

1360 – PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES EM REATOR ANAERÓBIO DE MISTURA COMPLETA SEM CONTROLE DE TEMPERATURA

Juliana Fernandes Moraes Gonçalves⁽¹⁾

Técnica em Sistemas de Energia Renovável (IFMG). Graduanda em Engenharia Ambiental (UFMG).

Cláudio Leite de Souza⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Daniel Felipe Pereira Coelho⁽³⁾

Graduando em Engenharia Ambiental (UFMG). Graduado em Engenharia Civil (FACULDADE ANHANGUERA DE BELO HORIZONTE). Assistente de engenharia (SUMA BRASIL).

Henry Javier Vilchéz Pérez⁽⁴⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Nacional de Engenharia da Nicarágua (UNI). Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Nacional de Engenharia da Nicarágua (UNI). Doutorando em Engenharia Escola de Engenharia Civil, Universidade da Costa Rica (UCR), Costa Rica.

Lucas Guimarães Brighenti⁽⁵⁾

Graduando em Engenharia Civil (UFMG). Licenciado em Matemática (UNOPAR). Técnico em Automação Industrial (SENAI-MG).

Endereço⁽¹⁾: Rua Coroa de Frede, 204 – Mangueiras – Belo Horizonte – Minas Gerais – 30666-230 - Brasil - Tel: (31) 99234-6811 e-mail: julianafmg@ufmg.br

RESUMO

O reaproveitamento de resíduos sólidos orgânicos gerados como parte dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) pode ser usado como alternativa para produção de biogás, como uma fonte de energia renovável. Assim, este estudo avaliou o desempenho de um reator anaeróbio de mistura completa sem controle de temperatura em escala piloto por um período de 210 dias. Operando com uma Carga Orgânica Volumétrica (COV) média de 0,6 a 0,8 kgSV·L⁻¹·d⁻¹, e Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) variando entre 80 e 208 dias, a pesquisa foi dividida em três fases de condição de operação diferentes, em que a primeira apresentou boa estabilidade com produção de metano entre 0,5 e 2,5 LCH₄·L⁻¹·d⁻¹, pH entre 6,8 e 7,4 e relação AI/AP dentro dos limites ideais. A segunda fase foi marcada por instabilidade causada pelo inverno com temperaturas ambiente de até 13°C, o que reduziu a produção de metano para menos de 0,5 LCH₄·L⁻¹·d⁻¹, pH abaixo de 6,8 e relação AI/ AP entre 2,0 e 4,0 indicando acúmulo de ácidos e falha na digestão. Já na terceira fase, após a troca do conteúdo do reator, a temperatura subiu para entre 20 e 33°C e a produção de metano aumentou para entre 1,0 e 4,5 LCH₄·L⁻¹·d⁻¹ com pH estabilizado entre 7,2 e 7,9 e relação AI/ AP em média de 0,19. Os resultados evidenciam que o desempenho do sistema foi fortemente influenciado pela temperatura ambiente, sendo recomendada a implantação de um sistema simples de aquecimento para manter a eficiência do reator, especialmente em períodos mais frios.

PALAVRAS-CHAVE: reator anaeróbio, biogás, digestão anaeróbia, metanogênese.



33º CONGRESSO DA ABES

Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

FITABES 2025

Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental



INTRODUÇÃO

O biogás é uma fonte alternativa de energia que pode ser utilizado para diferentes fins energéticos: produção de eletricidade, fins térmicos, substituição de combustíveis fósseis convencionais em veículos e também injeção em redes de distribuição de gás natural (COELHO et al., 2018). Nesse sentido, a Associação Brasileira do Biogás (ABigás), coloca o biogás como potencial de substituição de toda demanda de importação dos combustíveis de origem fóssil. Uma possibilidade de obtenção desse gás é a partir da digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, correspondente a parte dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados.

A Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2024) registrou no ano de 2023 a geração de 80.957.467 toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos, com mais de 6,1 milhões de Nm³/dia de biometano gerados pelo RSU. Além disso, considerando que aproximadamente metade dos resíduos coletados são orgânicos, até 2022, menos de 1% desses resíduos foram reciclados em todo o território nacional (ABREMA, 2023). Dessa forma, é fundamental que a matéria orgânica disposta irregularmente e que gera impactos ambientais negativos possa receber alternativas tecnológicas e eficazes para seu tratamento.

Como uma forma de tratamento, os digestores anaeróbios permitem a decomposição orgânica realizada por microrganismos anaeróbios, capazes de decompor os resíduos rapidamente. Reatores anaeróbios de mistura completa, CSTR, (*Continuous Stirred Tank Reactor*) suportam elevadas cargas orgânicas volumétricas (1 a 4 kgSV.m⁻³.d⁻¹), sendo caracterizado por ter seu conteúdo em homogeneização devido à presença de sistema de agitação. Esta é a configuração de biodigestor mais utilizada em plantas de biogás, sobretudo quando se trata de codigestão (mistura de substratos) e com concentração de sólidos mais elevada (próximo a 10% v.v-1) (KUNZ et al., 2019). Para a estabilidade do processo em um biodigestor CSTR, o bom funcionamento do sistema de agitação é fundamental. A utilização de sistema de agitação implica em um ganho de 15 a 30% na produtividade de biogás (KUNZ et al., 2019).

OBJETIVOS

Este estudo buscou avaliar a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia de resíduos alimentares com agitação periódica em um reator de mistura completa por um período de 210 dias sem controle de temperatura. Assim, tem-se o objetivo de analisar o manejo de resíduos alimentares em reatores anaeróbios e seu desempenho, buscando custo operacional reduzido.

METODOLOGIA UTILIZADA

Acondicionamento do substrato e inóculo

Os resíduos alimentares utilizados na preparação do substrato foram coletados no restaurante universitário da UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), localizado na plataforma de metanização (pMethar) no Campus Pampulha em Belo Horizonte - Minas Gerais. Os resíduos foram selecionados de forma que não possuísem materiais inorgânicos ou orgânicos que dificultassem a operação do reator, como ossos, talheres e plásticos (FERREIRA, 2021). Em seguida, foi feita a Trituração do material orgânico com adição de excesso de água em triturador industrial (Tritury, ACX 500).

Ao final, o excesso de água era limitado à manutenção do substrato com a concentração cerca de 10% de sólidos totais (ST).

O procedimento de inoculação do reator ocorreu com a utilização de 45 L de lodo anaeróbio proveniente de um reator UASB aplicado ao tratamento de esgoto doméstico. Completou-se o volume útil do reator com adição de 5 L de água de torneira.

Configuração Experimental

O reator utilizado foi construído em PVC (policloreto de vinila) com diâmetro de 0,31 m, altura total de 1,0 m, 72 L de capacidade total e 50 L de volume de trabalho. Os pontos de introdução do substrato e saída de biogás se encontram na parte superior do reator, em que há duas saídas de gás, uma para coleta de amostra e outra para contabilização do biogás gerado, utilizando um medidor do tipo tambor (Ritter, TG05). Na lateral esquerda encontram-se 4 pontos de saída do efluente a alturas de 0,2, 0,4 e 0,6 m, utilizados para o monitoramento do perfil de sólidos e determinação da biomassa presente no reator (Figura 1) (FERREIRA, 2021).



