



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Arthur Moro Schorr

Automação de um laboratório para ensaios de produção de biogás

BLUMENAU

2025

Arthur Moro Schorr

Automação de um laboratório para ensaios de produção de biogás

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Ciro André Pitz

BLUMENAU

2025

Schorr, Arthur Moro

Automação de um laboratório para ensaios de produção de biogás / Arthur Moro Schorr ; orientador, Ciro André Pitz, 2025.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,
2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Automação de processos. 3. Laboratório. 4. Biogás. 5. Digestão anaeróbia. I. Pitz, Ciro André. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Arthur Moro Schorr

Automação de um laboratório para ensaios de produção de biogás

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, 12 de dezembro de 2025.

Banca examinadora

Prof.(a) Ciro André Pitz, Dr.(a)
Orientador(a)

Prof.(a) Janaina Gonçalves Guimarães, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Guilherme Brasil Pintarelli, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 2025.

Dedico este trabalho a minha esposa,
meus pais, meu irmão e meus sogros, por
sempre me apoiarem e estarem dispostos
a ajudar, durante toda a graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente à minha família, em especial à minha esposa Paola Sabrine Kriek Schorr, por estar ao meu lado em todos os momentos desafiadores, oferecendo apoio, compreensão e motivação contínua. Estendo minha gratidão aos meus pais, Cristiane Moro Schorr e Ricardo Schorr, que sempre foram minha base, apoiando cada etapa da minha trajetória com dedicação e esforço incansável. Ao meu irmão Henrique Schorr, agradeço pela parceria e pelo apoio constante. Também agradeço aos pais da minha esposa estão sempre ao nosso lado, nos apoiando e ajudando.

Registro também meu agradecimento a todos os professores que contribuíram para minha formação, em especial ao professor Ciro André Pitz, pela orientação, disponibilidade e confiança durante a última etapa da graduação.

Agradeço ainda à empresa Archea, que me proporcionou oportunidades fundamentais desde o período da pandemia e apoiou diretamente o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo de forma significativa para minha evolução acadêmica e profissional.

“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez.” (EDISON, Thomas)

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento de sistemas automáticos para um laboratório de análise de produção de biogás. Inicialmente, estuda-se a estrutura e o funcionamento do laboratório, identificando possibilidades de melhorias de operação dos ensaios de biogás, automatizando processos e reduzindo a necessidade de manuseio do operador. Com base nesse estudo, desenvolvem-se três sistemas principais: agitação através de motores de passo, alimentação automática utilizando bombas peristálticas e medição da produção de biogás com um eudiômetro eletrônico adaptado. O objetivo é aumentar a eficiência e a semelhança a uma planta real, diminuindo a ação humana. Após o desenvolvimento, os sistemas são testados, validados e aplicados no laboratório em ensaios experimentais, que comparam o método manual, sem automação, com o método automático. Os ensaios utilizam dejetos suíno e duram vinte e cinco dias. Ao final, analisam-se os resultados quanto à degradação orgânica, produção e qualidade do biogás, e à operabilidade dos ensaios. A degradação orgânica mostrou-se mais eficiente no sistema automatizado, que ao final do experimento apresentou 48% de sólidos voláteis e 0,7% de sólidos totais, enquanto o método manual resultou em 57% de sólidos voláteis e 1,3% de sólidos totais. A produção de biogás também foi superior no ensaio automatizado, alcançando aproximadamente 24 L com 56,38% de metano, em contraste com os 19 L e 52,03% de metano obtidos no ensaio manual. Além disso, identificou-se maior concentração de oxigênio no ensaio manual, indicando prováveis interferências associadas ao manuseio e às limitações operacionais do processo não automatizado.

Palavras-chave: biogás; digestão anaeróbia; automação de processos; laboratório.

ABSTRACT

This undergraduate project presents the development of automated systems for a biogas production analysis laboratory. Initially, the structure and operation of the laboratory are studied, identifying possibilities for improving the operation of biogas assays by automating processes and reducing the need for operator handling. Based on this study, three main systems are developed: agitation using stepper motors, automatic feeding using peristaltic pumps, and measurement of biogas production with an adapted electronic eudiometer. The objective is to increase efficiency and similarity to a real plant, reducing human intervention. After development, the systems are tested, validated, and applied in the laboratory in experimental assays that compare the manual, non-automated method with the automated method. The assays use swine manure and last twenty-five days. At the end, the results are analyzed in terms of organic degradation, biogas production and quality, and the operability of the assays. Organic degradation proved to be more efficient in the automated system, which at the end of the experiment presented 48% volatile solids and 0.7% total solids, while the manual method resulted in 57% volatile solids and 1.3% total solids. Biogas production was also higher in the automated assay, reaching approximately 24 L with 56.38% methane, in contrast to the 19 L and 52.03% methane obtained in the manual assay. Additionally, a higher oxygen concentration was identified in the manual assay, indicating likely interferences associated with handling and operational limitations of the non-automated process.

Keywords: biogas; anaerobic digestion; process automation; laboratory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da digestão anaeróbia	19
Figura 2 – Reator do tipo BLC	22
Figura 3 – Reator do tipo CSTR.....	23
Figura 4 – Forno e Mufla	26
Figura 5 – Recipiente de ensaio existente	32
Figura 6 – Balão reservatório de biogás	33
Figura 7 – Bacia de aquecimento	34
Figura 8 – Projeto do novo recipiente de ensaio	37
Figura 9 – Minibomba peristáltica	38
Figura 10 – Diagrama do processo de medição da produção de biogás	39
Figura 11 – Diagrama de blocos da arquitetura de controle.....	42
Figura 12 – Painel de comando do sistema automático.....	43
Figura 13 – Porta do painel com os botões e potenciômetros instalados	44
Figura 14 – Recipiente de ensaio automático.....	46
Figura 15 – Substrato preparado para os ensaios	49
Figura 16 – Gráfico de produção de biogás do ensaio manual.....	53
Figura 17 – Gráfico de produção de biogás do ensaio automático	54
Figura 18 – Gráfico comparativo da produção de biogás entre os ensaios	55
Figura 19 – Análise de biogás do ensaio automático	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial de produção de biogás de diferentes substratos.....	30
Tabela 2 – Configurações do motor de passo de agitação	47
Tabela 3 – Medições dos testes das bombas.....	48
Tabela 4 – Comparativo da qualidade de biogás	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOGÁS – Associação Brasileira de Biogás
BLC – Biodigestor de Lagoa Coberta
CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás
CO₂ – Dióxido de Carbono
CH₄ – Metano
CSTR – Continuous Stirred-Tank Reactor (Reator Contínuo de Tanque Agitado)
CSV – Concentração de Sólidos Voláteis
EUDIÔMETRO – Equipamento para medição volumétrica de gases
GC – Gas Chromatography (Cromatografia Gasosa)
H₂S – Sulfeto de Hidrogênio
H₂ – Hidrogênio
LCD – Liquid Crystal Display
mL – Mililitro
m³– Metro cúbico
NDIR – Non-Dispersive Infrared (Sensor Infravermelho Não Dispersivo)
O₂ – Oxigênio
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
PH – Potencial Hidrogeniônico
PU – Poliuretano
RTC – Real Time Clock
SD – Secure Digital (cartão de memória)
ST – Sólidos Totais
SV – Sólidos Voláteis
TRH – Tempo de Retenção Hidráulica
VD – Vazão Diária / Volume Diário (conforme utilizado no cálculo)
VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Associação de Engenheiros Alemães)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	18
2.2	BIODIGESTORES.....	20
2.3	LABORATÓRIOS DE ENSAIO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	24
2.4	GRANDEZAS RELEVANTES NO PROCESSO.....	25
2.5	MÉTODOS DE MEDIÇÃO.....	28
2.6	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1	ESTRUTURA DO LABORATÓRIO E SISTEMA EXISTENTE.....	31
3.2	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA AUTOMATIZADO.....	34
3.2.1	Sistema de agitação.....	35
3.2.2	Sistema de alimentação automática.....	37
3.2.3	Sistema de medição de produção de biogás.....	38
3.2.4	Supervisão e aquisição de dados.....	40
3.3	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE EFICIÊNCIA E DESEMPENHO.....	44
3.4	MATERIAIS UTILIZADOS.....	45
4	RESULTADOS.....	46
4.1	TESTES DOS EQUIPAMENTOS E SISTEMAS.....	46
4.2	PREPARAÇÃO DOS RECIPIENTES DE ENSAIO E DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS.....	48
4.3	ACOMPANHAMENTO DOS ENSAIOS.....	51
4.4	ANÁLISE FINAL.....	52
4.5	DISCUSSÃO.....	57
4.6	MELHORIAS FUTURAS.....	59
5	CONCLUSÃO.....	60
	REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia renováveis e sustentáveis tem impulsionado o interesse por tecnologias que utilizem resíduos orgânicos como insumos para a geração de energia. Nesse contexto, o biogás se destaca como uma alternativa promissora, por ser proveniente da digestão anaeróbia de substratos orgânicos, permitindo não apenas a produção de energia limpa, mas também a valorização de resíduos agroindustriais e urbanos (CIBIOGAS, 2021). Além de reduzir impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses resíduos, o biogás contribui significativamente para a diversificação da matriz energética e para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, aspectos essenciais na transição para uma economia de baixo carbono (Alengebawy et al., 2024).

No Brasil, o mercado de biogás e biometano tem apresentado crescimento expressivo nos últimos anos, impulsionado por políticas públicas voltadas à transição energética, incentivos à energia renovável e avanços tecnológicos no setor. Segundo o CIBiogás (2024), o país contava com 1.633 plantas de biogás cadastradas, sendo 1.587 em operação, com capacidade instalada de aproximadamente 4,7 bilhões de Nm³/ano — um aumento de cerca de 16 % em relação ao ano anterior. De acordo com a BNews (2024), 79 dessas unidades já possuíam tecnologia de purificação para produção de biometano, com capacidade de cerca de 667 milhões de Nm³/ano. Além disso, conforme a Notícias Agrícolas (2024), a produção nacional de biometano poderá mais que triplicar até 2027, alcançando cerca de 2,3 milhões de m³/dia, caso os projetos em andamento se concretizem.

Esses dados evidenciam que o Brasil avança não apenas em número de instalações, mas também em qualidade e sofisticação tecnológica. O biometano, por apresentar propriedades semelhantes às do gás natural, tem se consolidado como um combustível renovável estratégico para o setor energético, industrial e de transportes, ampliando a competitividade do país frente a outros produtores de energia limpa.

