

BIODIGESTOR SEMI-CONTÍNUO DESENVOLVIDO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA CO-DIGESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DE BAIXA BIODEGRADABILIDADE

Data de aceite: 02/05/2023

Claudinei de Souza Guimarães

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola de Química
Departamento de Engenharia Bioquímica
<http://lattes.cnpq.br/4751042363197664>

RESUMO: O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um biodigestor anaeróbio automatizado com capacidade de operar em sistema semi-contínuo ou batelada para produção de biogás. Biomassa com baixa biodegradabilidade tem pouca eficiência na produção de biogás por processos de digestão anaeróbia e uma alternativa eficiente está na utilização de bioprocessos em sistema semi-contínuo. Foram realizados dois experimentos nas mesmas proporções, mas processos diferentes, e todos os parâmetros de controle e automação foram testados e avaliados. Para teste foi utilizado misturas de resíduo orgânico, lodo anaeróbio (inóculo) e esgoto bruto sem qualquer tratamento da estação de tratamento de esgoto, em fase mesofílica (37°C), durante 60 dias de experimento. O sistema semi-contínuo apresentou maior redução de matéria orgânica, expressa com a remoção de 80,7% Sólidos Voláteis (SV)

e o maior volume (68,5L) e porcentagem de metano (78,5%). Por fim, com estes e outros resultados encontrados foi possível concluir que o biodigestor desenvolvido para sistema semi-contínuo, com o sistema de automação e controle foi satisfatório para a redução da matéria orgânica e produção de biogás. Além de todos os parâmetros operacionais funcionando corretamente e com a utilização de tecnologias atuais e de baixo custo, tornando viável a aplicação e desenvolvimento em maior escala no futuro.

PALAVRAS-CHAVE: Biodigestor, Biogás, Co-digestão, Automação de processos.

SEMI-CONTINUOUS BIODIGESTER DEVELOPED FOR THE PRODUCTION OF BIOGAS FROM THE CO-DIGESTION OF LOW BIODEGRADABILITY ORGANIC WASTE

ABSTRACT: The main objective of this work was to develop an automated anaerobic digester capable of operating in a semi-continuous or batch system for the production of biogas. Biomass with low biodegradability has little efficiency in the production of biogas by anaerobic digestion processes and an efficient alternative is the use of bioprocesses in a semi-continuous

system. Two experiments were carried out in the same proportions, but different processes, and all control and automation parameters were tested and evaluated. For the test, mixtures of organic waste, anaerobic sludge (inoculum) and raw sewage without any treatment from the sewage treatment plant were used, in the mesophilic phase (37°C), during 60 days of experiment. The semi-continuous system showed the greatest reduction of organic matter, expressed with the removal of 80.7% Volatile Solids (VS) and the greatest volume (68.5L) and percentage of methane (78.5%). Finally, with these and other results found, it was possible to conclude that the biodigester developed for a semi-continuous system, with the automation and control system, was satisfactory for the reduction of organic matter and biogas production. In addition to all operating parameters working correctly and using current and low-cost technologies, making the application and development on a larger scale in the future.

KEYWORDS: Biodigester, Biogas, Co-digestion, Process automation.

1 | INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas ambientais da sociedade atual é o aumento contínuo da produção de resíduos sólidos orgânicos e seus descartes com baixa biodegradabilidade, além do esgoto. Em muitos países, os gerenciamentos sustentáveis de resíduos, assim como a prevenção e redução de resíduos, tornaram-se importantes prioridades políticas, representando uma parcela importante dos esforços comuns para reduzir a poluição e mitigar as mudanças climáticas globais (VENKATESH; ELMI, 2013; BEDOIC' *et al.*, 2021). Um gerenciamento inteligente dos resíduos orgânicos possibilita a recuperação energética, seja ela realizada pela ainda tradicional incineração ou pela compostagem e digestão anaeróbia (ERIKSSON *et al.*, 2005; BOLZONELLA *et al.*, 2006). Sendo assim, uma alternativa de recuperação energética dos resíduos orgânicos é o uso do biogás, seja ele gerado nos aterros sanitários ou em processo de digestão anaeróbia (LI *et al.*, 2020). O processo de digestão anaeróbia realizados em biodigestores anaeróbios pode desempenhar um papel significativo em questões fundamentais para a sociedade: gerenciamento e tratamento de resíduos e esgoto e a produção de energia renovável (AUDU *et al.*, 2020). Além de estabilizar a carga orgânica de resíduos, gera produtos como biogás, rico em metano, e digerido, que pode ser utilizado como condicionador de solo, historicamente utilizado para estabilizar lodo oriundo de tratamento de esgoto, embora seja uma aplicação viável para qualquer tratamento da matéria (HAGOS *et al.*, 2017). Também é importante destacar a aplicação de processos anaeróbios em pequena e grande escala, com baixo custo de implantação, baixa demanda de área e boa tolerância a altas cargas orgânicas (LI; PARK; ZHU, 2011). Portanto, a produção de biogás e o desenvolvimento de tecnologias para geração de biometano têm sido incentivados por muitos países como alternativa para geração de eletricidade ou cogeração de motores internos (CHERNICHARO, 1997; BUDZIANOWSKI; BUDZIANOWSKA, 2015).

O biodigestor é uma alternativa para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

previsto nas Organizações das Nações Unidas e contribui para a redução das emissões dos poluentes na atmosfera (ONU, 2022). Além disso, promove o desenvolvimento sustentável local pelo tratamento dos resíduos orgânicos gerados por uma determinada atividade, possibilitando, além da energia, o uso final do resíduo como um biofertilizante, reduz a geração de energia elétrica de fonte não renovável e reduz o consumo de água de processos (PATTERSON *et al.*, 2011). O uso do biodigestor permite melhorar as condições sanitárias das propriedades, resultando na qualidade de vida e da saúde da população e do ambiente. Atualmente, os biodigestores construídos no Brasil e em diversos países são dispendiosos, principalmente na implantação e operação. Um dos principais motivos é a falta de tecnologia nacional, principalmente, dos sistemas de monitoramento, controle e automação.