33º CONGRESSO DA ABES

Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

FITABES 2025

Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental

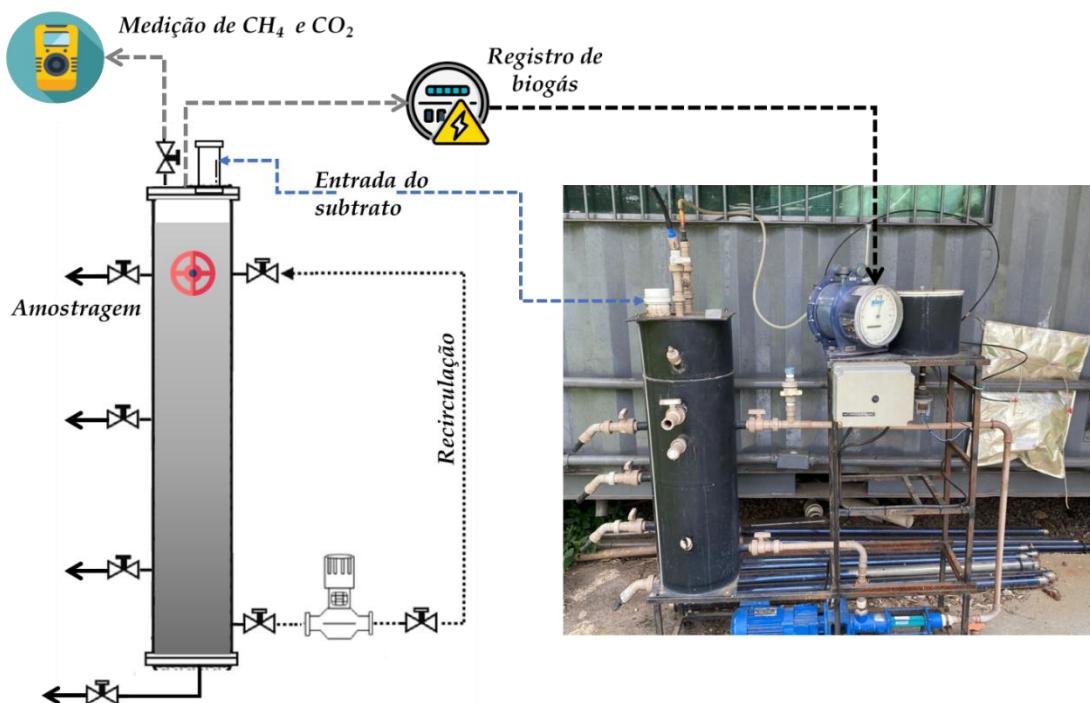


Figura 1: Esquema do aparato experimental.

Operação do sistema

O procedimento de alimentação foi realizado em regime semi-contínuo, com alimentações manuais feitas três vezes na semana (segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira). Assim, realizava-se a extração do efluente (volume compatível com condição operacional aplicada) e, posteriormente, a introdução do substrato. Era fundamental que o processo de retirada ocorresse antes da alimentação, para que esta não interfirisse nos parâmetros físico-químicos analisados posteriormente. A Figura 2 mostra o substrato preparado (A), à esquerda, e o efluente retirado (B), à direita, com o mesmo volume.



Figura 2. Amostras de substrato (A) e efluente (B).

Sistema de agitação

A presença de um sistema de agitação auxiliava na manutenção dos sólidos em suspensão (melhorando o contato entre a matéria orgânica e os microrganismos). Foi adotado um regime de agitação intermitente promovido por uma bomba helicoidal controlada por um temporizador com 30 minutos de agitação a cada 60 minutos. É importante colocar que

não havia sistema de aquecimento acoplado à agitação, o que submetia o reator às variações de temperatura no local.

Fases operacionais

O reator foi operado em temperatura ambiente e a primeira fase representa uma condição estável de operação. Já a segunda fase esteve suscetível a um período de queda de temperatura entre a segunda quinzena de julho e primeira quinzena de agosto de 2024. A cidade de Belo Horizonte registrou temperaturas mínimas com média de 13°C (INMET). Houve pequeno aumento da COV (Carga Orgânica Volumétrica) de 0,6 kg SV·L⁻¹d⁻¹ na primeira fase para cerca de 0,8 kg SV·L⁻¹d⁻¹ na segunda fase e também terceira, conforme Tabela 1.

O TDH (Tempo de Detenção Hidráulica) variou por todo período de 80 a 208 dias. Já a vazão média se manteve em 0,43L·d⁻¹. Nessas condições, tem-se uma COV relativamente baixa e um alto TDH, o que contribuiu consideravelmente para uma maior retenção de lodo no sistema e menor saída de biomassa.