Nesse cenário de expansão, a pesquisa científica e o desenvolvimento tecnológico desempenham papel fundamental, especialmente em ambientes laboratoriais voltados à análise e otimização do processo de digestão anaeróbia. Laboratórios de pesquisa e desenvolvimento são responsáveis por conduzir ensaios controlados que permitem avaliar a eficiência de diferentes substratos, condições

operacionais e estratégias de controle, fornecendo dados essenciais para o aprimoramento de sistemas em escala industrial (BUDZIANOWSKI, 2016).

Entretanto, em diversos laboratórios brasileiros, as etapas experimentais ainda são conduzidas manualmente, o que impõe limitações significativas quanto ao controle das variáveis operacionais, à precisão das medições e à reprodutibilidade dos resultados. Processos como a agitação do meio reacional, a alimentação de substratos e a medição do volume de biogás produzido frequentemente dependem da atuação contínua de operadores, o que pode gerar inconsistências e aumentar a margem de erro dos ensaios. Além dessas limitações, a necessidade de automação torna-se ainda mais evidente quando se considera a realidade da empresa Archea, onde este trabalho foi desenvolvido. A empresa possui um laboratório próprio destinado à realização de ensaios de biogás, utilizado tanto para pesquisa interna quanto para suporte ao dimensionamento de biodigestores comerciais. Apesar disso, grande parte dos procedimentos laboratoriais ainda era executada manualmente, o que dificultava a padronização dos testes e a comparação entre ensaios sucessivos. Essa lacuna operacional contrastava com as recomendações de protocolos internacionalmente reconhecidos, como a norma VDI 4630 (2016), que enfatiza controles rigorosos de mistura, alimentação e medição para garantir a reprodutibilidade dos resultados. Assim, a automação surge como solução necessária para aproximar o laboratório das boas práticas internacionais, aumentar a confiabilidade das análises e permitir que os testes representem com maior fidelidade o comportamento de biodigestores reais, atendendo tanto às demandas científicas quanto às necessidades práticas da empresa.

A automação desses processos surge como uma alternativa para elevar o nível de precisão e confiabilidade das análises. A integração de sensores, atuadores e controladores microprocessados, como o Arduino, permite a coleta de dados, o controle em tempo real das variáveis de processo e a minimização da intervenção humana. Além de otimizar o desempenho experimental, a automação possibilita reproduzir de forma mais fiel as condições operacionais de plantas de biogás em escala real, aproximando o ambiente laboratorial das aplicações industriais.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e implementar um sistema de automação para um laboratório de análises de produção de biogás, com ênfase na melhoria do controle experimental e na comparação do desempenho em relação ao modelo manual atualmente empregado. A proposta

contempla o desenvolvimento de um sistema de agitação automatizado e a medição da produção de biogás por meio de um sistema similar a um eudiômetro eletrônico, analisando o impacto da automação sobre a precisão e a eficiência do processo experimental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e implementar um sistema de automação para um laboratório de análises de produção de biogás, com o intuito de aprimorar o controle dos processos experimentais, aumentar a exatidão das medições e avaliar os ganhos de desempenho obtidos em comparação ao modelo atualmente operado de forma manual.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são listados a seguir:

- Analisar o funcionamento atual do laboratório da empresa Archea Biogás América Latina, localizada em Pomerode/SC, identificando suas limitações operacionais e os principais pontos críticos dos processos manuais;
- Projetar e implementar um sistema de agitação automatizada com ajuste de velocidade e temporizado, utilizando motores de passo para garantir melhor homogeneidade das reações e estabilidade das condições experimentais;
- Desenvolver um sistema de alimentação automática de substrato de forma temporizada, que possibilita a simulação de plantas reais de produção de biogás em escala laboratorial;
- Projetar e integrar um sistema de medição da produção de biogás, permitindo a quantificação em tempo real do volume gerado, bem como o registro automatizado dos dados experimentais;
- Comparar o desempenho do sistema automatizado com o modelo manual, considerando parâmetros como volume de biogás produzido, reprodutibilidade dos ensaios e eficiência operacional;

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos principais, além desta introdução:

- Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: apresenta os conceitos fundamentais relacionados à produção de biogás, processos de digestão anaeróbia, tipos de biodigestores, tecnologias aplicadas em laboratórios e fundamentos de automação aplicados a processos experimentais.
- Capítulo 3 – Materiais, Métodos e Sistema Proposto: descreve os materiais, métodos e procedimentos adotados para o desenvolvimento e implementação do sistema de automação, bem como os critérios de avaliação utilizados.
- Capítulo 4 – Resultados e Discussão: apresenta os resultados obtidos com a implementação do sistema automatizado e realiza a comparação com o modelo manual, discutindo os impactos em termos de eficiência, confiabilidade e reprodutibilidade.
- Capítulo 5 – Conclusão: sintetiza as principais contribuições do trabalho, destacando os avanços alcançados e sugerindo possíveis melhorias e desdobramentos para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

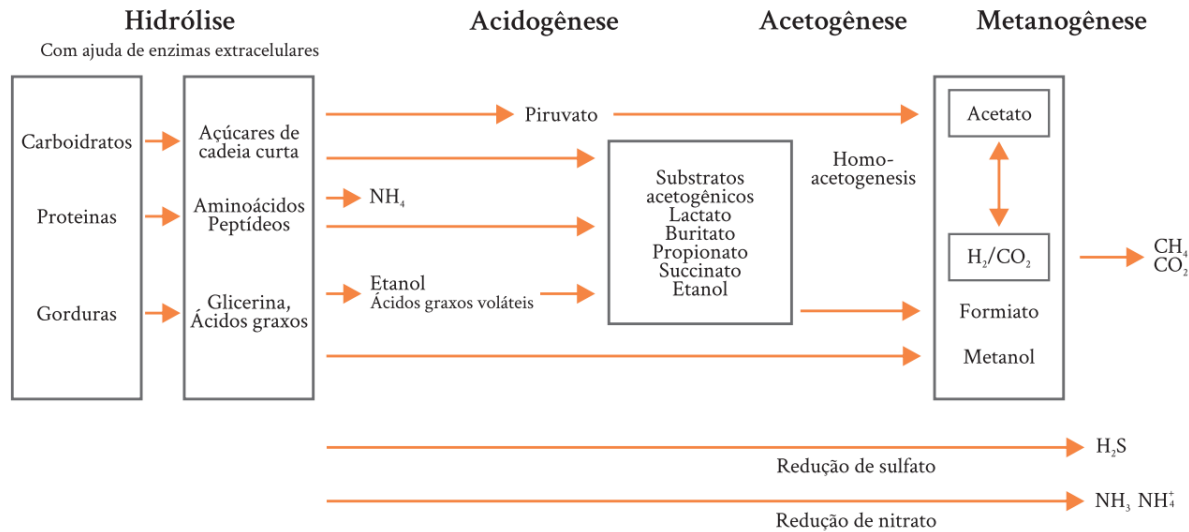
2.1 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O biogás é um combustível renovável obtido a partir da decomposição de matéria orgânica pela ação de microrganismos em ambiente anaeróbio. Esse processo é conhecido como digestão anaeróbia e ocorre na ausência de oxigênio, resultando principalmente na formação de uma mistura de gases composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de pequenas porções de outros gases, como sulfeto de hidrogênio (H_2S), nitrogênio (N_2) e vapor de água (CHERNICHARO, 2007).

A importância do biogás está na sua versatilidade: ele pode ser utilizado diretamente para a geração de energia térmica e elétrica, bem como purificado para obtenção de biometano, um combustível equivalente ao gás natural (KAPDI et al., 2005). Além disso, o processo de digestão anaeróbia contribui para a gestão sustentável de resíduos, reduzindo impactos ambientais e oferecendo uma alternativa viável para o aproveitamento energético em áreas rurais, urbanas e industriais (ANGELIDAKI et al., 2018).

O processo de produção de biogás é dividido em quatro etapas conforme demonstra a Figura 1: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada etapa envolve grupos específicos de microrganismos que quebram moléculas grandes em moléculas menores do material orgânico, até a formação do metano.

Figura 1 – Etapas da digestão anaeróbia



Fonte: (KUNZ; STEIMETZ; AMARAL 2022).

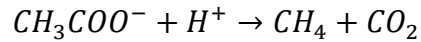
A hidrólise é a etapa inicial e consiste na degradação física e enzimática de polímeros complexos (carboidratos complexos — celulose, hemicelulose, amidos; proteínas; lipídios) em monômeros solúveis (açúcares simples, aminoácidos, ácidos graxos e glicerol). Essa etapa é geralmente realizada por microrganismos hidrolíticos e por enzimas extracelulares (amilases, celulasas, proteases, lipases) que fragmentam as macromoléculas. Nesta etapa, a agitação e a temperatura são primordiais para esta etapa uma vez que é o início da biodigestão do substrato e o início da atividade biológica (CHERNICHARO, 2007).

Após a hidrólise, os monômeros são consumidos por bactérias fermentativas (acidogênicas) que convertem esses compostos em produtos intermediários: ácidos orgânicos de cadeia curta (ácido acético, propiônico, butírico), álcool (etanol), aldeídos, dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio molecular (H_2), amônia (da degradação proteica) e outros metabólitos. A acidogênese é essencial para transformar os monômeros solúveis em formas que as etapas seguintes podem converter em acetato, H_2 e CO_2 . (ANGELIDAKI et al., 2018; CHERNICHARO, 2007).

A acetogênese engloba um conjunto de reações pelas quais compostos fermentativos mais complexos (ex.: propionato, butirato, álcoois de cadeia maior) são convertidos em acetato, H_2 e CO_2 por bactérias acetogênicas, muitas vezes em associação sintrófica com microrganismos consumidores de hidrogênio (WIELAND, 2010; ANGELIDAKI et al., 2018).

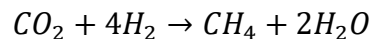
A etapa final é a metanogênese, responsável pela produção de metano, e é conduzida exclusivamente por arqueias metanogênicas (metanógenos). Existem três vias bioquímicas principais:

- Via acetoclástica: conversão direta de acetato em metano e dióxido de carbono:



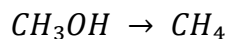
É a rota dominante em muitos digestores de matéria orgânica com alta produção de acetato (principal via em muitos sistemas mesofílicos).