No entanto, para viabilização da geração de energia, é necessário o uso de biodigestores anaeróbios, construídos a baixo custo e com alta tecnologia, apesar de sua tecnologia moderna, e métodos simples de utilização do sistema visando a reprodutibilidade em larga escala e aplicação industrial. Desta forma, o objetivo principal deste estudo foi desenvolver biodigestores anaeróbios em sistema semi-contínuo, com sistemas de controle e automação, a fim de desempenhar um papel significativo em duas questões cruciais para a sociedade e na proteção ambiental e recuperação de recursos. Outro aspecto muito importante, além de produzir tecnologia nacional, será diminuir a problemática dos descartes de resíduos orgânicos e esgoto na comunidade, área rural e industrial, diminuindo a quantidade desses resíduos no ambiente e gerando novas fontes de energia para os próprios geradores desses resíduos e como alternativa de digestão anaeróbia de biomassa com pouca biodegradabilidade.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Desenvolvimento e Construção do Biodigestor

A concepção desse projeto teve como fundamentos principais a utilização de materiais resistentes ao ambiente do processo de digestão anaeróbia e o desenvolvimento de sistemas com tecnologias atuais e métodos simples e robustos de utilização. Diante do exposto, optou-se pelo desenvolvimento de biodigestores anaeróbios verticais encamisados, em escala de bancada, em um único estágio, com alimentação semi-contínua ou batelada e equipado com sistemas de aquecimento com um elemento de aquecimento externo ao biorreator, agitação por meios mecânicos utilizando um eixo longo e com entrada vertical ao biorreator, coleta e armazenamento de biogás e controle, monitoramento e automação. Nesse projeto foi desenvolvido um biorreator encamisado em vidro, com geometria cilíndrica, com um volume nominal de 1,3 L e as seguintes dimensões: altura 170 mm, diâmetro 100 mm e espessura da parede de três mm. A camisa apresenta o mesmo volume do biorreator e com dimensões de 190 mm de altura, 150 mm de diâmetro e espessura

de parede de 3 mm. A primeira etapa desse trabalho foi o desenvolvimento de um modelo 3D e do desenho técnico, utilizado para fabricação, do biorreator com o uso do software Solidworks, versão 2019. Cabe destacar que esse software foi utilizado para a criação dos modelos 3D e desenhos técnicos de todas as peças e montagens desenvolvidas nesse projeto. Na Figura 1 é apresentado o modelo 3D do biorreator.

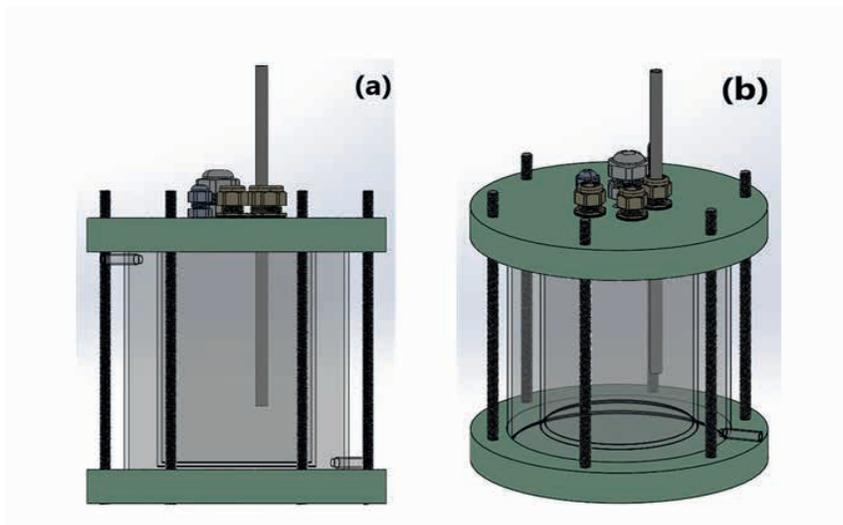


Figura 1 – Modelo 3D do biorreator. (a) vista frontal e (b) vista isométrica.

Fonte: Autoria própria (2023).

2.1.1 Desenvolvimento e construção do sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento foi embasado em um elemento de aquecimento externo ao biorreator. A transferência de calor ocorre através do aquecimento de um fluido térmico, por meio de uma resistência elétrica, transferido para a camisa do biorreator por bomba centrífuga. O projeto desse sistema é composto por um recipiente, para comportar o fluido térmico, uma resistência elétrica, uma tampa para o recipiente, um poço termométrico para um sensor de temperatura e uma bomba d'água. O recipiente para comportar o fluido térmico foi projetado, em modelo 3D, com geometria cilíndrica, com um volume nominal de 1,7 L, para ser confeccionado em vidro e as seguintes dimensões: altura 150,0 mm, diâmetro 136,0 mm e espessura da parede de 3,0 mm. Esse sistema de aquecimento foi projeto para utilizar como elemento de aquecimento uma resistência, tipo cartucho, comercial com as seguintes características: 12,7 mm de diâmetro, 152,4 mm de comprimento e uma potência entre 850-1000 Watts (W); um poço termométrico reto, em aço inoxidável, e com um diâmetro interno de 6 mm e uma bomba d'água alimentada com 12 Volts Corrente Contínua (VCC).