Tabela 1. Fases operacionais, COV e TDH por fase.

Fase	COV (kg SV·L ⁻¹ d ⁻¹)	TDH (dias)
I	0,61	80-130
II	0,79	81-208
III	0,80	91-182

Sistema de coleta de biogás

A produção de biogás foi avaliada a partir da quantidade de metano produzida por dia. Para a aferição de biogás, o primeiro passo foi o uso de saco hermético (bolsa/bag de amostragem de gás), que através de uma seringa captava-se o gás proveniente da saída do reator, conforme mostrado na Figura 3. Antes do preenchimento com o gás do reator, era necessário realizar o esvaziamento completo do saco para a retirada de eventuais gases residuais, em seguida utilizava-se o analisador portátil de biogás GEOTECH para medição da quantidade de metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂).

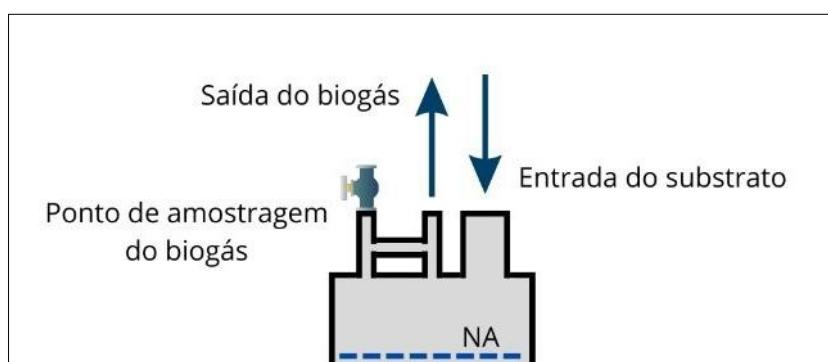


Figura 3. Detalhes da coleta.

Parâmetros analíticos

O monitoramento do desempenho do reator foi realizado com base nos parâmetros evidenciados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros, frequência e respectivas metodologias.

Parâmetro	Amostra	Frequência de monitoramento	Metodologia/Equipamento
pH	substrato e reator	3 vezes por semana	Medidor DM-22-ETH
Temperatura	substrato e reator	3 vezes por semana	Digital TP101 EOS
Alcalinidade a bicarbonatos	reator	2 vezes por semana	(RIPLEY; BOLEY;CONVERSE,1986)
Ácidos totais	reator	2 vezes por semana	
Relação AI/AP	reator	2 vezes por semana	
Volume	biogás	3 vezes por semana	Medidor Ritter® TG3
CH ₄ , CO ₂	biogás	3 vezes por semana	Sensor infravermelho/GEOTECH
Série de sólidos (ST, SV, SF)	susbstrato e efluente	1 vez por mês	2540 B, E, G (APHA, 2012)

pH- Potencial Hidrogeniônico; ST- Sólidos Totais; SV- Sólidos Voláteis; SF: Sólidos Fixos; AI/AP- Alcalinidade Intermidiária/Alcalinidade Total.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação apresentou o acompanhamento da operação do reator com a fase 1 iniciando na semana 38 após sua partida; a fase 2 tendo início na semana 47 e representou o início de instabilidades drásticas na produção de biogás. Na semana 59 (início da fase 3), foi dada uma nova partida, com a troca de todo conteúdo e lodo do reator, e nas primeiras semanas já foi observado melhora no sistema, já atingindo muito boa estabilidade na produção de biogás e outros parâmetros.

Estabilidade do processo

Para avaliar o desempenho do reator, foram utilizados os parâmetros: alcalinidade a bicarbonatos, ácidos totais, relação AI/AP, pH e produtividade de metano. Figura 4 mostra a alcalinidade ($\text{mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$) e os ácidos totais ($\text{mg HAc} \cdot \text{L}^{-1}$).

