróbia de restos de alimentos de forma de descentralizada, em escala doméstica, utilizando um pequeno reator de mistura completa com 22 litros de volume construído com materiais de baixo custo e amplamente disponíveis. O reator foi construído e testado por um período de 840 dias utilizando restos de alimentos de uma família de 4 pessoas, submetido a regimes de alimentação irregulares, registrados através das alterações da carga orgânica volumétrica (COV) do reator. Foram avaliadas a produtividade e o rendimento de biogás durante este período. Os valores médios obtidos foram animadores (respectivamente $0,338 \text{ l}_{\text{biogás}} \cdot \text{l}_{\text{reator}}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ e $0,566 \text{ l}_{\text{biogás}} \cdot \text{gSV}_{\text{ad}}^{-1}$), mesmo com uma COV relativamente baixa ($0,598 \text{ gSV} \cdot \text{l}_{\text{reator}}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$) e um alto TRH de 163 dias. É também apresentada a evolução dos parâmetros nesse período de testes, indicando uma aclimação gradual do inóculo ao substrato e uma resiliência e estabilidade da microbiota responsável pela digestão anaeróbia no reator, através de sua capacidade de retomar os níveis de desempenho mesmo após longos períodos (de até 49 dias) sem alimentação. O desempenho do reator se mostrou estável, indicando uma alternativa robusta para o tratamento dos resíduos alimentares em escala doméstica.

PALAVRAS-CHAVE: Digestão Anaeróbia, Biogás, Restos de Alimentos

ABSTRACT

Adequate disposal of urban solid waste, especially the organic fraction, is a major challenge for municipal authorities. Source segregation enhances greatly the viability of any subsequent treatment. The active participation of waste generators can be extended to its processing, provided there are adequate technologies for the scale at which it occurs, turning them into effective stakeholders in the process. This work seeks to evaluate the possibility of carrying out the anaerobic digestion of domestic food waste in a decentralized way, on a household scale, using a 22-liter completely mixed reactor built with low cost and widely available materials. The reactor was built and tested for a period of 840 days using food waste from a family of 4 people, subjected to irregular feeding regimes, recorded through changes in the organic load rate (OLR) of the reactor. Biogas productivity and yield were evaluated during this period. The mean values obtained were encouraging ($0.338 \text{ l}_{\text{biogas}} \cdot \text{l}_{\text{reactor}}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ and $0.566 \text{ l}_{\text{biogas}} \cdot \text{gSV}_{\text{ad}}^{-1}$, respectively), even with a relatively low OLR ($0.598 \text{ gSV} \cdot \text{l}_{\text{reactor}}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$) and a high HRT of 163 days. The evolution of the parameters in this period of tests is also presented, indicating a gradual acclimation of the inoculum to the substrate and a resilience and stability of the microbiota responsible for the anaerobic digestion in the reactor, through its capacity to reestablish the performance levels even after long periods (up to 49 days) without feeding. The reactor performance proved to be stable, indicating a robust alternative for the treatment of food waste on a single household level.

KEY WORDS: Anaerobic Digestion, Biogas, Food Waste,



INTRODUÇÃO

O tratamento dos resíduos sólidos urbanos é um dos grandes desafios para as municipalidades, uma vez que há diversos fatores que estão associados a essa questão, como o crescimento populacional, a expansão urbana, desenvolvimento econômico, níveis culturais e de renda, hábitos, entre muitos outros. Uma forma de abordar este problema é através do Nexo Água-Energia-Alimentos-Ecossistemas (CARMONA-MORENO et al, 2021).

O Nexo propõe que devam ser observados os diversos aspectos relacionados à resolução de um dado problema, que no caso em análise é tratamento dos restos de alimentos, e sugere a importância do efetivo envolvimento das diversas partes interessadas (*stakeholders*). Nesse sentido há indícios que a segregação e tratamento de resíduos dentro do próprio domicílio possa ter um papel importante na resolução dos problemas relacionados ao tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos.

A digestão anaeróbia tem sido estudada como uma possibilidade de tratamento dos resíduos orgânicos em micro e pequena escala (NTOSTOGLU, KHATIWADA, MARTIN, 2021). Há, entretanto, ainda diversos desafios a serem enfrentados para viabilizar essa opção tecnológica. Dentre eles a estabilidade do processo se apresenta como um dos principais.