2.1.2 Desenvolvimento e construção do sistema de agitação

Nesta etapa, foi desenvolvido um modelo de agitação por meios mecânicos utilizando um eixo longo e com entrada vertical ao biorreator. Esse modelo proporciona uma mistura melhor em comparação às barras magnéticas de agitação e foi projetado para utilizar um motor elétrico, com controle de velocidade, e uma haste de agitação. Foi desenvolvido uma haste de agitação com hélice de pás retas, em aço inoxidável. A passagem e o movimento de rotação da haste na tampa do biorreator são um ponto sensível na vedação do sistema ao ar ambiente. Portanto, nesse projeto foi utilizado um sistema de dupla vedação utilizando um retentor com dimensões de 8,00 mm x 14,00 mm x 3,00 mm e um anel de vedação com diâmetro de seção de 3,53 mm e diâmetro interno de 7,52 mm.

2.1.3 Desenvolvimento e construção do sistema de controle, monitoramento e automação

O sistema de controle, monitoramento e automação escolhido para compor o biodigestor foi um Controlador Lógico Programável (CLP) que se comunica com um microcomputador por meio de um software supervisor. Esse sistema foi desenvolvido por completo: hardware, firmware e software supervisor (GUIMARÃES; MAIA, 2018). O hardware projetado pode ser dividido em quatro partes principais: microcontrolador - Unidade Central de Processamento, módulos de entrada e condicionamento de sinais dos sensores, módulos de saída e potência e comunicação entre o microcomputador–microcontrolador. A concepção desse hardware visou atender as seguintes necessidades do sistema: três entradas analógicas, para os sensores de temperatura e pH; cinco atuadores de potência — para a resistência elétrica, bomba d'água, motor de agitação e 2 bombas peristáltica — e o sistema de comunicação entre o microcomputador–microcontrolador, conforme apresentado na Figura 2. Na parte da unidade central de processamento foi utilizado o microcontrolador PIC16f877a, do fabricante Microchip. Esse Circuito Integrado Programável (PIC) foi designado em virtude de suas características atenderem a todas as necessidades preestabelecidas nesse projeto.

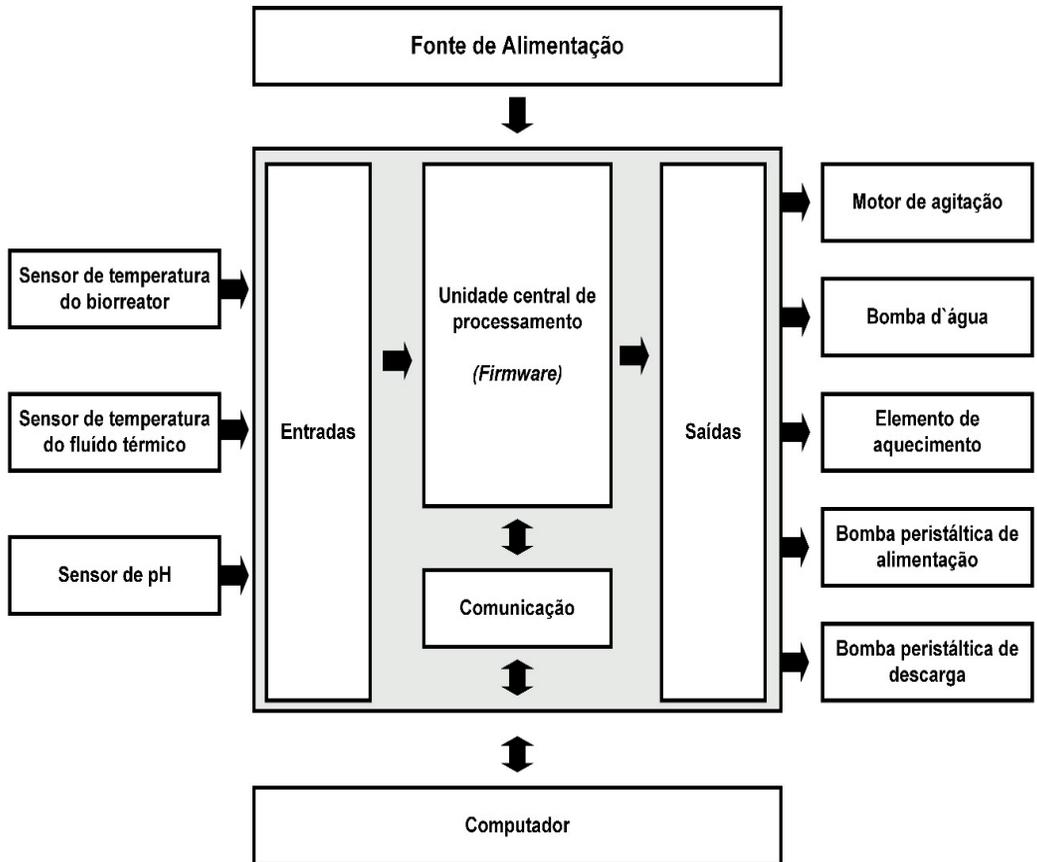


Figura 2 – Esquema completo do Controlador Lógico Programável.

Fonte: Autoria própria (2023).

2.1.4 Desenvolvimento do software supervisor

O software supervisor de controle, monitoramento e automação foi desenvolvido por meio do software Microsoft Visual Studio 2012 utilizando a programação orientada a objetos e a linguagem de programação Visual Basic.NET (VB.NET) e teve como requisitos, definidos na sua concepção inicial, o monitoramento online de temperatura e pH, controle automatizado de acionamento da bomba d'água e motor de agitação e de temperatura, sistema de alarme para os principais parâmetros críticos, armazenamento de dados coletados em um banco de dados, análise e visualização dos parâmetros monitorados in loco e por acesso remoto.