Com isso, foi iniciada a adição de alcalinidade nas alimentações durante as três primeiras semanas da segunda fase, com doses médias de 40 g/alimentação de bicarbonato de sódio (NaHCO_3) para aumento do pH, que estava abaixo do recomendado. A faixa de pH recomendada para reator metanogênico é de 6,8 a 8,2 (CHERNICHARO, 2007). Nas duas semanas seguintes, foi adicionada apenas água e mesmas doses de bicarbonato, seguindo a tentativa de aumento de pH e melhora no processo de biodigestão sem a adição de carga orgânica, porém, com a permanência de acidez no reator e baixa produção de metano, trocou-se todo conteúdo do reator. A troca marcou o início da terceira fase de operação, considerada a partir da semana 59.

A fase 2 (referente ao período de instabilidade) apresentou grandes concentrações de ácidos totais em relação a alcalinidade e o inverso aconteceu na fase 3. Assim, com a troca do conteúdo e lodo, atingiu-se rápida estabilidade. A literatura apresenta alcalinidades mínimas entre 2.500 e 5.000 $\text{mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ para o desenvolvimento seguro da digestão anaeróbia (FERREIRA, 2021).

O mesmo comportamento foi observado com a relação AI/AP (relação entre a alcalinidade intermediária (AI), devida à dissociação dos ácidos orgânicos intermediários, e a alcalinidade parcial (AP), devida à alcalinidade a bicarbonatos). Valores dessa razão superiores a 0,3 sugerem a instabilidade no processo de digestão anaeróbia (CHERNICHARO, 2007). A Figura 5 mostra a relação entre pH e a relação AI/AP nas diferentes fases de operação. O início da fase 2 indicou valores extremamente altos para esse parâmetro, e apesar da adição de bicarbonato de sódio, a relação AI/AP para esta fase se posicionou entre 2,0 e 4,0. Assim, apenas na fase 3 foi possível retomar valores inferiores a 0,3, com uma média de 0,19 durante todo período.

A partir da segunda fase, os valores para pH ficaram abaixo do limite inferior de 6,8. Porém, ao seu final, esse valor aumentou para cerca de 7,4, com a adição de alcalinidade. O aumento foi ainda mais considerável na fase 3, em que o pH iniciou em 8,20 e se estabilizou entre 7,22 e 7,90. Utilizada como principal parâmetro de monitoramento, a relação AI/AP foi fundamental para a decisão de troca do conteúdo.