A digestão anaeróbia de restos de alimentos é um processo bastante sensível e instável, sendo muito sujeito à acidificação em função de sua rápida hidrólise, que pode ocasionar um acúmulo de ácidos graxos voláteis desestabilizando o sutil equilíbrio entre os processos de acidogênese, acetogênese e metanogênese, que determinam, em última instância, a eficiência do processo de produção de metano (EDWIGES, FRARE, ALINO, 2020).

Várias tecnologias têm sido avaliadas para a digestão desse substrato (BRAGUGLIA et al, 2018; PERA et al, 2022). Alguns pré-tratamentos também têm sido avaliados para evitar esse problema (OLIVEIRA et al, 2022; YUEL et al, 2021), entretanto, visando o desenvolvimento de tecnologias e procedimentos robustos que permitam sua utilização por usuários descentralizados, até o nível de uma residência doméstica, poucos são os estudos disponíveis (SOUZA, MARTINS, 2022).

Este trabalho relata a experiência de operação de um reator anaeróbio de mistura completa, em escala de bancada, utilizando restos de preparo de alimentos de uma família de 4 pessoas durante o período de mais de dois anos, grande parte deles durante o período da pandemia.

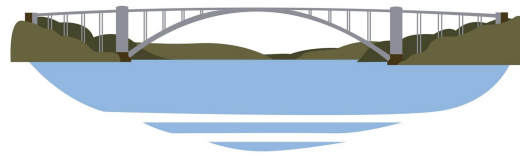
OBJETIVOS

O objetivo do experimento é avaliar o rendimento e a produtividade de biogás e a estabilidade de um digestor anaeróbio de mistura completa em escala de bancada alimentado com restos de preparo de alimentos sujeito a variações bruscas do regime de alimentação e dos substratos utilizados durante um longo período de análise.

METODOLOGIA

- **Substrato** - O substrato foi preparado ao longo do período entre 22/12/2020 e 11/04/2023 a partir de cascas de frutas (mamão, banana, maçã, pera, morango, goiaba e kiwi), legumes (abobrinha, chuchu, abóbora cabotiá, cenoura, batata e beterraba) e de verduras (repolho roxo, alface, espinafre e couve), além de eventualmente alimentos industrializados com data de validade vencida como pão integral, granola, queijo, ovos (com casca) e salsicha. Todos os restos utilizados eram resultantes do preparo, ou já preparados, (como arroz e legumes cozidos) mas não servidos (não se utilizou o resto ingesta, que se caracteriza pelas sobras de alimentos nos pratos).

Os restos eram acumulados em geladeira, até constituir uma amostra de cerca de 2 kg, quando eram então processados em liquidificador doméstico por 3 a 5 minutos, com diluição com água de torneira de forma a se obter uma homogeneização e fluidez adequadas para a alimentação do reator. A mistura era então armazenada em geladeira em porções uniformes (que variaram de 150 g até 450 g, dependendo do regime de alimentação que se testava).



Os Sólidos Totais, Voláteis e Fixos de duas bateladas de substrato processadas e do digestato retirado nessas alimentações foram determinados de acordo com a Standard Methods 2540 B, G e E (APHA, 2017) em triplicata.

- **Inóculo** - O inóculo utilizado foi a fase líquida de estrume bovino, diluído na proporção de 1:2 em água. O reator foi preenchido (17 litros) com o inóculo, que ficou sem alimentação no reator por 30 dias, antes do início do experimento.
- **Reator** - O reator utilizado foi construído a partir de um balde alimentício de 22 litros, com tampa hermética e com alimentador/misturador acoplado no centro da tampa construído com tubos de PVC de 20 mm, como pode ser visto na Figura 1 (a e b). Na Figura 1 a observa-se também o orifício para a passagem da mangueira cristal que vai propiciar a saída do biogás. A torneira inferior foi vedada e a superior foi substituída por uma mangueira de jardim, para a retirada do digestato por transbordamento, quando da alimentação, determinando um volume útil de 17 litros para o reator e de 5 litros de *headspace*.