- Via hidrogenotrófica: redução de CO_2 por H_2 para formar metano:



Essa via é importante quando há produção significativa de H_2 pela acidogênese/acetogênese.

- Via metilotrófica (ou metilotrófica): uso de compostos metilados (metanol, metilaminas) como substrato para metanogênese, relevante em alguns resíduos específicos (ANGELIDAKI et al., 2018; CHERNICHARO, 2007).



A etapa metanogênese é onde a maior parte do metano é produzido. Nesta etapa a estabilidade do pH é essencial pois as arqueias metanogênicas são sensíveis à pH fora da faixa de 6,5 a 7,5 (KUNZ; STEIMETZ; AMARAL 2022).

2.2 BIODIGESTORES

Os biodigestores podem ser sistemas simples ou complexos, que através de um conjunto de equipamentos instalados em um ou mais reservatórios, produzem o biogás através de diversos tipos de substratos. De maneira geral, o substrato é introduzido no reator, onde ocorrem as quatro etapas fundamentais do processo: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, descritas acima. Essas etapas geralmente ocorrem no mesmo reservatório em sistemas mais simples e em que o tipo de substrato possui uma composição mais branda de moléculas, sem uma necessidade de degradação orgânica agressiva, geralmente vista na hidrólise (KUNZ; STEIMETZ; AMARAL 2022). Nas plantas desenvolvidas pela empresa Archea, é comum o sistema possuir mais de um tanque, separando a etapa de hidrólise do restante das etapas.

Os biodigestores podem ser classificados segundo três critérios principais: o regime de operação, o tipo construtivo tradicional e as tecnologias ou configurações modernas. Essa distinção é importante para evitar a sobreposição entre categorias que pertencem a níveis diferentes de classificação.

Quanto ao regime de operação, os biodigestores podem ser de batelada ou de fluxo contínuo. Nos sistemas de batelada, o material orgânico é inserido de uma única vez e permanece em digestão até o fim do ciclo, sem novas alimentações. São estruturas simples e de baixo custo, porém apresentam produção descontínua de biogás. Já os biodigestores de fluxo contínuo permitem a alimentação e a retirada simultânea de substrato, promovendo estabilidade operacional e geração contínua de biogás, sendo amplamente empregados em escalas piloto e industriais (KUNZ; STEIMETZ; AMARAL, 2022).

Há também os tipos construtivos tradicionais, que correspondem ao formato físico e à tecnologia de construção do reator. O modelo chinês possui estrutura de alvenaria e tampa fixa, garantindo longa durabilidade e baixa necessidade de manutenção. O modelo indiano utiliza uma campânula móvel que se eleva conforme o biogás é produzido, funcionando simultaneamente como armazenamento pressurizado. O modelo tubular (ou tipo canadense) consiste em um tubo flexível de PVC ou polietileno, sendo amplamente adotado em pequenas propriedades devido ao baixo custo e à montagem simples, embora apresente menor vida útil (CIBIOGÁS, 2023).

No contexto laboratorial e industrial, dois modelos de reatores de fluxo-contínuo são mais comumente usados no Brasil: o BLC (Biodigestor de lagoa coberta) e o CSTR (*Continuous Stirred-Tank Reactor*).

O biodigestor BLC é um tanque retangular, escavado no solo e com as laterais em ângulo, a fim de diminuir o esforço de carga no talude, geralmente feito na terraplanagem a 45°. Tal biodigestor é construído através do assentamento de uma geomembrana de PEAD (polietileno de alta densidade) que possui uma baixa permeabilidade, tanto para líquidos quanto para gases. Esse modelo de reator tipicamente não possui agitação e aquecimento, e geralmente não conta com um controle preciso dos parâmetros importantes para a geração de biogás. A alimentação do tanque geralmente é feita por gravidade tanto para a entrada quanto para a saída do tanque, mas que em alguns casos necessita de um sistema de bombeamento. O BLC é amplamente usado no Brasil, no meio rural, no gerenciamento dos dejetos

animais gerados pois se trata de um modelo com baixo nível tecnológico, fácil no quesito operação e com uma construção de baixo investimento e acessível. Por não possuir um sistema de agitação e aquecimento, existe a presença de sedimentos no fundo do tanque que com o tempo se acumula gerando limpezas periódicas que dependem do tamanho do reator e do teor de sólidos do substrato (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022). A Figura 2 mostra um reator do tipo BLC.

Figura 2 – Reator do tipo BLC



Fonte: O autor (2025)

Já o reator CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*) é geralmente construído através de tanques cilíndricos totalmente de concreto. Esse tipo de reator possui um sistema de agitação, geralmente mecânico ou por recirculação do gás que assegura a homogeneização de nutrientes, temperatura e microrganismos, prevenindo zonas mortas e sedimentação de sólidos. O aquecimento do tanque traz benefícios para os microrganismos presentes no substrato, garantido um ambiente propício para a degradação das moléculas e da produção de biogás (CHERNICHARO, 2007).

Figura 3 – Reator do tipo CSTR



Fonte: O autor (2025)

A principal vantagem do CSTR está no controle preciso das variáveis operacionais como temperatura, pH e tempo de retenção hidráulica e na facilidade de automatização e monitoramento. Entretanto, por operar com biomassa em suspensão, o CSTR requer maior cuidado com a manutenção da atividade microbiana e o controle da carga orgânica, a fim de evitar o colapso da comunidade metanogênica. (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

A empresa Archea é especializada em biodigestores CSTR e na separação da etapa de hidrólise da degradação orgânica. Nela também se desenvolveu uma forma de compatibilizar o CSTR em modelos mais simples através de tanques enterrados com o mesmo nível tecnológico que o usual, tornando o sistema mais acessível para diferentes investidores. A Figura 3 mostra um biodigestor CSTR instalado pela empresa Archea na cidade de Pomerode/SC.

No Brasil, o uso de biodigestores vem crescendo significativamente, impulsionado pelo aumento da demanda por energias renováveis e pelo incentivo à economia circular. De acordo com o Atlas do Biogás e do Biometano (CIBIOGÁS,

2023), o país possui mais de 900 plantas de biogás em operação, concentradas principalmente nas regiões Sul e Sudeste, com destaque para os estados do Paraná e São Paulo. As tecnologias mais empregadas são os biodigestores do tipo CSTR e BLC, devido à sua eficiência e adaptabilidade a diferentes substratos.

O modelo CSTR tem sido amplamente adotado em plantas industriais de médio e grande porte, especialmente em cooperativas agroindustriais e unidades de tratamento de efluentes da suinocultura. Já os modelos BLC são predominantes em pequenas propriedades e projetos de demonstração, dada sua simplicidade e baixo custo (ABILOGÁS, 2024).

A Associação Brasileira de Biogás (ABILOGÁS, 2024) estima que o potencial técnico de produção de biogás no país ultrapasse 80 milhões de metros cúbicos por dia, volume suficiente para substituir aproximadamente 40% do consumo nacional de diesel, reforçando o papel estratégico dessa tecnologia na transição energética brasileira.

O avanço das pesquisas em reatores laboratoriais, como os sistemas CSTR miniaturizados e os BLC experimentais, têm contribuído para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e replicáveis em escala industrial. Projetos como o desenvolvido neste trabalho buscam aprimorar a automação e o controle dos processos biotecnológicos de digestão anaeróbia, alinhando-se às metas de sustentabilidade e inovação tecnológica do setor energético nacional.

2.3 LABORATÓRIOS DE ENSAIO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Os laboratórios de ensaio são essenciais no avanço das pesquisas sobre produção de biogás. Nesses ambientes, é possível reproduzir em escala reduzida as condições de operação de biodigestores industriais, permitindo o estudo de parâmetros que influenciam a eficiência do processo (VDI 4630, 2016).

Os principais objetivos de um laboratório de biogás incluem:

- avaliar o potencial de produção de diferentes substratos;
- investigar condições operacionais ótimas (temperatura, pH, agitação, carga orgânica aplicada, entre outros);
- comparar estratégias de alimentação e monitoramento;
- Simular cenários que auxiliam na modelagem e otimização de plantas em escala real.

Para garantir resultados confiáveis, é fundamental que os ensaios sejam realizados sob condições bem controladas. Nesse contexto, a automação surge como uma ferramenta relevante, pois permite maior precisão no controle experimental, redução da intervenção manual e maior reprodutibilidade dos testes (VDI 4630, 2016).

2.4 GRANDEZAS RELEVANTES NO PROCESSO

Durante os ensaios laboratoriais de produção de biogás assim como nas plantas reais, algumas grandezas físicas e químicas se destacam pela influência direta na eficiência do processo:

- Temperatura: variável crítica para o metabolismo microbiano. Os principais regimes de operação são mesofílico (cerca de 35–40 °C) e termofílico (50–55 °C) (CHERNICHARO, 2007).
- Tempo de agitação: variável relacionada diretamente na produção de biogás com a homogeneização do substrato (KUNZ; STEIMETZ; AMARAL, 2022).
- pH: deve permanecer em uma faixa adequada (em torno de 6,5 a 7,5) para garantir equilíbrio entre as etapas da digestão (ANGELIDAKI et al., 2018).
- Relação FOS/TAC (Ácidos Graxos Voláteis/Alcalinidade Total): É um parâmetro utilizado para acompanhar a estabilidade e a eficiência de processos de digestão anaeróbica, como aqueles empregados na produção de biogás. Ele indica o equilíbrio entre a formação de ácidos voláteis (FOS) e a capacidade de neutralização da alcalinidade (TAC) em um sistema de fermentação.
- Sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV): são dois indicadores muito importantes para a produção de biogás. Para definir os teores de sólidos é seguido o método 2540 C (APHA, 2012), usando alguns itens de laboratório e seguindo os seguintes passos:
 1. Pesquisar o cadinho e anotar valor na planilha repassada pela Archea;
 2. Adicionar 50g de amostra bem homogeneizada no cadinho e anotar o valor exato na planilha;
 3. Levar à estufa (pré-aquecida) a 100°C por 24h;
 4. Deixar esfriar por 10 minutos, pesar e anotar na planilha. A diferença entre o peso inicial e o final encontra-se o valor dos sólidos totais;
 5. Após pesar o cadinho que saiu da estufa, levá-lo à mufla (pré-aquecida) por 15 minutos à 550°C;

6. Aguardar esfriar por 15 minutos, pesar e anotar na planilha;
7. Realizar os seguintes cálculos:

$$\text{Sólidos totais: } ST = \frac{P2 - P1}{V1} * 100 \quad (1)$$

$$\text{Sólidos fixos: } SF = \frac{P3 - P1}{V1} * 100 \quad (2)$$

$$\text{Sólidos voláteis: } SV = ST - SF \quad (3)$$

Onde:

P1: Peso do cadinho vazio

P2: Peso da amostra após sair da estufa

P3: Peso da amostra após sair da mufla

V1: Peso da amostra = 50g

O laboratório em que é realizado o experimento possui os equipamentos necessários para a análise pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Forno e Mufla



Fonte: O autor (2025)

- Volume de biogás produzido: indicador direto da eficiência do processo, utilizado para comparar substratos e condições operacionais (VDI 4630, 2016). É possível calcular o potencial de produção de diversas formas. Cálculos mais assertivos usam as composições químicas de substrato, usando cálculos complexos de estequiometria. Entretanto existe um cálculo mais simples, através dos sólidos totais e voláteis do substrato (NACKE, 2001; BALAGURUSAMY et al., 2020):

Primeiro calcula-se a quantidade diária de sólidos na entrada do sistema:

$$QST(kg) = VD(kg) * ST \quad (4)$$

Com o esse, se calcula a quantidade de sólidos voláteis por dia:

$$QSV(kg SV) = QST(kg) * SV \quad (5)$$

Utiliza-se um valor tabelado de rendimento típico para o substrato utilizado

$$n (m^3 \text{ biogás} / g SV) \quad (6)$$

Então, é possível chegar no valor de biogás estimado por dia:

$$Biogás_{dia} = QSV * n \quad (7)$$

Com os esses cálculos, é possível calcular a produção estimada de biogás, de acordo com os dias. São valores estimados e aproximados, que podem diferir da realidade, dependendo de outros parâmetros, como pH, temperatura, agitação, homogeneização de substrato, metais pesados (NACKE, 2001);

- Composição do biogás: a fração de metano ($\%CH_4$) é o parâmetro de maior interesse energético (KAPDI et al., 2005).
- Carga orgânica volumétrica (COV): representa a quantidade de substrato alimentado por volume de reator em determinado tempo (KUNZ; STEIMETZ; AMARAL, 2022). Pode ser calculado através de uma simples análise de sólidos voláteis (SV):

$$COV = \frac{Q * SV}{V}$$

ou

$$COV = \frac{SV}{TRH}$$

Onde:

COV: Carga orgânica volumétrica (kgSV/m³ dia)

Q: Vazão diária (m³/dia)

CSV: Concentração de sólidos voláteis (kg/m³)

V: Volume do reator (m³)

TRH: Tempo de retenção hidráulica (dias)

- Tempo de retenção hidráulica (TRH): tempo médio de permanência do substrato no reator, associado à estabilidade do processo (KUNZ; STEIMETZ; AMARAL, 2022).

$$TRH = \frac{Q}{V}$$

Onde:

TRH : Tempo de retenção hidráulica (d)

V : Volume do biodigestor (m³)

Q : Vazão de alimentação (m³/dia)

O controle adequado dessas variáveis está diretamente relacionado à eficiência da degradação orgânica do substrato, resultando em maior quantidade e melhor qualidade do biogás produzido. No laboratório, é possível simular variações nesses parâmetros para compreender de forma mais aprofundada como cada grandeza influencia o processo de produção de biogás.

2.5 MÉTODOS DE MEDIÇÃO

O monitoramento adequado dessas grandezas é fundamental para a interpretação dos resultados e validação dos ensaios. Os principais métodos de medição utilizados em laboratórios de biogás e em biodigestores industriais incluem:

- Medição de volume de biogás: em biodigestores industriais é comum a utilização de sensores de pressão nas cúpulas de biogás para mensurar a quantidade de biogás gerado. Entretanto, com essa forma de medição, é difícil saber exatamente a quantidade de biogás na cúpula. Geralmente, outras formas de medição são adicionadas ao processo, como medidores de vazão na linha de consumo dos sistemas de queima ou de purificação de biogás. Com as duas formas combinadas, tem-se uma boa ideia de como está a digestão do substrato. Em laboratórios, tem-se uma pequena quantidade de biogás gerada, uma vez que a escala é bem reduzida, com isso é comum que essa medição seja complexa. Podem ser utilizados eudiômetros, onde se mede a quantidade de gás através do deslocamento de líquidos através de um tubo graduado

conectado com o gás. Outras formas também podem ser utilizadas como medidores de vazão, rotâmetros, sensores de pressão, balões, entre outros.

- Análise da composição do biogás: realizada através de cromatografia gasosa (GC), sensores eletroquímicos, sensores infravermelhos (NDIR - *non-dispersive infrared*) ou sistemas portáteis de análise (KAPDI et al., 2005).
Nos biodigestores desenvolvidos pela empresa Archea, os analisadores mais utilizados possuem uma combinação de sensores NDIR que analisam a porcentagem ou quantidade dos diferentes gases que compõem o biogás. Os gases que são analisados são CH₄ (metano), CO₂ (gás carbônico), O₂ (oxigênio), H₂S (gás sulfídrico)
- Temperatura: medida por sensores analógicos (termopares, termoresistências) integrados à sistemas digitais de aquisição de dados.
- pH: monitorado com eletrodos específicos e transmissores digitais, podendo ser contínuo ou em amostragens pontuais (KUNZ; STEIMETZ; AMARAL 2022).
- Agitação: geralmente controlada indiretamente, via velocidade de motores de agitação ou torque aplicado, com registro do tempo de operação.
- Alimentação de substrato: monitorada em termos de volume e frequência, podendo ser realizada manualmente ou por meio de sistemas automatizados com bombas dosadoras.

A escolha dos métodos de medição dependerá do nível de exatidão requerido em uma planta. Sensores e medidores mais robustos e com maior acurácia costumam ser mais caros e menos acessíveis. Quando se trata de equipamentos para laboratórios de biogás, as opções são escassas e em alguns casos inexistentes, como o caso da medição de biogás.

2.6 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Diferentes substratos apresentam distintos potenciais de produção de biogás, influenciados por sua composição química e grau de biodegradabilidade. Materiais ricos em matéria orgânica facilmente degradável, como resíduos alimentares e efluentes agroindustriais, tendem a gerar maiores volumes de biogás em menor tempo. Por outro lado, substratos com alta fração lignocelulósica, como resíduos

agrícolas provenientes de colheitas e restos de alimentos de origem vegetal com elevado teor de fibras, possuem degradação mais lenta, resultando em menor eficiência na conversão em metano. Dessa forma, a escolha e caracterização do substrato são etapas essenciais para otimizar a produção e o desempenho do sistema anaeróbio.

Na Tabela 1 são apresentados os principais substratos utilizados comumente em plantas de produção de biogás, incluindo os valores típicos de potencial de produção de biogás baseados em faixas consolidadas na literatura (NACKE, 2001; CHERNICHARO, 2007; MATA-ALVAREZ, 2014; ANGELIDAKI et al., 2018; ENERYPEDIA, 2023).

Tabela 1 – Potencial de produção de biogás de diferentes substratos

Substrato	ST (%)	SV (% dos ST)	SV por m ³ (kg/m ³)	Potencial específico (L biogás/kg SV)	Potencial de produção (m ³ /m ³ de substrato)
Dejeto suíno fresco	4-8	70-80	28-64	500-600	0,30 - 0,38
Dejeto bovino	8-12	70-80	56-96	250-330	0,15 - 0,30
Resíduo alimentar	15-25	85-90	128-225	600-800	0,77 - 1,40
Silagem de milho	28-35	90	252-315	600-750	1,50 - 2,30
Lodo de esgoto	2-5	55-70	11-35	300-400	0,03 - 0,12
Vinhaça	2-4	75-85	15-34	300-350	0,05 - 0,12
Resíduo de abatedouro	12-18	85-90	102-162	700-900	0,71 - 1,45

Fonte: Adaptado (NACKE, 2001; MATA-ALVAREZ, 2014; ENERYPEDIA, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho é estruturada de forma a permitir o desenvolvimento, implementação e avaliação de um sistema de automação aplicado a um laboratório de análises de produção de biogás. O processo compreende três etapas principais:

- Análise do sistema atual e levantamento das limitações operacionais do processo manual;
- Projeto e implementação do sistema automatizado, contemplando agitação, alimentação e medição de biogás;
- Avaliação comparativa entre o sistema automatizado e o modelo manual, considerando parâmetros de desempenho, eficiência e confiabilidade.

O estudo foi conduzido no laboratório de produção de biogás da empresa Archea Biogás América Latina, local onde já se realizam ensaios periódicos de digestão anaeróbia com diferentes substratos.

3.1 ESTRUTURA DO LABORATÓRIO E SISTEMA EXISTENTE

O laboratório conta com reatores de bancada com volume máximo de 3L como mostra a Figura 5, utilizados para a condução de ensaios de produção de biogás em condições controladas. O sistema existente opera de forma predominantemente manual, onde as atividades de agitação, alimentação e medição do volume de biogás são realizadas por operadores em intervalos pré-definidos.

Figura 5 – Recipiente de ensaio existente



Fonte: O autor (2025)

A agitação é realizada agitando o recipiente em que o substrato é armazenado por um determinado tempo, até que se verifique a homogeneidade do material. É comum que depois de certo período os sólidos presentes no substrato decantem, formando um amontoado no fundo do recipiente. Esse fenômeno ocorre também em sistemas reais, em biodigestores, porém, com a agitação de forma correta, diminui-se esse acontecimento. No caso do laboratório, com a agitação manual, o sólido decantado ocorre durante intervalos maiores de agitação, comumente nos finais de semana e nos períodos da noite, quando não possuem operadores no laboratório, impactando de forma significativa a produção de biogás daquele substrato.

A medição do volume de biogás gerado não foi realizada de forma assertiva, tendo-se muita dificuldade devido à vazamentos e aos métodos de medição. A forma com menor perda foi verificada ao incluir uma bolsa de plástico, interligada

diretamente com o recipiente, onde se armazena o biogás gerado. Entretanto, os vazamentos são comuns e por vezes, todo o biogás é perdido. Também se observa o problema do tamanho da bolsa plástica, que muitas vezes é grande, não inflando totalmente, sendo complexo mensurar o volume do gás. Outro ponto crucial da medição de volume é que o biogás é compressível e varia muito seu volume de acordo com temperatura e pressão ambiente. Na Figura 6 pode-se observar como o biogás gerado durante a análise é armazenado.