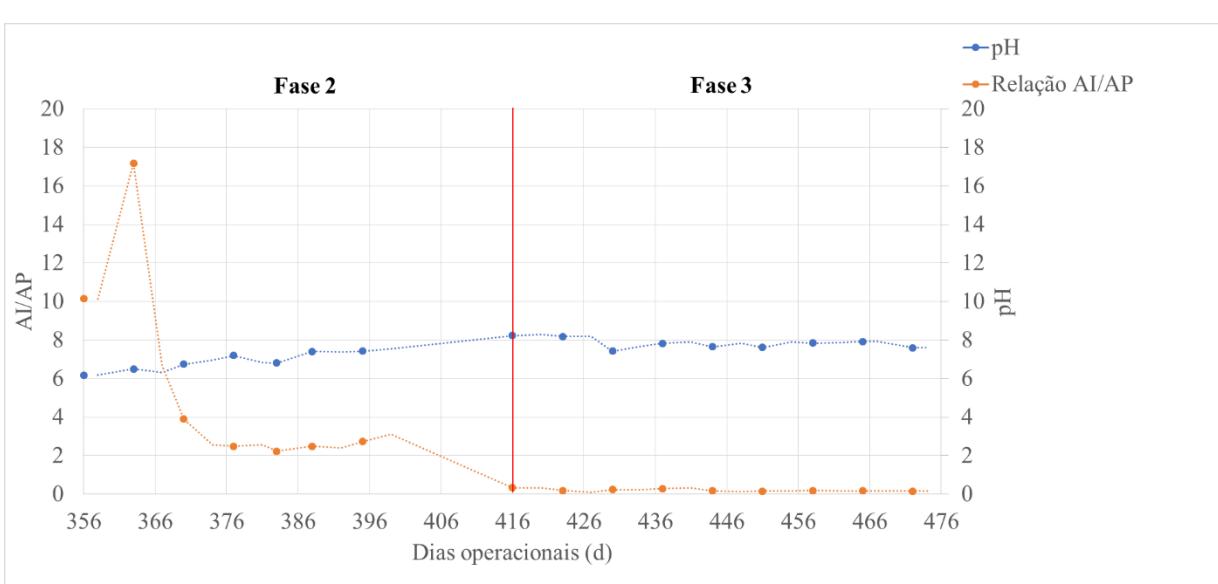
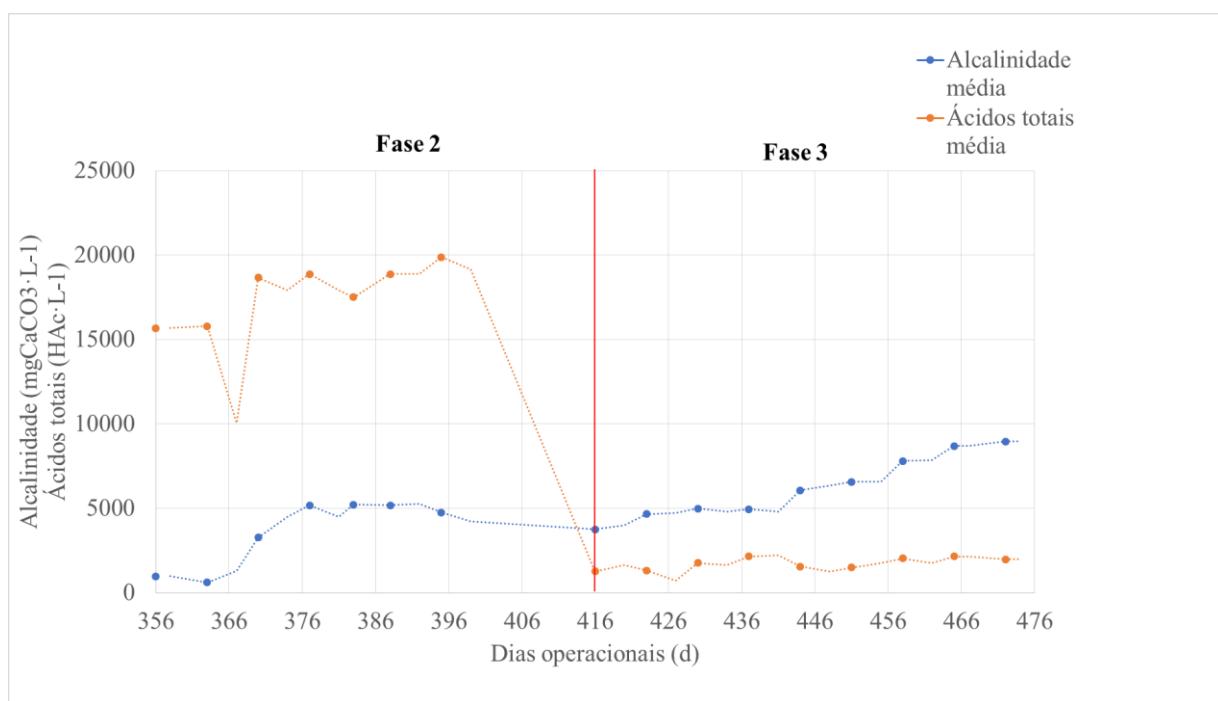


33º CONGRESSO DA ABES

Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

FITABES 2025

Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental



Além de outros fatores químicos anteriormente citados, como o pH, o processo de medição de metano também pode ser considerado um indicador da estabilidade do sistema e um importante fator de monitoramento da metanogênese. Nesse sentido, é importante correlacionar a temperatura do interior do reator com a produção de metano no biogás. O controle da temperatura do reator pode proporcionar valores constantes e mais adequados, como intervalo de 35 a 37°C para sistemas operados em temperatura mesofílica (FERREIRA, 2021).