2.1.5 Construção e desenvolvimento de um sistema de coleta e armazenamento de biogás

O processo de alimentação contínua requer o desenvolvimento de um sistema de

coleta antirrefluxo e armazenamento de biogás em razão das diferentes pressões formadas no sistema durante a entrada/saída de material e a formação do biogás. A concepção do sistema para esse projeto é composta por frasco lavador de gás sem placa porosa comercial, uma válvula de retenção de baixa pressão e um dispositivo de armazenamento do biogás gerado. Nesse sistema foi desenvolvido, em substituição ao frasco lavador, uma armadilha gás/líquido utilizando um frasco reagente, com um volume de 250 mL, e dois conectores do tipo engate rápido com o intuito de proteger a válvula de retenção e o dispositivo de armazenamento de biogás. Para armazenamento de gás foram utilizadas bolsas de tedlar de 5 L, obtidas da Sigma Aldrich, também conhecidas como bolsas de coleta para gases. Essas bolsas são construídas de um finíssimo filme de tedlar, que se caracteriza como material não reativo, além de ser extremamente baixo em permeabilidade e flexível numa vasta faixa de temperaturas. O biogás gerado no biodigestor foi direcionado a bolsa de coleta de gases através de uma mangueira de Poliuretano.

2.2 Caracterização das amostras para testar a operacionalidade do biodigestor desenvolvido e produção do biogás

Com o objetivo de avaliar o desempenho operacional do biodigestor desenvolvido e a eficiência da produção de biogás, foram realizados dois experimentos, sendo o primeiro com bioprocessamento em batelada e o outro em sistema semi-contínuo de uma co-digestão de resíduo alimentar, lodo anaeróbico (inóculo) e esgoto bruto. A amostra de esgoto bruto foi obtida antes de qualquer tipo de tratamento da estação de tratamento de esgoto. A caracterização foi realizada em termos de umidade, pH e Sólidos Totais (Voláteis e Fixos). O lodo anaeróbico utilizado como inóculo nos experimentos foi coletado do reator UASB em operação de uma indústria local, sendo realizadas as mesmas caracterizações para o esgoto bruto e depois da caracterização, o lodo foi armazenado sob refrigeração (4°C) até o momento do uso. Todas as análises foram determinadas de acordo com (APHA, 2005). A coleta dos resíduos alimentares foi realizada após o período de refeição no restaurante da Universidade Federal do Rio de Janeiro, onde a sobra removida dos pratos e utensílios era submetida a uma triagem, para separação da fração orgânica, e homogeneizada por meio de quarteamento, conforme norma brasileira (ABNT, 2004). Em seguida, o material homogeneizado era triturado com água destilada nas devidas proporções, sendo parte do material triturado (denominado resíduo alimentar) armazenado sob refrigeração (4°C) até o momento de uso e parte preservado em freezer (-20°C). Os dois experimentos foram conduzidos na mesma proporção durante 60 dias, com adição de lodo anaeróbico (inóculo) na proporção de 20%, para avaliação do efeito da sementeira. No sistema em batelada só teve uma adição das misturas (resíduo, esgoto bruto e lodo) no início do experimento e no sistema semi-contínuo era alimentado nas mesmas proporções das misturas até que completasse 1L do volume do biodigestor, de 15 em 15 dias durante a realização do experimento. A umidade selecionada, também, foi usada como base para a mistura

dos resíduos nos experimentos no biodigestor. As misturas tiveram seu pH corrigido para valores entre 7 e 8 empregando-se solução 1 M de bicarbonato de sódio (NaHCO_3). Nestes experimentos, as análises de Sólidos Totais (voláteis e fixos), umidade e pH eram realizadas em triplicata antes e após o processo de digestão anaeróbia.

2.3 Caracterização do biogás produzido

A caracterização do biogás produzido foi feita para os compostos de CO_2 , CH_4 e H_2S e realizadas por cromatografia em fase gasosa (CG). Foram feitas curvas de calibrações com 6 pontos de concentrações definidos. Todas as amostras foram realizadas em duplicatas com padrões da White Martins e erros menores que 5%. As condições cromatográficas para o CO_2 e CH_4 são descritas a seguir: CG Agilent Technologies, modelo 7820A com detectores de condutividade térmica (DCT) e de ionização de chamas (DIC). Tipo de Coluna: HP-PLOT Q; Entrada com divisor de Fluxo 2:1; Aquecedor: T = 200 °C, P = 8 psi; Coluna: Fluxo = 7 mL/min, P = 8 psi, P = constante; Forno: T = 35°C, Tempo = 6,0 minutos, Fluxo referência = 26 mL/min, Fluxo auxiliar = 5 mL/min e Gás de Arraste = He. As condições cromatográficas para o H_2S foram: Varian CP-4900 Micro CG com detector DCT, Coluna PoraPlot Q (PPQ), Pressão da Coluna = 21 psi, Temperatura do Injetor = 80°C, Temperatura da Coluna = 50°C, Tempo de Injeção = 20 ms, Tempo = 100 s e Gás de Arraste = He.

3 | RESULTADOS

3.1 Construção do biorreator

O biorreator é a parte central do processo de produção de biogás. A Figura 3 apresenta o biorreator encamisado, confeccionado em vidro e com um volume de 1,3 L e as seguintes dimensões: altura 170mm, diâmetro 100mm e espessura da parede de 3mm. A camisa apresentou o mesmo volume do biorreator e com dimensões de 190mm de altura, 150mm de diâmetro e espessura de parede de 3mm. Para manter o ambiente hermeticamente fechado foram projetadas uma tampa e a uma base para fixação, em poliuretano, unidas por barras rosqueadas, com porcas borboletas, que permitem manter o biorreator hermeticamente fechado. Além de 5 bocas com conectores em nylon que viabilizaram a fixação do poço termométrico, de uma sonda de pH comercial, da mangueira de retirada de biogás e as mangueiras de entrada/saída de material.