Figura 6 – Balão reservatório de biogás



Fonte: O autor (2025)

O laboratório já conta com um aquecimento automático, através de um controlador comercial, com uma resistência inserida em uma bacia de aquecimento em aço INOX 304 com água, que não será alterado pois é funcional para o experimento proposto. A Figura 7 mostra como é o sistema de aquecimento. Essa forma de operação, embora funcional, apresenta limitações quanto à eficiência do ensaio, exatidão dos registros, reprodutibilidade dos ensaios e disponibilidade de dados em tempo real. Além disso, a execução manual das tarefas exige maior tempo de manuseio e acompanhamento, reduzindo a eficiência operacional do laboratório.

Figura 7 – Bacia de aquecimento



Fonte: O autor (2025)

Além desse sistema, o laboratório conta com outros equipamentos destinados a diferentes tipos de análise, abrangendo parâmetros essenciais para o monitoramento e controle do processo de digestão anaeróbia. Entre eles, destacam-se os sistemas para determinação da relação FOS/TAC (Ácidos Graxos Voláteis/Alcalinidade Total), a medição do teor de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) e o analisador de composição do biogás, responsável por quantificar a proporção de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e outros gases presentes na mistura.

Dessa forma, é proposto o desenvolvimento de um sistema automatizado que incorpore elementos de controle, instrumentação e aquisição de dados, de modo a aprimorar a operação e a confiabilidade dos resultados obtidos.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA AUTOMATIZADO

O sistema automatizado é dividido em três subsistemas principais: agitação, alimentação automática e medição da produção de biogás. Esses subsistemas são integrados a um sistema de supervisão e controle central, responsável pela aquisição de dados. Para o controle dos equipamentos e das aquisições dos dados é utilizado um Arduino Mega2560.

3.2.1 Sistema de agitação

A agitação dos reatores é automatizada por meio da instalação de motores de passo do modelo NEMA 17, acoplados a eixos verticais equipados com pás internas responsáveis pela homogeneização do substrato, desenvolvidas para este trabalho. A escolha desse tipo de motor se deve à sua elevada exatidão no controle de posição e velocidade, além de fornecer torque suficiente para movimentar o fluido sem sobrecarga mecânica. Essa característica permite ajustar a velocidade de agitação de forma acurada, adequando-a ao teor de sólidos de cada substrato, o que é essencial para garantir uma mistura uniforme e evitar a formação de sólidos no fundo do reator.

O controle dos motores foi realizado por meio de *drivers* de potência A4988, responsáveis pelo acionamento das bobinas dos motores de passo, sob comando de um microcontrolador Arduino. O sistema é programado para permitir não apenas o ajuste da velocidade de rotação, mas também do tempo total de agitação em cada ciclo experimental. Essa flexibilidade é importante, pois em aplicações reais observa-se que o tempo ideal de agitação pode variar diariamente em função do teor de sólidos do substrato ou das condições de operação do ensaio.

Para tornar o sistema ajustável de forma prática, são instalados dois potenciômetros no painel de controle: um destinado à seleção da velocidade de agitação e outro ao tempo de operação. No primeiro caso, o potenciômetro permite selecionar entre 3 faixas de velocidade (definidas no código de controle do Arduino), enquanto no segundo é possível determinar entre 5 intervalos de tempo em que o agitador permanecerá em funcionamento antes de ser desligado automaticamente. Dessa forma, o operador pode adaptar os parâmetros de agitação conforme as necessidades do experimento, sem a necessidade de reprogramar o sistema.

A instalação dos motores de passo exigiu modificações estruturais significativas nos recipientes de ensaio do laboratório. Como ilustrado na Figura 5, o modelo inicial não oferecia espaço adequado para ampliação do número de conexões nem garantia a vedação necessária para o funcionamento seguro do sistema automatizado.

O sistema original contava apenas com duas conexões destinadas à entrada e saída de substrato e à liberação de biogás, não sendo possível acomodar uma terceira via para o eixo de agitação. Além disso, a tampa do recipiente, confeccionada em plástico de baixa rigidez, apresentava baixa resistência mecânica e tendência à

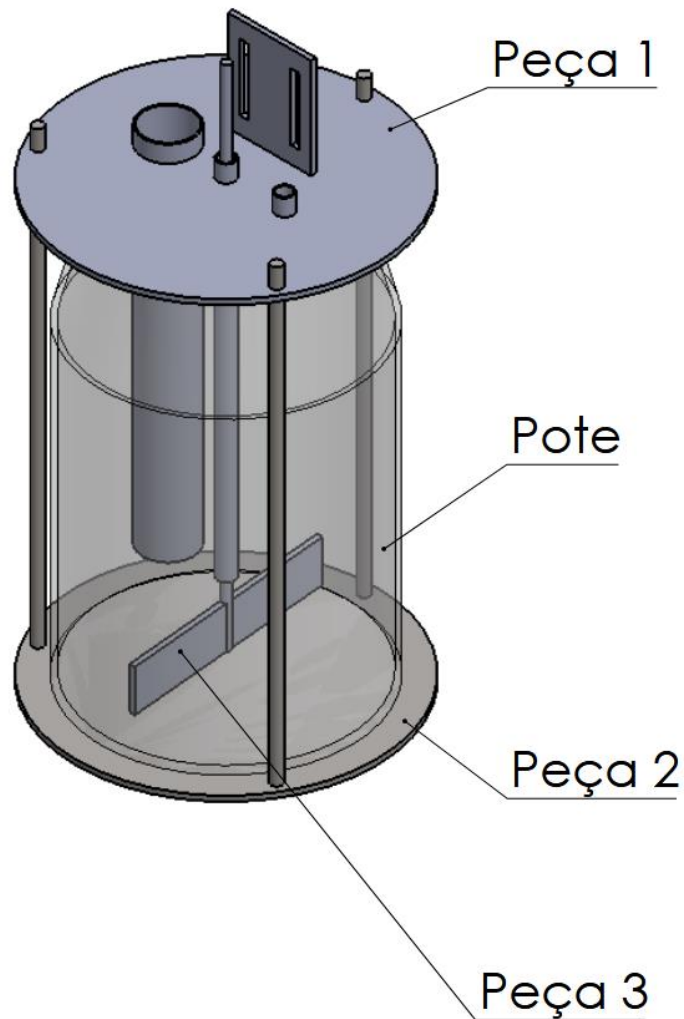
deformação sob vibração, o que poderia resultar em vazamentos ou até mesmo ruptura durante a operação dos motores de passo.

Foi desenvolvido um suporte metálico específico para fixação do motor na parte superior do reator, garantindo estabilidade e alinhamento do eixo vertical. Além disso, foi confeccionada uma abertura central na tampa do recipiente para a passagem da haste de agitação, que também foi projetada especialmente para este sistema, contendo pás internas em formato adequado à geometria do reator e às características do fluido. Para garantir que essa abertura não contenha vazamento de gases, ela foi alongada até a parte inferior do recipiente através de um tubo, garantindo que o nível de líquido forme um selo hidráulico, impedindo o vazamento de gás.

Aproveitando-se dessa modificação estrutural, foi também aprimorada a vedação do sistema, de modo a evitar vazamentos de biogás durante a operação. Para isso, foi projetada uma nova tampa dotada de barras roscadas que atravessam o recipiente e se fixam a uma base inferior, garantindo pressão uniforme sobre o anel de vedação. Essa solução conferiu maior segurança operacional e estabilidade ao conjunto.

A Figura 8 apresenta o modelo tridimensional do sistema de agitação desenvolvido, elaborado em *software* de modelagem 3D, no qual é possível observar o posicionamento do motor, da haste e das modificações estruturais realizadas no recipiente experimental.

Figura 8 – Projeto do novo recipiente de ensaio



Fonte: O autor (2025)

3.2.2 Sistema de alimentação automática

Assim como funciona em um biodigestor de fluxo contínuo, para ter-se uma melhor acurácia nos ensaios, é importante a instalação de um sistema de alimentação automática. Para isso, foi utilizado um conjunto de mangueiras, e uma minibomba peristáltica com vazão nominal de 40mL/min, tanto para a alimentação como para a retirada de substrato. Para a alimentação, é necessário um outro recipiente que contém o substrato bruto, a fim de alimentar com carga orgânica o recipiente com o ensaio.

A bomba peristáltica é ligada em um tempo determinado de segundos por hora, para que atinja o volume diário necessário. No Capítulo 4, tem-se uma descrição

de como o tempo foi calculado de acordo com o tempo de retenção hidráulica. Na Figura 9, tem-se uma bomba similar à usada no experimento.

Figura 9 – Minibomba peristáltica



Fonte: (ROBOCORE)

3.2.3 Sistema de medição de produção de biogás

Para a quantificação do biogás produzido foi desenvolvido um sistema de medição do tipo tubo eudiômetro (BIOGÁS E ENERGIA, 2022), equipado com três eletrodos de nível posicionados ao longo de um tubo transparente parcialmente preenchido com solução salina. Esse tubo é interligado, por meio de uma mangueira, à parte superior do recipiente onde o biogás é armazenado, de modo que a pressão exercida pelo gás desloca a coluna de água no interior do tubo. Para o alívio da pressão, foi instalada uma válvula solenoide de 12V e normal fechada, que permite o alívio da pressão do biogás.