No entanto, devido à ausência de sistema de aquecimento, as oscilações na temperatura ambiente provocaram, por todo período, temperaturas no interior do reator abaixo desta faixa ótima. A Figura 6 apresenta a produtividade e temperatura do reator anaeróbico.

Na primeira fase, obtiveram-se temperaturas entre 17,0°C e 27,5°C e certa produtividade dentro do esperado, calculada em $\text{LCH}_4 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (0,5 a 2,5). Já na segunda fase, houve queda considerável, correspondente ao período de queda da temperatura ambiente. Nesse sentido, a produção manteve abaixo de $0,5 \text{ LCH}_4 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ por todo período. Para terceira



33º CONGRESSO DA ABES
Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

FITABES 2025
Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental



fase, com o aumento na temperatura, entre 20°C e 33°C, retomou-se a boa produtividade do sistema, entre 1 e 4,5 $\text{LCH}_4 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

Assim, a melhora na produtividade pode ser atribuída à troca do conteúdo/lodo do reator, mas também ao aumento da temperatura, considerando-se, inclusive, que as cargas orgânicas volumétricas (COV) aplicadas mantiveram próximas entre si.

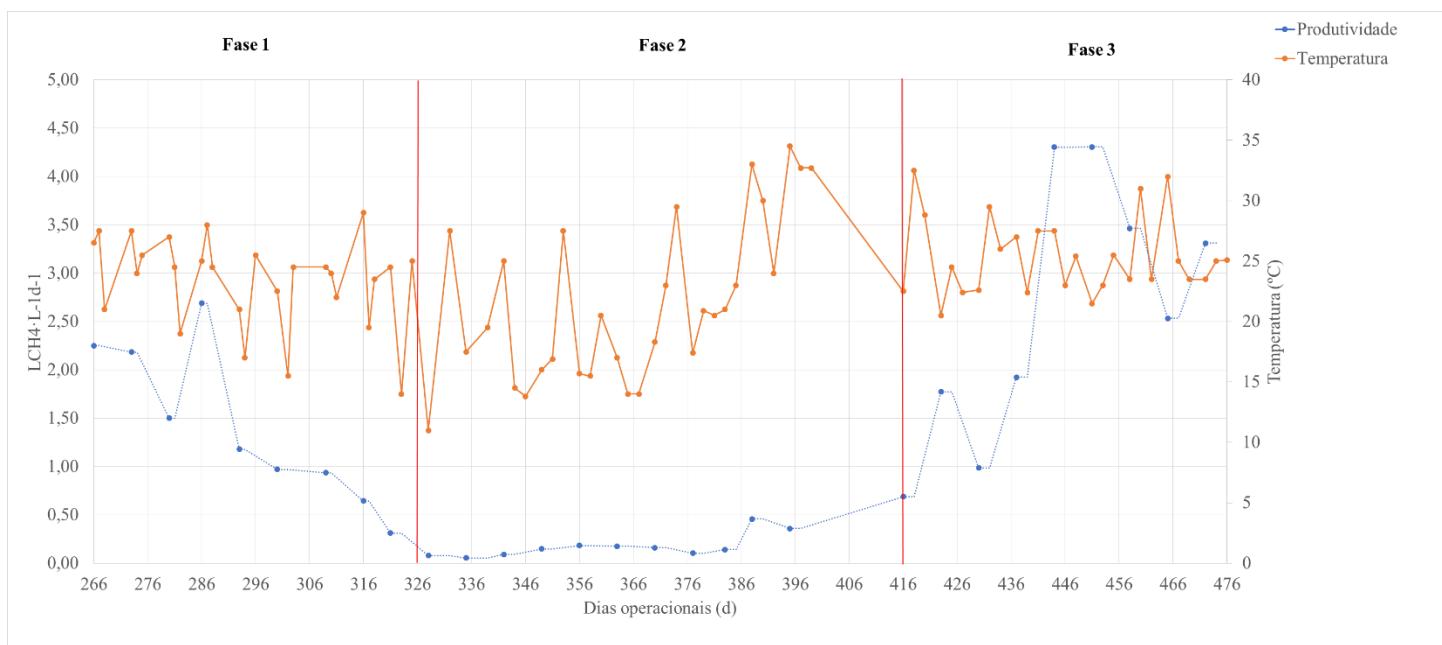


Figura 6: Temperatura e Produtividade.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise de um reator anaeróbio em escala piloto para tratamento de resíduos alimentares por um período de 210 dias apresentou diferentes condições de estabilidade, dado que foi analisado o fim de um período de operação que durou ao todo 13 meses e início de uma nova partida, após o período de inverno.

Com uma carga orgânica de cerca de $0,8 \text{ kgSV} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, ao longo da estação de inverno, na segunda fase experimental, foram necessários esforços ao longo de três semanas para se buscar conter a instabilidade e sobrecarga orgânica. Assim, interrompeu-se a alimentação com substrato e aplicou-se doses elevadas de bicarbonato de sódio. No entanto, a necessidade de troca do conteúdo/lodo do reator foi percebida com as análises de alcalinidade, concentração de ácidos totais e relação AI/AP, que apresentou valores inadequados e sem melhora depois de 7 semanas de monitoramento na fase 2.