Figura 1: a) Reator com o alimentador/misturador na tampa b) Detalhe do alimentador/misturador
Fonte: Autor do Trabalho.

O reator foi colocado em uma caixa de isopor visando amenizar as variações de temperatura exteriores e os dutos de alimentação e de descarga foram vedados com rolhas de cortiça (como pode ser observado na Figura 2 a), enquanto uma mangueira cristal, conectada ao orifício da tampa para retirada do gás, foi ligada a um micro medidor totalizador de vazão volumétrica (Ritter milligascounter MGC-1), cuja saída estava ligada a um bote inflável de 200 litros de capacidade para acumular o biogás gerado, conforme pode ser observado na Figura 2 b.



Figura 2: a) Reator inserido em caixa de isopor. b) Conexão do reator com o micromedidor de vazão e o reservatório de biogás

Fonte: Autor do Trabalho.

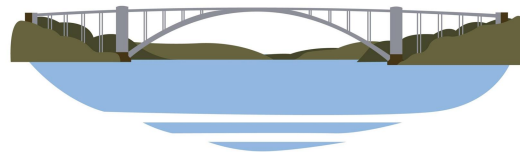
Durante todo o período de testes o valor foi registrado nos momentos de alimentação. No período final de análise houve um acompanhamento mais detalhado, com medições realizadas a cada 30 minutos durante 4 dias, utilizando um sistema de aquisição de dados acoplado ao medidor e software proprietário (RIGAMO).

- **Métodos** - A alimentação do reator foi feita em intervalos de 2 a 3 dias, exceto em alguns períodos de pausa mais longas (que chegaram a ser de até 49 dias), devidamente registrados. Inicialmente a alimentação era feita com cerca de 250 ml de substrato a cada dois dias, que foi paulatinamente sendo aumentada até atingir 450 ml a cada 3 dias. O procedimento de alimentação era de destampar os dutos de alimentação e de saída, pesagem da massa do substrato em balança doméstica de 1 g de precisão, aquecimento do mesmo em microondas até temperatura ambiente (uma vez que o mesmo era armazenado em geladeira), alimentação do substrato com o auxílio de um funil, pelo duto de alimentação e coleta do digestato simultaneamente, após o que ambos os orifícios eram fechados e a agitação do material inserido era realizada manualmente pelo alimentador/misturador por cerca de um minuto girando-o em ambos os sentidos. O pH do digestato era avaliado através de um pHmetro (PH 009 ATC) e as medidas do volume de gás acumulado no período desde a última alimentação eram registradas, assim como observações sobre as condições do digestato (cor, cheiro, sólidos suspensos etc.).

Os parâmetros avaliados foram o tempo de retenção hidráulica (TRH em dias), a carga orgânica volumétrica (COV), que representa a massa de sólidos voláteis inserida em uma alimentação, dividida pelo volume útil do reator (17 litros) e pelo número de dias até a próxima alimentação ($COV \text{ em } gSV \cdot l_{\text{reator}}^{-1} \cdot dia^{-1}$), o rendimento de biogás, que é a diferença entre as medidas de volume de biogás produzido entre duas alimentações dividida pela massa de sólidos voláteis da última alimentação ($Rend_{\text{biogás}} \text{ em } l_{\text{biogás}} \cdot gSV_{ad}^{-1}$) e a produtividade de biogás que representa a diferença entre as medidas de volume de biogás produzido entre duas alimentações dividida pelo número de dias da última alimentação e pelo volume útil do reator ($Prod_{\text{biogás}} \text{ em } l_{\text{biogás}} \cdot l_{\text{reator}}^{-1} \cdot dia^{-1}$).

RESULTADOS

Os resultados da análise de sólidos das duas amostras são apresentados na Tabela 1. As análises foram realizadas na fase final do período de testes e procuraram caracterizar dois extremos de diluição: uma com uma alta diluição (substrato 1) e outra com uma diluição mínima (substrato 2). Os valores da média foram utilizados para os resultados obtidos no período ocorrido antes das medições e os valores específicos de cada substrato foram utilizados na análise dos resultados que sua alimentação proporcionou, ao final do período de testes.