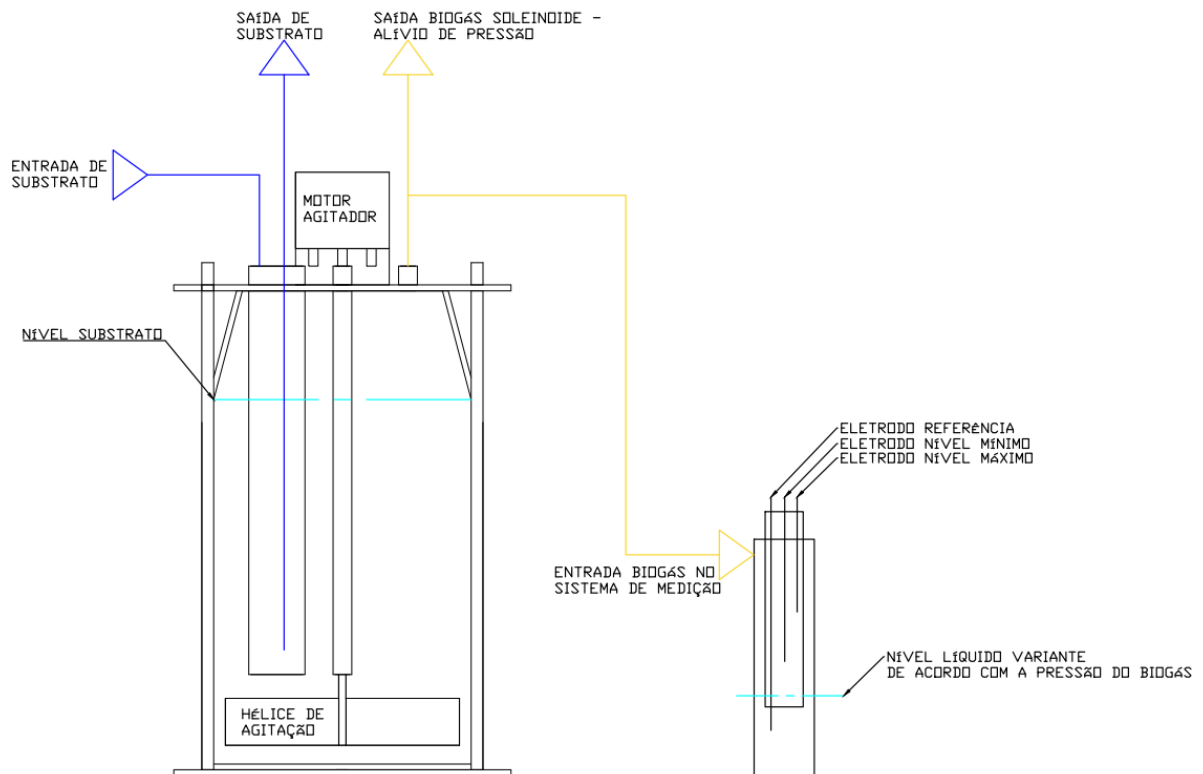
O funcionamento do sistema de medição baseado em tubos eudiômetros fundamenta-se em dois princípios físicos essenciais: a Lei de Stevin, que rege o comportamento dos fluídos em vasos comunicantes, e a Lei de Boyle, que descreve a relação entre pressão e volume em um gás confinado sob temperatura constante. De acordo com a Lei de Stevin, a pressão exercida por um fluido em repouso é

diretamente proporcional à sua densidade, à aceleração da gravidade e à altura da coluna líquida.

A partir desse momento, à medida que o biogás é produzido no reator e transferido para o eudiômetro, ocorre o deslocamento da solução, elevando o nível da coluna de líquido. Assim, o aumento da pressão gerada pelo biogás no interior do reservatório resulta no deslocamento da coluna líquida, permitindo a quantificação indireta do volume de gás produzido ao longo do tempo.

Foi criado um diagrama para melhor entendimento de como funcionará o sistema de medição, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Diagrama do processo de medição da produção de biogás



Fonte: O autor (2025)

Os três eletrodos de nível têm funções distintas no processo de detecção. O primeiro, instalado na base do tubo, atua como referência elétrica do sistema. O segundo, localizado aproximadamente na metade do tubo, representa o nível mínimo de água. Já o terceiro, posicionado próximo à extremidade superior, indica o nível máximo. Conforme o biogás é gerado e transferido para o sistema, o aumento da

pressão faz com que a água seja empurrada para cima, elevando o nível até atingir o eletrodo superior.

Quando o nível máximo é alcançado, o circuito de controle reconhece o evento e registra uma contagem no sistema de aquisição de dados, correspondendo a um volume incremental de biogás produzido. Em seguida, uma válvula automática é acionada para aliviar a pressão interna, permitindo que o nível da água retorne até o eletrodo de nível mínimo. Esse ciclo se repete continuamente durante o ensaio, possibilitando a medição periódica e automatizada da produção de biogás ao longo do tempo.

O volume de biogás gerado em cada ciclo pode ser determinado com base na diferença de altura entre os níveis mínimo e máximo da coluna de água e na área transversal interna do tubo. Assim, o volume deslocado (V_d) é obtido pela relação:

$$V_d = A \cdot (h_{max} - h_{min}),$$

em que A é a área da seção transversal interna do tubo (m^2), h_{max} é a altura correspondente ao nível máximo (m) e h_{min} é a altura correspondente ao nível mínimo (m). O valor resultante, expresso em m^3 , representa o volume de água deslocado e, conseqüentemente, o volume de biogás produzido durante aquele intervalo.

A cada ciclo de enchimento e alívio, o sistema soma automaticamente o volume correspondente, gerando um registro acumulado da produção total de biogás ao longo do experimento. Essa abordagem permite medições sem a necessidade de leituras manuais, além de viabilizar o armazenamento dos dados para análise posterior de desempenho. Nos testes realizados no Capítulo 4, definiu-se a resolução de cada ciclo.

3.2.4 Supervisão e aquisição de dados

O sistema de aquisição e registro de dados é responsável por monitorar automaticamente a produção de biogás e registrar as medições realizadas pelo eudiômetro. O controle é feito por um microcontrolador Arduino, que interpreta os sinais enviados pelos eletrodos de nível e processa as informações. A lógica implementada no sistema permite contabilizar cada ciclo completo de enchimento do tubo, correspondendo a um incremento no volume total de biogás produzido.

O Arduino realiza leituras periódicas dos eletrodos de nível, identificando os momentos em que o líquido atinge o nível máximo e o mínimo. Quando o nível superior é alcançado, o sistema interpreta que um novo volume de biogás foi gerado. Nesse instante, o programa incrementa a variável correspondente ao volume acumulado e ativa a válvula solenoide para aliviar a pressão interna, permitindo o retorno da coluna de água ao nível mínimo. O sinal é lido nas portas digitais do Arduino. Esse processo ocorre de forma automática e repetitiva, garantindo medições no tempo precisas durante todo o experimento.

Os dados de produção são registrados em tempo real em um cartão SD, utilizando um módulo de armazenamento conectado ao Arduino. As informações são salvas em formato .CSV, facilitando a posterior importação para softwares de análise, para geração de gráficos. Cada linha do arquivo contém o volume acumulado de biogás, o estado atual dos sensores e a marca temporal da medição.

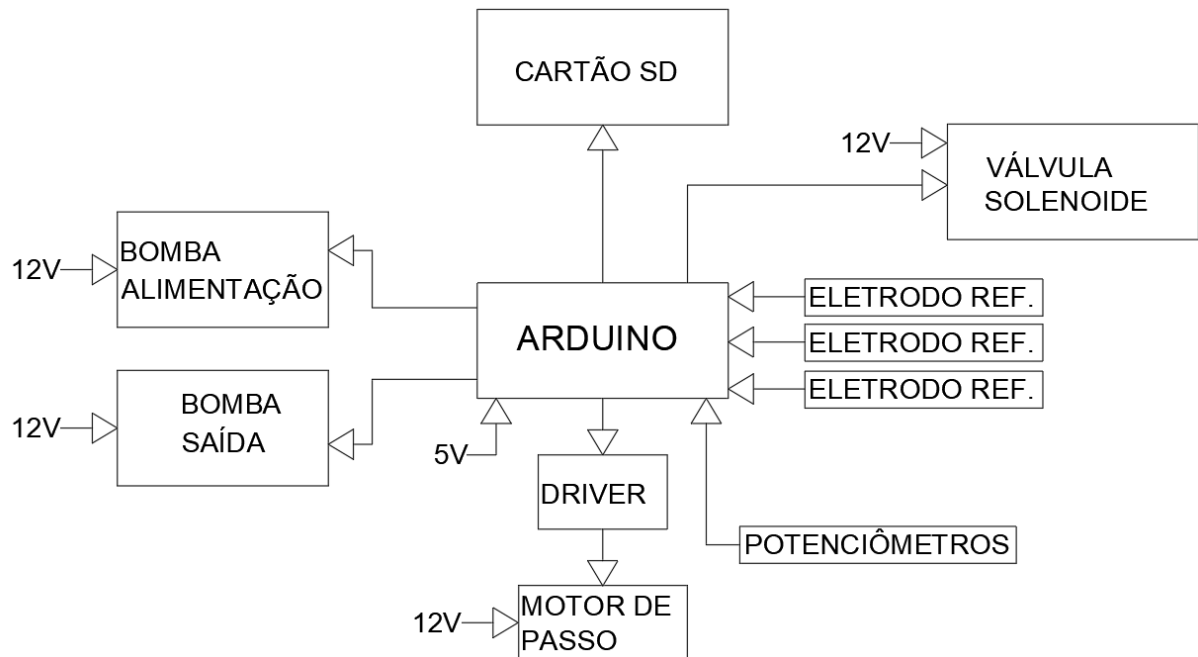
Para garantir uma acurácia temporal adequada, o sistema conta com um módulo RTC (*Real Time Clock*) DS3231, que fornece data e hora com alta estabilidade. Assim, cada evento registrado é associado a um carimbo temporal, permitindo acompanhar o comportamento do sistema ao longo do tempo e analisar a taxa de produção diária.

Em paralelo com a aquisição de dados, o microcontrolador controla os motores de agitação e a bomba de alimentação de forma intermitente, de acordo com o programado. Durante a análise é possível alterar a velocidade e o tempo de agitação. O algoritmo implementado segue a sequência a seguir:

1. Leitura do estado dos eletrodos de nível;
2. Detecção da condição de enchimento (nível máximo atingido);
3. Incremento do volume total de biogás;
4. Registro automático da leitura no cartão SD com data e hora;
5. Abertura da válvula solenoide e retorno ao nível mínimo para reinício do ciclo;
6. Controle contínuo dos agitadores e bomba.

A Figura 11 demonstra através de um diagrama de blocos como é a arquitetura da instalação do sistema de controle com o Arduino.