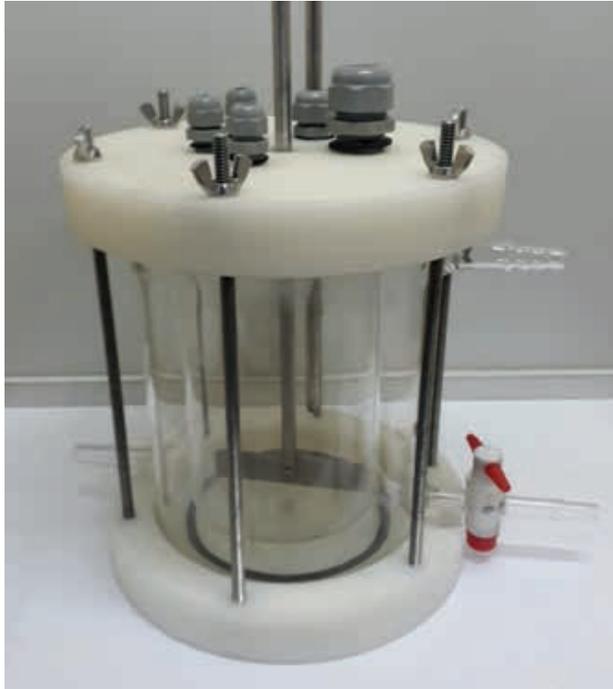


Figura 3 – Biorreator encamisado completo desenvolvido.

Fonte: Aatoria própria (2023).

3.2 Construção do biodigestor com sistemas de aquecimento e agitação

O fornecimento de calor a um biodigestor tem como propósito manter constante a temperatura no interior do biorreator. A resistência utilizada do tipo cartucho com 1000 W de potência e a bomba d'água adquiridas para serem utilizadas no sistema de aquecimento. Foi desenvolvido um modelo de agitação por meios mecânicos utilizando um eixo longo e com entrada vertical ao biorreator e que opere com lenta rotação dos agitadores, em intervalos de tempo breves e previamente definidos. Para efetuar a rotação da haste de agitação foi adquirido e utilizado um agitador mecânico digital, bivolt e com dois eixos de acionamento. A Figura 4 apresenta o sistema de aquecimento e agitação do biodigestor desenvolvido.



Figura 4: Biodigestor com sistema de aquecimento e agitação

Fonte: Autoria própria (2023).

3.3 Construção da unidade de controle e desenvolvimento do software supervisor

O Controlador Lógico Programável é um equipamento eletrônico digital, composto por um hardware e um software embarcado (firmware), que desempenha funções de automação, controle e monitoramento. Após a montagem do hardware e a programação e gravação do firmware o CLP, as fontes de alimentação, a bomba d'água e as válvulas peristálticas, utilizadas no sistema de entrada e retirada de material do biorreator, foram acondicionadas em uma caixa metálica desenvolvida para esse projeto, conforme apresentado nas Figuras 5 e 6. O supervisor desenvolvido é um tipo de software para supervisão e controle de processos em tempo real e aquisição de dados e teve por objetivo realizar todas etapas em interfaces simples e intuitivas.

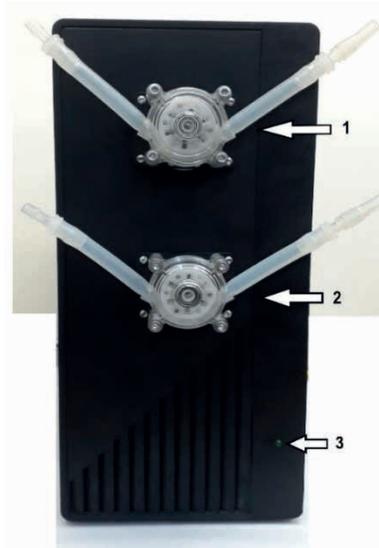
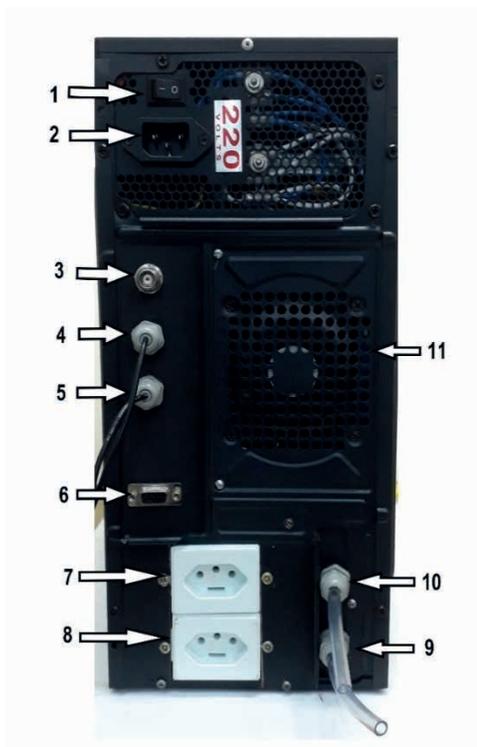


Figura 5: Vista frontal da unidade de controle. (1) Bomba peristáltica de entrada de material, (2) Bomba peristáltica de saída de material e (3) Led indicativo alimentação de energia do sistema.

Fonte: Autoria própria (2023).



- 1 - Botão liga/desliga.
- 2 – Entrada cabo de alimentação.
- 3 – Conector sensor de pH.
- 4 – Sensor de temperatura do biorreator.
- 5 – Sensor de temperatura do fluido térmico.
- 6 – Conector de comunicação rs232.
- 7 – Alimentação AC da resistência.
- 8 - Alimentação AC do agitador.
- 9 – Entrada do fluido térmico para bomba de circulação.
- 10 – Saída do fluido térmico para bomba de circulação.
- 11 – Ventoinha.

Figura 6: Vista posterior da unidade de controle.

Fonte: Autoria própria (2023).

3.4 Sistema operacional completo do biodigestor

Um esquema completo do biodigestor anaeróbio vertical encamisado, em escala de bancada, em um único estágio, podendo ser utilizado em sistema semi-contínua ou batelada e equipado com sistemas de aquecimento, agitação por meios mecânicos, coleta e armazenamento de biogás e controle, monitoramento e automação, desenvolvido e utilizado nesse projeto está representado na Figura 7.