**Tabela 1: Caracterização de duas amostras de substrato e digestato e da média.**

Fonte: Autor do Trabalho

Material	grandeza	ST [g.kg ⁻¹]	SV [g.kg ⁻¹]	SV/ST [%]
substrato 1	média	72,97	68,03	93,23
	desv. padrão	0,05	0,09	0,08
substrato 2	média	135,37	126,94	93,77
	desv. padrão	1,32	1,25	0,04
substrato	média	104,17	97,48	93,50
	desv. padrão	34,19	32,28	0,30
digestato 1	média	16,70	11,29	67,62
	desv. padrão	0,18	0,15	1,04
digestato 2	média	29,58	23,66	79,98
	desv. padrão	0,40	0,37	0,18
digestato	média	23,14	17,47	73,80
	desv. padrão	7,06	6,78	6,80

Pode-se observar que os valores de desvio padrão dos substratos e digestatos de ambas as amostras apresentaram valores bastante baixos, indicando que a homogeneidade almejada pelo procedimento de preparação do substrato foi alcançada. Os valores de sólidos totais, entretanto, foram bastante diversos tanto no substrato como no digestato entre as amostras 1 e 2, indicando a ampla faixa de variação em que o reator operou, uma vez que a diluição realizada durante os dois primeiros anos do experimento era feita apenas pela sensibilidade do operador, de forma a garantir o escoamento da mistura preparada pelo duto de alimentação. Observa-se ainda que a relação SV/ST do substrato é bastante alta (em média 93,5%) tanto na primeira como na segunda amostra, indicando um grande potencial de degradação através da biodigestão anaeróbia dos restos de alimentos. O digestato já apresentou relação mais baixa, indicando que houve redução da matéria orgânica disponível. Observa-se também que o digestato da segunda amostra, que foi alimentada com um substrato mais concentrado (ST 85,5% maior que da amostra 1) também se apresentou mais concentrado (ST 77,1% maior) e com um relação SV/ST 18,3% maior, indicando que houve um menor aproveitamento da matéria orgânica disponível no segundo regime de alimentação.

O experimento teve duração total de 840 dias (de 22/12/2020 a 11/04/2023), tendo o reator sido alimentado com 87,535 litros de substrato com os valores de ST e SV médios 104,17 e 97,48 g/kg. Isto significou um valor médio de COV de 0,598 gSV.l_{reator}⁻¹.dia⁻¹ e um TRH médio de 163 dias. A produção de biogás acumulada durante todo esse período foi de 4.831 litros, proporcionando um rendimento médio ao longo de todo o período de 0,566 l_{biogás}.gSV_{ad}⁻¹ e uma produtividade de 0,338 l_{biogás}.l_{reator}⁻¹.dia⁻¹. O valor de rendimento obtido por Souza e Martins (2022), de 0,710 l_{biogás}.gSV_{ad}⁻¹, utilizando um substrato similar em um reator com volume cerca de 10 vezes maior, se apresenta 25% maior, entretanto a produtividade obtida por esses autores, de 0,124 l_{biogás}.l_{reator}⁻¹.dia⁻¹, foi apenas pouco mais de um terço da obtida nessa pesquisa. Isso pode ser explicado pela maior diluição do substrato utilizada pelos autores citados, uma vez que a COV utilizada por eles foi de 0,175 gSV.l_{reator}⁻¹.dia⁻¹, que representa apenas 29% da COV utilizada nessa pesquisa, com um TRH de 110 dias, 34% inferior.

O comportamento do reator se mostrou bastante estável, sem necessitar intervenções, exceto o aumento do intervalo entre alimentações quando havia alguma queda mais significativa do pH, que entretanto ficou entre 6,3 e 8,2. Algumas das interrupções foram ocasionadas por eventos fora de controle da pesquisa, como nos períodos entre 17/08/21 e 11/09/21 (25 dias), 11/02 e 18/03 de 2022 (35 dias) e 13/08 a 01/10 de 2022 (49 dias), entre outros menores, mas permitiram avaliar o comportamento do reator por longos períodos sem alimentação e sua recuperação após o retorno à normalidade. A Figura 3 apresenta os valores de COV, rendimento e produtividade de metano obtidos nos dias de alimentação do reator durante o período de análise.