Figura 11 – Diagrama de blocos da arquitetura de controle

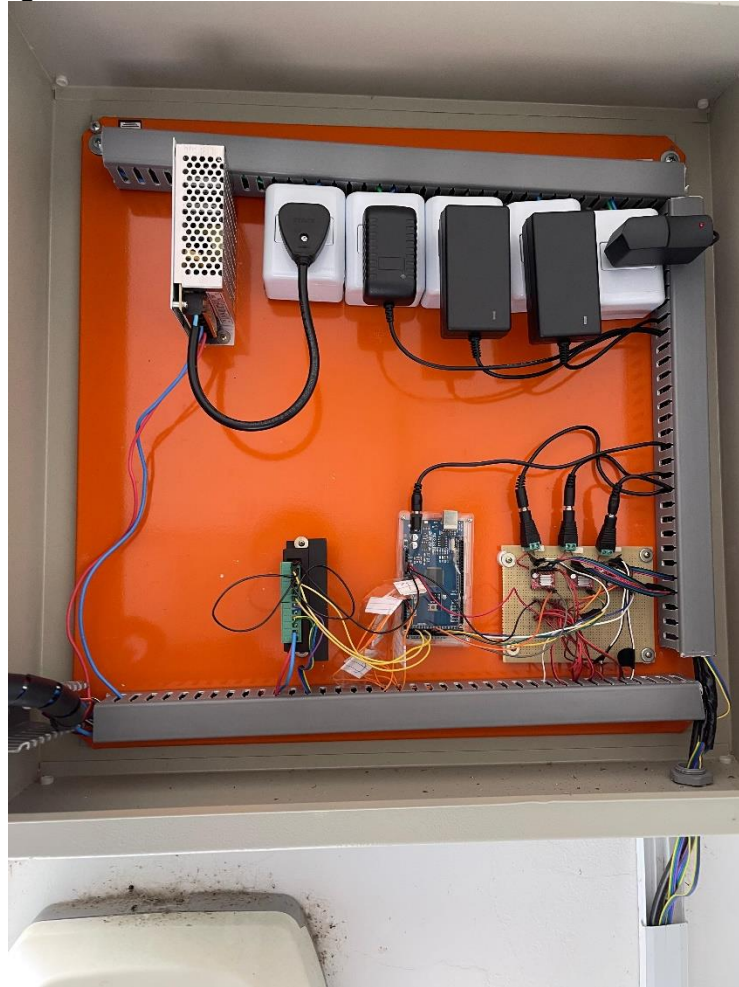


Fonte: O autor (2025)

O sistema funciona de forma autônoma, sem necessidade de intervenção manual, permitindo que o experimento prossiga por longos períodos. Com isso, é possível obter um histórico completo da produção de biogás ao longo dos dias de operação, representando fielmente o desempenho do reator e a eficiência do processo.

Para a instalação de todos os componentes necessários para os sistemas descritos acima foi necessário a construção de um painel elétrico como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Painel de comando do sistema automático



Fonte: O autor (2025)

Na porta do painel, para facilitar a parametrização do tempo e velocidade do agitador, foram instalados botões *ON/OFF* e potenciômetros, para cada parâmetro. A Figura 13 mostra os botões e potenciômetros instalados.

Figura 13 – Porta do painel com os botões e potenciômetros instalados



Fonte: O autor (2025)

3.3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE EFICIÊNCIA E DESEMPENHO

Após a implementação, o sistema automatizado é avaliado experimentalmente e comparado ao sistema manual. Os critérios de comparação incluem:

- Volume total de biogás produzido (mL);
- Taxa de produção (mL/dia);
- Tempo de intervenção humana e facilidade operacional;
- Qualidade do biogás gerado.

Os experimentos devem ser realizados com substratos idênticos e nas mesmas condições iniciais, garantindo base comparativa consistente. Os dados são

analisados estatisticamente e representados por gráficos de desempenho e variação temporal. O procedimento utilizado ao longo dos experimentos é descrito a seguir:

1. Preparação dos reatores com substratos orgânicos padronizados;
2. Calibração dos medidores de biogás e verificação do funcionamento do motor de passo e das duas bombas;
3. Execução do ensaio manual (referência) e registro dos resultados;
4. Execução do ensaio automatizado sob as mesmas condições;
5. Coleta e análise dos dados registrados pelo sistema;
6. Comparação dos resultados e avaliação do impacto da automação sobre a eficiência do processo.

3.4 MATERIAIS UTILIZADOS

Os principais componentes e instrumentos utilizados no desenvolvimento do sistema são listados a seguir:

- Arduino MEGA2560;
- Módulo Micro SD Card;
- Módulo RTC (Real Time Clock) DS3231;
- Fonte de alimentação 24 VDC e 12VDC;
- Motores de passo NEMA 17 - 4,2kgf/cm/1,7A;
- *Driver* A4988;
- Bombas peristálticas - 40mL/min/450mA;
- Eletrodos de nível em aço INOX 316L;
- Tubo de ensaio modificado para fixação dos eletrodos (eudiômetro);
- Solução salina para leitura dos eletrodos;
- Reatores de bancada em vidro com suporte em inox e vedação em borracha;
- Tubulações e conexões de PU;
- Cabos e conectores diversos para conexões dos componentes;
- Computador para aquisição de dados.

4 RESULTADOS

4.1 TESTES DOS EQUIPAMENTOS E SISTEMAS

Antes do início do ensaio, foram realizados testes preliminares nos sistemas de agitação, medição de biogás e bombeamento de substrato, com o objetivo de verificar sua estabilidade operacional e garantir que os equipamentos apresentassem desempenho adequado durante a operação intermitente. A Figura 14 demonstra o recipiente com os sistemas instalados, conforme o projeto da Figura 8.

Figura 14 – Recipiente de ensaio automático



Fonte: O autor (2025)

O sistema de agitação foi acionado automaticamente e monitorado por aproximadamente três horas, avaliando-se a continuidade do movimento, a

manutenção da rotação programada e o comportamento térmico e mecânico do motor de passo. Durante o monitoramento não foram observados interrupções, travamentos ou variações consideráveis, indicando capacidade operacional para funcionamento prolongado sem necessidade de intervenção manual. No teste, os tempos de agitação e velocidade foram variados para definir com assertividade os melhores valores para todo o ensaio conforme demonstra a Tabela 2. Foi definido também o tempo de 10 minutos em que o agitador fica em repouso.

Tabela 2 – Configurações do motor de passo de agitação

Número de passos	Rotações por minuto	Tempos de agitação
300	5,6	60,120,180,240,300 Pode ser configurado para qualquer velocidade
550	10,3	
700	13,1	

Fonte: O autor (2025)

Para a validação do sistema de medição de biogás, conectou-se uma mangueira em um ensaio em andamento, com uma pressão positiva de biogás, com o sistema de medição para referenciar qual a quantidade de líquido deslocado com o biogás. Com isso, foi marcado no tubo do eudiômetro o nível máximo e mínimo e posicionados os eletrodos. Com uma pipeta graduada, foi então medido o volume do líquido deslocado, chegando a um valor de $5,4 \pm 0,1$ mL.

Em seguida, foram feitos testes com a válvula solenoide abrindo e fechando para verificar o funcionamento da válvula em conjunto com os eletrodos. Também foi confirmada a contagem eletrônica dos pulsos, correspondentes ao volume unitário de deslocamento de $5,4 \pm 0,1$ mL por ciclo.

No sistema de bombeamento, a bomba peristáltica foi acionada dez vezes durante um minuto em cada teste, utilizando o mesmo substrato usado no ensaio, verificando-se sua capacidade de operação intermitente e a constância da vazão. Sabe-se que na prática a bomba não funciona com sua vazão nominal, devido a perda de carga devido a viscosidade do material, presença de sólidos, diâmetro da tubulação, curvas na tubulação, entre outros. Foram coletadas medições do volume de cada teste bombeado em um minuto em uma proveta de 100 mL com menor divisão de 1mL, resultando em $22,3 \pm 0,3$ mL/min para a bomba de alimentação e $22,2 \pm 0,3$ mL/min para a bomba de saída. A Tabela 3 descreve as medições de volume

realizadas, em que o resultado de medição é obtido considerando 1 desvio padrão para cima e para baixo do valor médio.

Tabela 3 – Medições dos testes das bombas

Número de teste	Vazão medida bomba de alimentação (± 1 mL)	Vazão medida bomba de saída (± 1 mL)
1	22	22
2	22	23
3	24	24
4	21	20
5	24	21
6	21	21
7	22	23
8	23	23
9	22	23
10	22	22
Resultado	22,3 \pm 0,3 mL	22,2 \pm 0,3 mL

Fonte: O autor (2025)

Os resultados dos testes preliminares indicaram que os sistemas apresentaram funcionamento adequado, permitindo o início do experimento com uma boa confiabilidade do sistema construído.

4.2 PREPARAÇÃO DOS RECIPIENTES DE ENSAIO E DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Antes do início dos ensaios, foi realizada a preparação dos recipientes com o substrato que foi utilizado ao longo de todo o experimento. O substrato selecionado consistiu em dejetos suínos, disponíveis no laboratório devido à sua instalação em anexo a uma granja, o que garante fornecimento contínuo e homogêneo do material. Esse tipo de substrato apresenta baixa densidade e reduzido teor de sólidos totais, características que facilitam a manipulação e a homogeneização durante as etapas experimentais. Além disso, como o laboratório está também anexo a um biodigestor da empresa que utiliza o dejetos suíno como um dos substratos principais, foi possível fazer uma comparação qualitativa do resultado obtido durante o experimento. A Figura 15 demonstra o substrato preparado.

Figura 15 – Substrato preparado para os ensaios



Fonte: O autor (2025)

Foram realizadas duas análises laboratoriais iniciais destinadas a avaliar a degradação do substrato ao longo do experimento. A primeira corresponde ao teor de sólidos voláteis (SV) cujo valor obtido foi de 75%. A segunda análise refere-se ao teor de sólidos totais (ST), que indicou um valor de 4%, permitindo avaliar a concentração global de matéria presente no substrato. Ao fim do experimento, essas análises foram realizadas novamente com o intuito de comparar o modelo manual com o automatizado. Como possuímos dois recipientes semelhantes de 3 litros de capacidade máxima, foram colocados em cada recipiente o volume de 2,4 litros, medidos igualmente com um béquer de 500ml.

Com esses valores, é possível verificar o potencial de produção máximo de biogás, conforme descrito no Capítulo 2.4, utilizando as expressões (4), (5), (6) e (7), definindo 25 dias de retenção e somando 96 mL de substrato por dia. Nas expressões em questão utilizou-se kg e m³, porém para facilitar os cálculos no experimento, usou-

se g e mL. A densidade do dejetos suíno é aproximadamente 1 g/mL, então, tem-se diariamente 96 g. Com isso, os parâmetros considerados são:

$$VD = 96 \text{ g/dia}$$

$$ST = 4\%$$

$$SV = 75\%$$

$$n = 0,5 \text{ L/g SV}$$

Inicialmente calculando a quantidade de sólidos totais:

$$QST = VD * ST = 96 * 0,04 = 3,84 \text{ g ST/dia}$$

Com o valor acima, se calcula a quantidade de sólidos voláteis:

$$QSV = QST * SV = 3,84 * 0,75 = 2,88 \text{ g SV/dia}$$

Então, é possível chegar no valor de biogás estimado por dia do experimento:

$$Biogás_{dia} = QSV * n = 2,88 * 0,5 = 1,44 \text{ L de biogás por dia}$$

O experimento durará 25 dias, com isso, estima-se a produção total de biogás durante esse período:

$$1,44 * 25 = 36 \text{ L}$$

Após o carregamento do substrato nos recipientes experimentais, eles foram devidamente fechados. Em seguida, as mangueiras de alimentação foram conectadas às bombas peristálticas responsáveis pelo fornecimento e retirada do substrato, enquanto as linhas de saída de biogás foram acopladas à válvula solenoide e ao sistema eletrônico de medição. Posteriormente, os reatores foram posicionados na bacia de aquecimento. Concluída essa etapa, o Arduino foi acionado, iniciando-se o experimento.