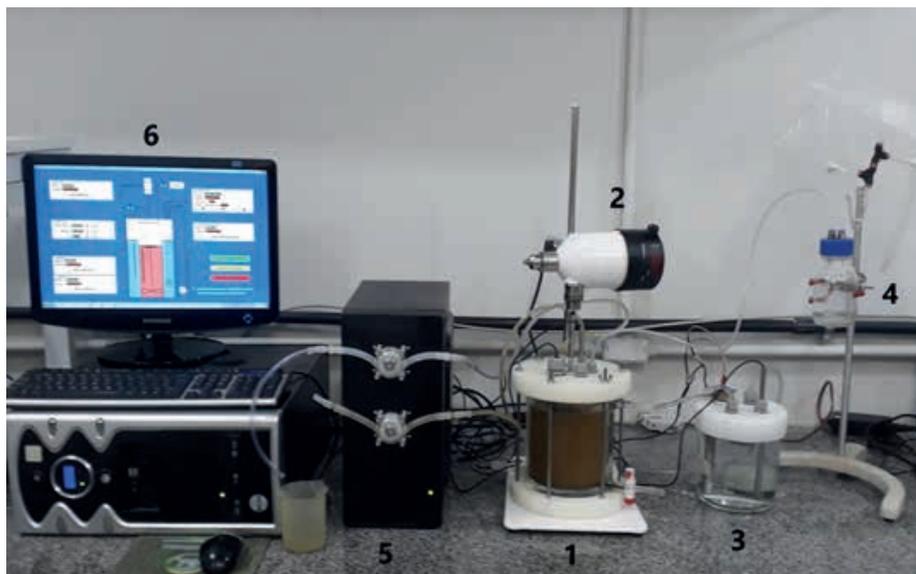


Figura 7: Experimentos de operacionalidade e eficiência nos biodigestores construídos. (1) Biorreator, (2) Sistema de agitação, (3) Sistema de aquecimento, (4) Sistema de coleta e armazenamento de biogás, (5) unidade de controle e automação e (6) Software supervisor.

Fonte: Autoria própria (2023).

3.5 Teste operacional do biodigestor desenvolvido e construído para produção de biogás

3.5.1 Caracterização dos resíduos

Durante a etapa de eficiência entre a produção de biogás com biodigestor em sistema semi-contínuo e a operação em sistema em batelada, foram feitas três coletas do lodo secundário, resíduo alimentar e esgoto bruto antes do tratamento na estação de tratamento de esgoto para Os Sólidos Fixos Totais (SFT), Sólidos Voláteis Totais (SVT), pH e Nitrogênio Total (TKN). As caracterizações são apresentadas na Tabela 1.

Parâmetros	Resíduo alimentar	Esgoto bruto	Lodo
	(Média ± SD)	(Média ± SD)	(Média ± SD)
Mistura %	82,6 ± 8,2	91,5 ± 2,1	98,6 ± 4,1
pH	5,1 ± 0,2	5,7 ± 0,6	8,1 ± 0,1
SFT (mg/g)	9,4 ± 4,6	2,0 ± 0,2	18,7 ± 2,1
SVT (mg/g)	115,4 ± 25,1	1,4 ± 0,2	34,4 ± 2,4
TKN (mg/L)	5,6 ± 1,1	29,6 ± 5,4	24,4 ± 4,2

Tabela 1: Caracterização dos resíduos usados nas misturas.

Fonte: Autoria própria (2023).

3.5.2 Eficiência da co-digestão nos diferentes tipos de processos

Nesta etapa do trabalho, o objetivo foi testar o biodigestor e a eficiência da co-digestão para produção do biogás. Desta forma, foram realizados dois experimentos. O experimento 1 foi realizado em sistema de batelada e o experimento 2 em sistema semi-contínuo, ambos durante 60 dias. Nos dois experimentos foram utilizados mistura de resíduo alimentar, esgoto bruto sem tratamento e lodo anaeróbio (inóculo) nas mesmas proporções. Sendo que no experimento 2, a cada 10 dias era alimentado até o final dos 60 dias de experimento e o experimento 1 somente foi alimentado no início do experimento. A eficiência do bioprocessamento da co-digestão anaeróbia dos experimentos apresentou para o Experimento 1, baixa remoção de sólidos voláteis (SV), comparado com o Experimento 2, mas com constante remoção desde o início do experimento. Para o Experimento 1, foram obtidos a remoção dos sólidos totais e voláteis de 52,5% Sólidos Totais (ST) e 60,4% SV e para o Experimento 2, apresentou alta remoção de matéria orgânica, expressada com a remoção de 68,5%ST e 80,7%SV. Srisowmeya et al. (2019), para processos realizados com resíduo sólido urbano e em temperaturas mesofílicas, foram encontrados remoções de sólidos voláteis nas faixas de 71,6% com tempo de retenção de 24 dias, em casos onde há recirculação a remoção pode ser otimizada, chegando a 80% em 12 dias. A taxa média de produção e o volume total de biogás produzido no experimento 1, foram respectivamente, 0.4 L/dia e 18.5 L e para o experimento 2, respectivamente, 1,5 L/dia e 68,5 L. O perfil de eficiência da produção de metano associada à variação de pH na produção de biogás e apresentado na Figura 8. O comportamento do H₂S foi semelhante para os dois biodigestores.