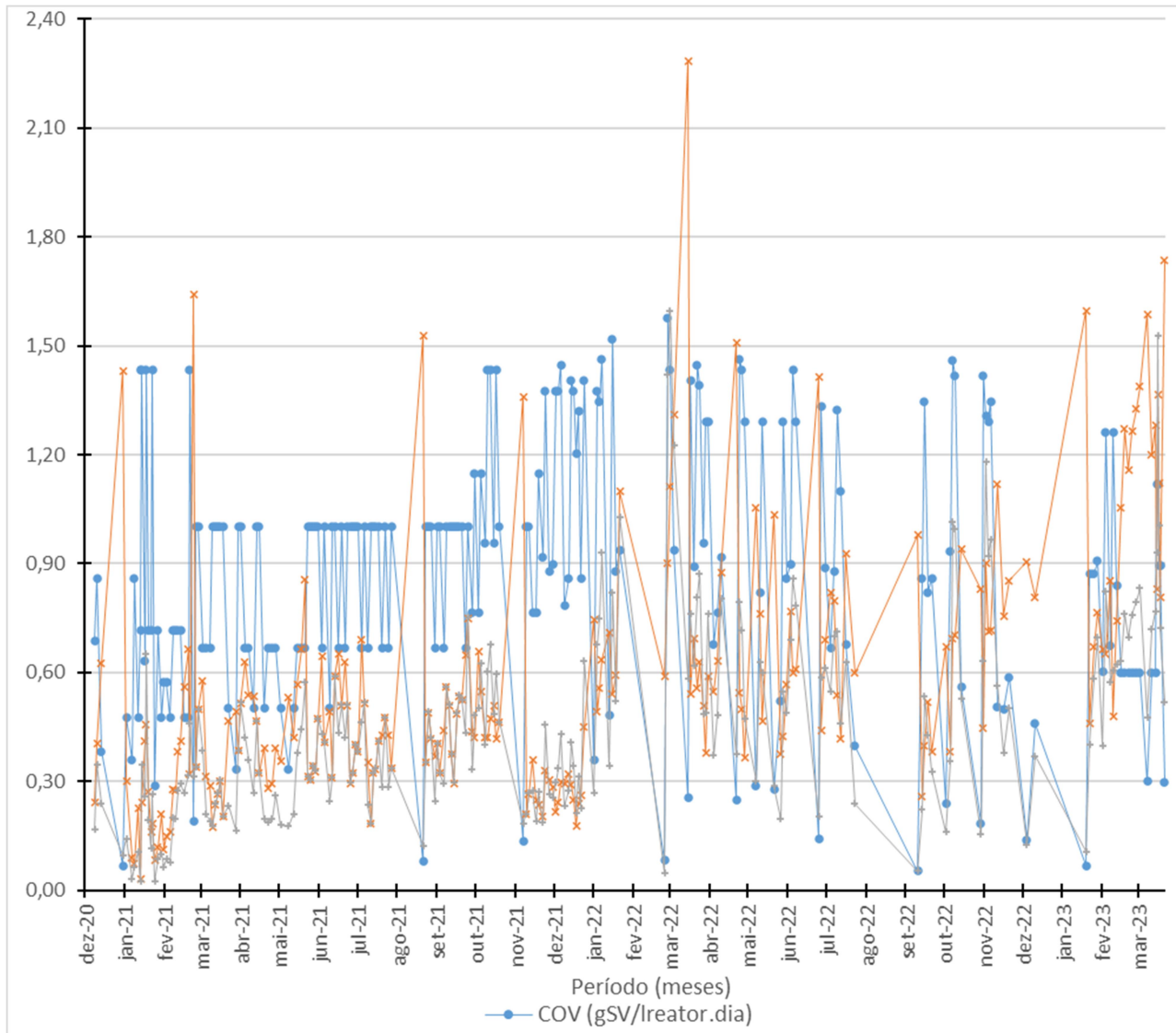


Figura 3: Evolução da COV, rendimento e produtividade de biogás do reator no período de análise.
Fonte: Autor do Trabalho.