A partir da condição de operação suscetível a oscilações de temperaturas, recomenda-se a implantação de um sistema de aquecimento e controle de temperatura, já que o período de instabilidade foi influenciado pela queda da temperatura ambiente, característica da estação climática do período (inverno). Pode-se, inclusive, adotar um sistema de aquecimento e controle simplificado, para manter a temperatura na faixa entre 25 e 30°C, particularmente em períodos mais frios e/ou inverno.

Quando reatores anaeróbios como este são aplicados em larga escala, seguindo os processos de otimização e regulação de sua operacionalidade, diminuindo a ocorrência de inibição da metanogênese e aumentando a disponibilidade de energia renovável, como o biogás, os resultados podem ser cada vez mais ambientalmente amigáveis para a eficiência de cidades sustentáveis. Com isso, o processo de otimização da produção de biogás se torna uma alternativa muito viável, do ponto de vista econômico e ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG; e ao Programa Regulatório de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais – ARSAE-MG e à Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA; que possibilitaram este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biogás- Associação Brasileira do Biogás (ABiogás). Disponível em:<<https://abiogas.org.br/biogas/>> Acesso em 16 jan. 25
- CHERNICHARO, C A de L. *Reatores Anaeróbios*. 2a ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- COELHO, Suaní & Pecora, Vanessa & Santos, Marilin. Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano, 2018.
- INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE/USP/SYNERGIA
- FERREIRA, T.B. Digestão Anaeróbia de resíduos sólidos alimentares: avaliação de diferentes configurações de sistemas simplificados e estratégias operacionais no desempenho do processo; 2021. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2021.
- Guia Prático do Biogás Geração e Utilização. Projeto Brasil Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás (PROBIOGAS). Disponível em: <<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/guia-pratico-do-biogas.pdf>>. Acesso em 23 dez. 2024
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Gráficos meteorológicos. Disponível em:<<https://tempo.inmet.gov.br/Graficos/A001>>. Acesso em: 29 dez. 2024
- Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). Disponível em:<<https://www.abrema.org.br/download-panorama-2023/>>. Acesso em 06 jan. 2025
- Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). Disponível em:<<https://www.abrema.org.br/download-panorama-2023/>>. Acesso em 06 jan. 2025
- KUNZ, A., STEINMETZ R. L. R., AMARAL, A. C. do. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato, 2019. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves-209p.