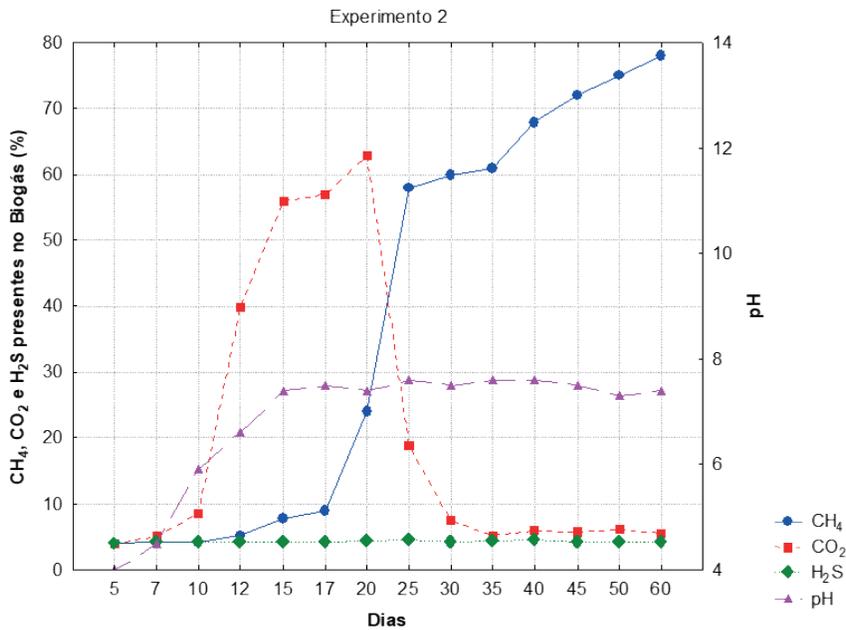
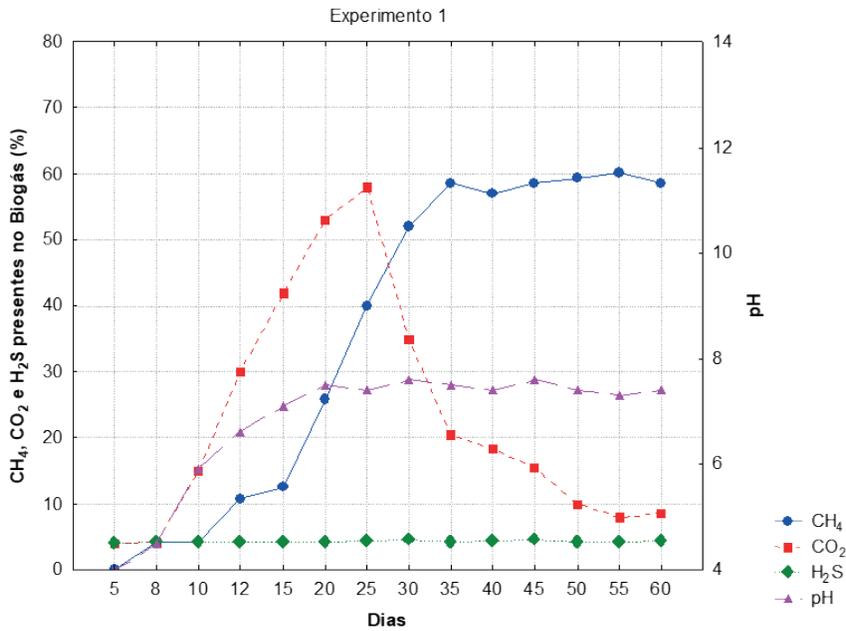


Figure 8 – O perfil da produção de biogás obtidos durante os 60 dias de experimentos. Experimento 1: O bioprocesso operando em batelada e Experimento 2: O bioprocesso operando em sistema semi-contínuo.

Fonte: Autoria própria (2023).

4 | DISCUSSÃO

Durante os experimentos realizados com o biodigestor desenvolvido, alguns ajustes foram necessários, entre eles, o teste de comunicação do CLP que demonstrou o envio e o recebimento de informações funcionando e dentro do tempo programado de um segundo. Por outro lado, os experimentos de testes das entradas do CLP demonstraram que o módulo de entrada estava funcionando, porém, as leituras estavam oscilando, principalmente do sensor de pH. Em geral, essas variações ocorrem devido a ruídos eletrônicos do sistema e por isso foram instalados, previamente, filtros eletrônicos em cada uma das entradas. A solução encontrada para esse problema foi a implementação de um filtro digital de média móvel, para um conjunto de cinco amostras, ao software embarcado. Esse tipo de filtro é obtido calculando-se a média de um conjunto de valores, sempre adicionando um novo valor ao conjunto e se descartando o mais antigo, a cada leitura. Após a aplicação desse filtro os sensores apresentaram, em 25 leituras, uma variação de $\pm 0,9\%$; o de temperatura e o de pH $\pm 1,05\%$. Com isso, pode-se afirmar que o módulo de entrada analógica do CLP e os sensores funcionaram bem e apresentaram um sinal de leitura estável. O software desenvolvido realizou a supervisão e controle de processos em tempo real, inclusive a aquisição de dados. Na janela desenvolvida o usuário pode determinar todos os parâmetros de controle e monitoramento e automação do biodigestor antes e durante o experimento e proporcionar ao operador a interação e a visualização do equipamento. Em relação aos biodigestores, foi observado que, durante os 60 dias de experimento, os materiais utilizados na construção dos biorreatores apresentaram bons resultados e mostraram-se adequados para o processo de digestão anaeróbia. O sistema de vedação foi eficiente e manteve o meio hermeticamente fechado; comprovado pela ausência de odores no local e com baixa concentração de H_2S , eficiência do processo de remoção de matéria orgânica e produção de biogás. Durante todo o experimento teste, o sistema de aquecimento e controle da temperatura mostraram-se eficientes, tendo em vista que não apresentaram falhas, o volume de fluido térmico mostrou-se adequado para o aquecimento do meio em fermentação e a resistência foi capaz de atingir e manter a temperatura no valor estabelecido pelo sistema de controle. A temperatura se manteve na maior parte dos experimentos em $37\pm 0,3^\circ C$. Além disso, os sistemas de automação da agitação funcionaram conforme o esperado e não apresentaram falhas no experimento teste. O motor e a haste de agitação foram capazes de manter a mistura e homogeneização do meio.