Pode-se observar na Figura 3 a grande variação do regime de alimentação, seja pela irregularidade da frequência como também pela quantidade alimentada, o que refletiu numa grande variação da COV e do TRH. Este último, devido aos diversos períodos de pausa na alimentação, variou entre 64 e 1.447 dias. Apesar dessa grande irregularidade de alimentação, observa-se um período de aclimação do reator, nos primeiros meses de 2021, quando apresentou baixos valores tanto de rendimento como de produtividade (abaixo de 0,2) e que foram evoluindo até outubro de 2021 (quando atingiram valores entre 0,4 e 0,6). Entre o final de novembro de 2021 e janeiro de 2022 foram registrados problemas de com a medição de gás, que deve ter sido reduzida pela metade do valor real, reduzindo tanto a produtividade com o rendimento. Após esse período, e o ajuste do medidor, observa-se um comportamento mais coerente, embora muito irregular dos valores de rendimento, que normalmente aumentam com as pausas de alimentação, e produtividade, que normalmente decrescem nesses períodos, assim como a COV.

No período final de acompanhamento do reator, a partir de 9 de fevereiro de 2023, após uma pausa de 40 dias na alimentação, é que se retoma uma rotina mais regular e sistemática de alimentação. Observou-se uma maior rapidez na retomada da produtividade e do rendimento, provavelmente em função de uma maior aclimação do mesmo ao substrato.



A partir de 05 de março de 2023, quando se começa a utilizar o substrato 1, adota-se uma rotina de alimentação de 450 ml a cada 3 dias, observando-se valores de produtividade acima de $0,7 \text{ l}_{\text{biogás}} \cdot \text{l}_{\text{reator}}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ e de rendimento acima de $1,2 \text{ l}_{\text{biogás}} \cdot \text{gSV}_{\text{ad}}^{-1}$.

Finalmente, a partir de 5 de abril de 2023 começa-se a utilizar o substrato 2 com alimentação diária e um acompanhamento da produção de biogás a cada 30 minutos. Nesse período, foi utilizado o substrato 2 com uma diluição, obtendo-se valores de ST e de SV de 81,22 e 76,26 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. A Figura 4 apresenta a evolução do volume de biogás acumulado entre as 10:30 h do dia 7 e as 16:00 horas do dia 11 de abril de 2023, tendo as alimentações ocorrido por volta das 17:00 h dos dias 7, 8 e 11 de abril.

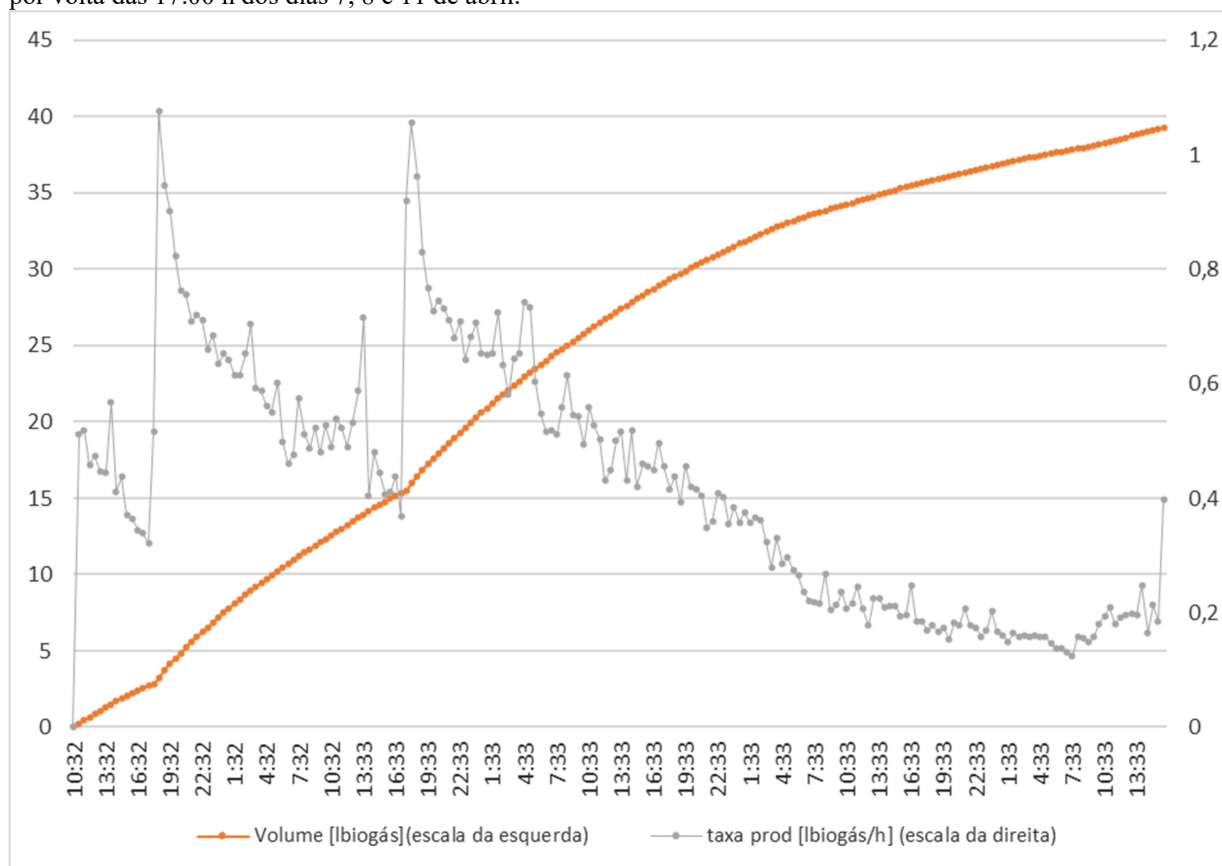


Figura 4: Evolução do volume de biogás acumulado e taxa se produção horária de biogás entre os dias 7e 11 de abril de 2023.

Fonte: Autor do Trabalho.

Observa-se um comportamento bastante regular da taxa de geração de biogás do reator (taxa máxima logo após a alimentação, com pouco mais de $1,0 \text{ l}_{\text{biogás}} \cdot \text{h}^{-1}$, que vai caindo até a próxima alimentação, 24 horas depois para cerca de $0,35 \text{ l}_{\text{biogás}} \cdot \text{h}^{-1}$) quando submetido à alimentação diária (período entre os dias 7 e 9 de abril), que começa a se estabilizar após o segundo dia sem alimentação (período entre o dia 10 e 11 de abril). Uma análise do desempenho apenas do dia 8 (com alimentação diária) e do dia 10 (após dois dias de alimentação com o mesmo substrato (COV de 0,9 e $0,45 \text{ l}_{\text{biogás}} \cdot \text{l}_{\text{reator}}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ respectivamente) nos apresentaria valores médios de produtividade de 0,72 e $0,59 \text{ l}_{\text{biogás}} \cdot \text{l}_{\text{reator}}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ e de rendimento de 0,66 e $0,90 \text{ l}_{\text{biogás}} \cdot \text{gSV}_{\text{ad}}^{-1}$ respectivamente. Essas análises, entretanto, são ainda muito preliminares, pois, de acordo com a VDI 4630 (VDI, 2006), em testes com reatores contínuos, é necessário a alimentação uniforme do reator por um período de 3 TRHs para que este seja considerado estabilizado nessa condição de operação. Nesse caso, o reator em estudo necessitaria de muito mais tempo para adaptar-se a um novo regime de operação.

Observa-se também que, embora contando apenas com um isolamento térmico bastante rudimentar, e sem nenhum controle da temperatura do reator, não houve variação significativa dos índices avaliados entre períodos de verão e inverno durante o período de testes.

O biogás produzido foi utilizado, sempre que o reservatório de gás estava cheio, para o aquecimento de água em um fogareiro adaptado para biogás, obtendo-se combustão completa, indicando que embora não tenha sido feita a análise de



concentração de metano no biogás, esta é suficiente para manter uma combustão adequada em um queimador. O digestato coletado tem sido utilizado para adubação de plantas ornamentais no jardim da residência.

CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi apresentar e discutir resultados obtidos da operação de longo prazo (840 dias) de um reator de digestão anaeróbia de mistura completa em escala de bancada (22 litros de volume total e 17 litros de volume útil) alimentado de forma muito irregular com resíduos alimentares.