5 | CONCLUSÕES

Foi possível avaliar a influência da co-digestão do resíduo alimentar e esgoto bruto sem tratamento na produção do biogás para processos diferentes de digestão anaeróbia. Sendo o processo semi-contínuo mais eficiente na remoção de matéria orgânica e produção de biogás. A maior eficiência do processo semi-contínuo, em comparação ao

processo em batelada, pode ser atribuída à adição das misturas resíduo, esgoto bruto e lodo durante todo experimento, pois pode ter aumentado a quantidade de matéria orgânica e microorganismos no meio facilitando a biodegradação, e conseqüentemente maior produção do biogás. A menor eficiência do experimento, em sistema de batelada, pode estar associado, a composição de substâncias presentes no esgoto bruto de baixa biodegradabilidade. Os principais resultados obtidos nesse trabalho permitiram avaliar que o biodigestor desenvolvido, além da flexibilidade de operação é de fácil manutenção e limpeza. O sistema de agitação desenvolvido para o biodigestor proporcionou a mistura do meio conforme a sua concepção e o sistema de aquecimento foi eficaz no processo de biodigestão mesofílica. O sistema de controle, monitoramento e automação desenvolvido para o processo de biodigestão anaeróbia mostrou-se eficaz e apresentou as principais funcionalidades e arquitetura dos CLP comerciais. Além do software supervisor ter sido eficiente em todos os quesitos definidos na sua concepção: exibição dos dados de monitoramento e parâmetros de processo, armazenamento dos dados monitorados, de configuração do sistema e de experimentos; apresentação dos dados históricos de monitoramento em diferentes formatos; sistema de alarme visual e por e-mail dos parâmetros críticos ao processo e monitoramento e controle do equipamento remotamente.

Em relação ao biodigestor desenvolvido, o mesmo pode ser utilizado para bioprocessos semi-contínuo e em batelada, permitindo a flexibilidade de operação para diversos tipos de substratos. Por fim, com estes e outros resultados encontrados foi concluído que o biodigestor desenvolvido com o sistema de automação e controle foi satisfatório para a redução da matéria orgânica e produção de biogás. Além de todos os parâmetros operacionais funcionando corretamente e com a utilização de tecnologias atuais e de baixo custo, tornando viável a aplicação e desenvolvimento em maior escala no futuro.

REFERÊNCIAS

VENKATESH, G.; ELMIR, R. A. Economic-environmental analysis of handling biogas from sewage sludge digesters in WWTPs (wastewater treatment plants) for energy recovery: Case study of Bekkelaget WWTP in Oslo (Norway). **Energy**, 58, 220-235, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.025>. Acesso em: jul. 2022.

BEDOIC´ *et al.* Geospatial Analysis and Environmental Impact Assessment of a Holistic and Interdisciplinary Approach to the Biogas Sector. **Energies**, 14, 5374, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14175374>. Acesso em: set. 2022.

ERIKSSON *et al.* Municipal solid waste management from a systems perspective. **J. Clean. Prod.**, 13, 241-252, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.018>. Acesso em: out. 2022.

BOLZONELLA *et al.* Dry anaerobic digestion of differently sorted organic municipal solid waste: a full-scale experience. **Water Sci. Technol.**, 53(8), 23-32, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2006.232>. Acesso em: out. 2022.

LI *et al.* Effects of Organic Composition on Mesophilic Anaerobic Digestion of Food Waste. **Bioresour. Technol.**, 244, 213–224, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.006>. Acesso em: set. 2022.

AUDU *et al.* Exploring Biogas and Biofertilizer Production from Abattoir Wastes in Nigeria Using a Multi-Criteria Assessment Approach. **Recycling**, 2020, 5(3), 1-24. < <https://doi.org/10.3390/recycling5030018>>. Acesso em: dez. 2022.

HAGOS *et al.* Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. **Renew. Sust. Energ. Rev.**, 76, 1485-1496, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>. Acesso em: dez. 2022.

LI, Y.; PARK, S. Y.; ZHU, J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. **Renew Sustain Energy Rev.**, 15, 821-826, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>. Acesso em: dez. 2022.

CHERNICHARO, C.A.L. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Reatores Anaeróbios*; Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, Brazil, 1997.

BUDZIANOWSKI, W. M.; BUDZIANOWSKA, D. A. Economic analysis of biomethane and bioelectricity generation from biogas using different support schemes and plant configurations. **Energy**, 88, 658-666, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.104>. Acesso em: dez. 2022.

ORGANIZAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU) - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/conheca-os-novos-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-da-onu/amp/>. Acesso em: fev. 2022.

PATTERSON *et al.* Esteves, S.; Dinsdale, R.; Guwy, A. Life cycle assessment of biogas infrastructure options on a regional scale. **Bioresour Technol.**, 102, 7313-7323 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.063>. Acesso em: dez. 2022.

GUIMARÃES, C.S.; MAIA, D.R.S.; Serra, E.G. Control and Monitoring Software Website. GitHub. 2018. Disponível em: <https://github.com/DavidRSMaia/Software-de-ControlDispone-e-Monitoramento>. Acesso em: fev. 2018.

CHAMBERS, P. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. United Kingdom: Tech Press, 2019.

BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL STANDARDS. *NBR 10007. Sampling of Solid Waste, 2nd ed.* Brazilian Association of Technical Standards: Rio de Janeiro, Brazil, 2004. Disponível em: <https://www.normas.com.br/autorizar/visualizacao-nbr/6014/identificar/visitante>. Acesso em: fev. 2021.

SRISOWMEYA, G., CHAKRAVARTHY, M., NANDHINI D. G. Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review. **Renew. Sust. Energ. Rev.**, 119, 587-594, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109587>. Acesso em: dez. 2022.