O reator operou durante todo este período de forma estável (sem a ocorrência de inibições) e com resultados surpreendentemente animadores em relação aos valores de produtividade ($0,338 I_{\text{biogás}} \cdot I_{\text{reator}}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$) e rendimento ($0,566 I_{\text{biogás}} \cdot \text{gSV}_{\text{ad}}^{-1}$) de biogás, mesmo com uma carga orgânica volumétrica relativamente baixa ($0,598 \text{ gSV} \cdot I_{\text{reator}}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$) e um alto TRH de 163 dias.

Após um período de aclimatação do inóculo ao substrato, que durou alguns meses, em que tanto o rendimento como a produtividade foram crescendo gradativamente, o reator conseguiu operar em condições estáveis, e recuperar seu desempenho mesmo após longos períodos (de até 49 dias) sem alimentação.

O experimento demonstrou a possibilidade de realizar a digestão anaeróbia de forma descentralizada e em pequena escala, mesmo em condições bastante adversas como operação descontinuada por longos períodos, e sujeito a regimes de alimentação e composição de substratos completamente irregulares.

O isolamento térmico, ainda que provido apenas por uma camada de isopor, foi suficiente para atenuar as variações de temperatura ambientais, mantendo as condições dentro do reator estáveis a ponto de seu desempenho não ser afetado de forma perceptível entre as variações térmicas diárias e anuais.

Os resultados animadores obtidos a partir deste experimento de longo prazo, além dos obtidos com um protocolo de alimentação mais regular e um acompanhamento da produção de biogás mais detalhado, indicam a possibilidade de se otimizar a produção de biogás a partir desse tipo de reator e da possibilidade de utilização dessa tecnologia de forma mais ampliada pela sociedade, a exemplo das iniciativas de compostagem dos resíduos orgânicos em escala doméstica (BRASIL, 2017).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA - American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23rd ed. Rice, E.W.; Baird, R.B.; Eaton AD, ed. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation; 2017.
2. Braguglia, C.; Gallipoli, A.; Gianico, A.; Pagliaccia, P. **Anaerobic Bioconversion of Food Waste into Energy: A Critical Review**. *Bioresource Technology*, 248, 37–56, 2018.
3. BRASIL. **Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos: manual de orientação**. Brasília, DF: MMA/SESC/CEPAGRO, 2017.
4. Carmona-Moreno, C, Crestaz E, Cimmarrusti Y, Farinosi F, Biedler M, Amani A, Mishra A, Carmona-Gutierrez A. **Implementing the Water–Energy–Food–Ecosystems Nexus and Achieving the Sustainable Development Goals**. IWA Publishing, 2021.
5. Edwiges T, Frare LM, Alino JHL, et al. **Methane potential of fruit and vegetable waste: an evaluation of the semi-continuous anaerobic mono-digestion**. *Environ Technol.*, 41:921–930, 2020
6. Ntostoglou, E.; Khatiwada, D.; Martin, V. **The Potential Contribution of Decentralized Anaerobic Digestion towards Urban Biowaste Recovery Systems: A Scoping Review**. *Sustainability*, v. 13, 13435, 2021.
7. Oliveira, B.P., Sganzerla, W.G., Léo, P., Forster-Carneiro, T. and Martins, G. **Determination of the biochemical methane potential of food waste after aerobic storage and aeration pretreatment**. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 16: 1733-1743, 2022.
8. Pera A Le, Sellaro M, Bianco M, and Zanardi G. **Effects of a temporary increase in OLR and a simultaneous decrease in HRT on dry anaerobic digestion of OFMSW**. *Environ Technol.*, 43:4463-4471, 2021.
9. Souza, A. C. C. L.; Martins, G. **Biodigestor Boitatá: possibilidades para a recuperação energética descentralizada**. *revista RedBioLAC*, v. 6, p. 4-9, 2022.
10. VDI. **VDI 4630 – Fermentation of Organic Materials Characterisation of the Substrate, Sampling, Collection of Material Data, Fermentation Tests**. 2006.
11. Yue L, Cheng J, Tang S, An X, Hua J, Dong H, and Zhou J. **Ultrasound and microwave pretreatments promote methane production potential and energy conversion during anaerobic digestion of lipid and food wastes**. *Energy* 228:120525, 2021.