Para o início da operação, definiu-se que o agitador operaria em ciclos programados, sendo acionado por 120 segundos e permanecendo em repouso por 600 segundos, com velocidade ajustada para 10,3 rpm. No sistema manual, por outro lado, a agitação foi realizada pelo operador, ocorrendo aproximadamente de 5 a 8 vezes ao dia, porém no período noturno os recipientes permaneceram estáticos, sem qualquer agitação.

O sistema de medição de biogás também foi ativado no início da operação, registrando automaticamente os ciclos de contagem correspondentes ao deslocamento no eudiômetro. Cada ciclo contabilizado equivale à produção de 5,4 mL de biogás.

As bombas foram programadas para realizar a alimentação e a retirada de 4 mL de substrato a cada hora, totalizando 96 mL ao final de cada dia de operação. Esse valor foi calculado através do TRH: como tem-se um valor total de volume de 2,4L divididos em 25 dias de ensaio, obtém-se esse volume diário. Para isso a bomba de entrada funcionou 10,76 segundos por hora e a bomba de saída 10,81 segundo por hora, atingindo o volume diário necessário. No sistema manual, esse mesmo volume diário foi medido e aplicado manualmente, dividido em quatro vezes ao longo do dia, buscando manter o volume diário equivalente à operação automatizada.

4.3 ACOMPANHAMENTO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram acompanhados ao longo dos 25 dias, com monitoramento diário das condições operacionais dos sistemas automatizados e do conjunto de equipamentos associados. Nos primeiros 3 dias a supervisão dos ensaios foi intensificada com o intuito de verificar qualquer problema no sistema que pudesse ocorrer, para que o experimento não tivesse que ser reiniciado.

Durante o experimento, a principal ocorrência operacional esteve relacionada ao sistema de alimentação automática por bomba peristáltica. No terceiro dia, a bomba de entrada apresentou entupimento na linha de alimentação, exigindo intervenção imediata para restabelecer o fluxo. Apesar do desentupimento, o problema voltou a ocorrer no dia subsequente, indicando recorrência e risco de operação inadequada. Diante disso, optou-se pela remoção da bomba do sistema a fim de evitar a drenagem indevida do reator. Os entupimentos foram identificados em até 30 minutos, evitando que o recipiente tivesse seu volume reduzido sem a alimentação correspondente, o que comprometeria significativamente a integridade do ensaio. A partir desse ponto, a alimentação e a retirada de substrato no reator automatizado passaram a ser executadas manualmente, de maneira equivalente ao procedimento adotado no ensaio manual, garantindo uniformidade metodológica. Como o operador identificou a falha rapidamente, estima-se pouca influência no resultado.

O sistema de agitação operou de forma intermitente e estável durante todo o período experimental, sem apresentar interrupções, travamentos ou variações perceptíveis na velocidade de operação. O tempo de agitação era aumentado durante a alimentação manual para que fosse garantida a homogeneização do substrato.

De forma semelhante, o sistema de medição de biogás funcionou adequadamente ao longo de toda a duração do ensaio, sem registro de falhas na abertura da válvula, na captação dos pulsos ou no registro volumétrico.

O Arduino e a aquisição de dados também apresentaram desempenho satisfatório. A única interrupção ocorreu no sétimo dia do experimento, devido a uma queda de energia elétrica na instalação que durou cerca de 90 minutos. O desligamento inesperado provocou a paralisação temporária de todos os sistemas associados, o que exigiu a liberação manual do biogás acumulado nos recipientes para evitar problemas no eudiômetro com a pressão acima do calibrado. Após o retorno da energia, o sistema foi reiniciado normalmente, sem comprometimento da continuidade do ensaio.

4.4 ANÁLISE FINAL

Após os vinte e cinco dias de experimento, fez-se a análise comparativa entre os dois ensaios operação manual e operação automatizada com foco nas variáveis de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) e na produção de biogás, indicadores que mostram a eficiência de um biodigestor.

No ensaio operado manualmente, o substrato residual apresentou 1,3% de ST e 57% de SV, valores relativamente elevados ao final do período de digestão. Esses resultados indicam que uma fração significativa da matéria orgânica biodegradável permaneceu não convertida, sugerindo menor eficiência no processo.

Por outro lado, no ensaio conduzido com o sistema automatizado, o substrato final apresentou 0,7% de ST e 48% de SV, demonstrando uma redução mais expressiva de ambos os parâmetros. Essa diferença evidencia que a automação promoveu condições mais favoráveis à atividade microbológica, resultando em maior degradação da matéria orgânica.

O melhor desempenho observado no sistema automatizado era esperado, pois a agitação controlada, executada de forma intermitente ou em ciclos programados, contribui para a homogeneização do substrato. Esse efeito reduz zonas de baixa mistura e melhora o contato entre microrganismos e substratos. Como consequência, a eficiência metabólica aumenta, refletindo diretamente na maior conversão dos sólidos voláteis.

Considerando a operação com alimentação automática, era esperado um incremento na produção de biogás, uma vez que a adição regular e fracionada de substrato tende a favorecer a continuidade do processo de digestão. Entretanto, no que se refere à eficiência da degradação orgânica, o fato de a alimentação ser automática ou manual não interfere diretamente nos teores de sólidos totais e voláteis, pois esses parâmetros dependem predominantemente da atividade microbiológica, do tempo de retenção e das condições internas de operação, e não apenas da forma como o substrato é fornecido.

O sistema de medição de biogás, empregado de forma idêntica nos dois ensaios, permitiu quantificar de maneira acurada a evolução diária e o volume total produzido. No sistema manual, foram registrados 3572 ciclos, cada ciclo correspondendo a 5,4 mL, totalizando um volume acumulado de 19288,8 mL de biogás. A Figura 16 apresenta a produção diária, onde se observa um crescimento progressivo ao longo dos dias, com pico no dia 17. Esse comportamento é coerente com a dinâmica da digestão anaeróbia descrita na literatura, na qual sistemas com menor intensidade de mistura tendem a apresentar períodos mais prolongados de adaptação microbiana e menor eficiência na distribuição de nutrientes (CHERNICHARO, 2007).

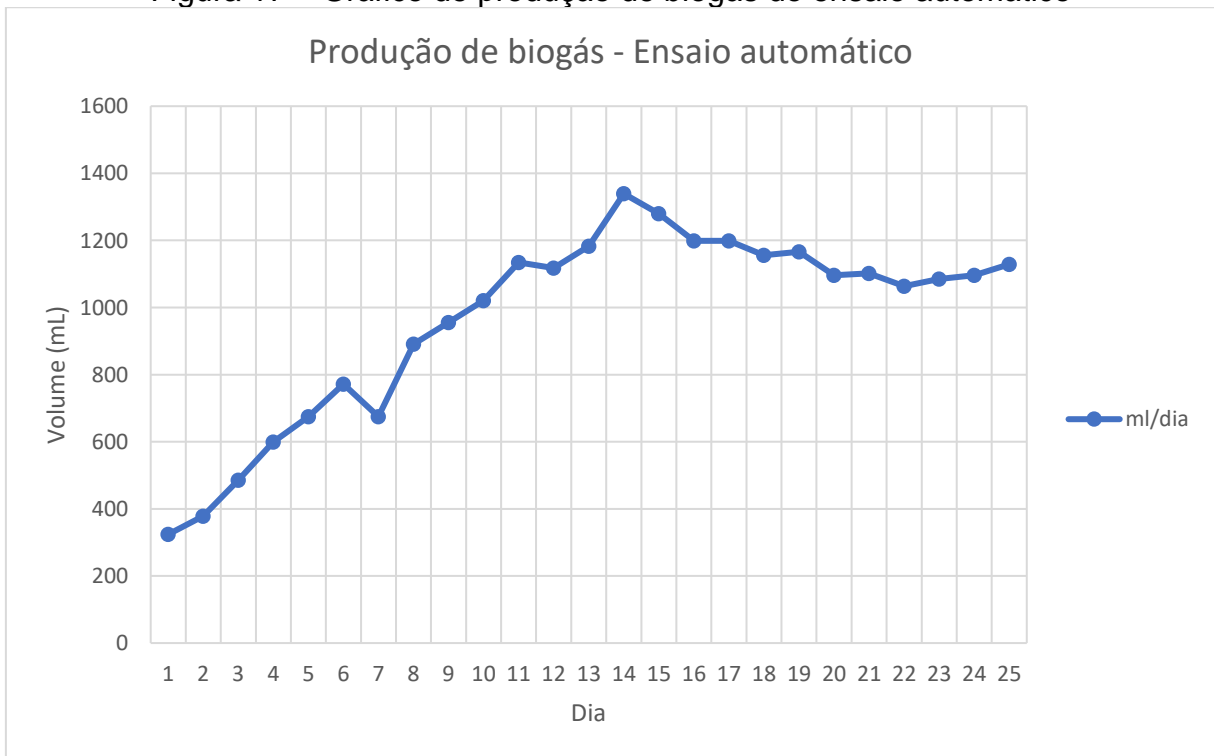
Figura 16 – Gráfico de produção de biogás do ensaio manual



Fonte: O autor (2025)

No ensaio automatizado, foram registrados 4467 ciclos de 5,4 mL, totalizando 24121,8 mL de biogás. A Figura 17 evidencia que o maior valor de produção ocorreu no dia 14, indicando uma resposta mais rápida do sistema biológico às condições operacionais. A literatura aponta que a agitação regular aumenta a taxa de transferência de massa e reduz gradientes de concentração no substrato, favorecendo a atividade hidrolítica e metanogênica (EMBRAPA, 2018).

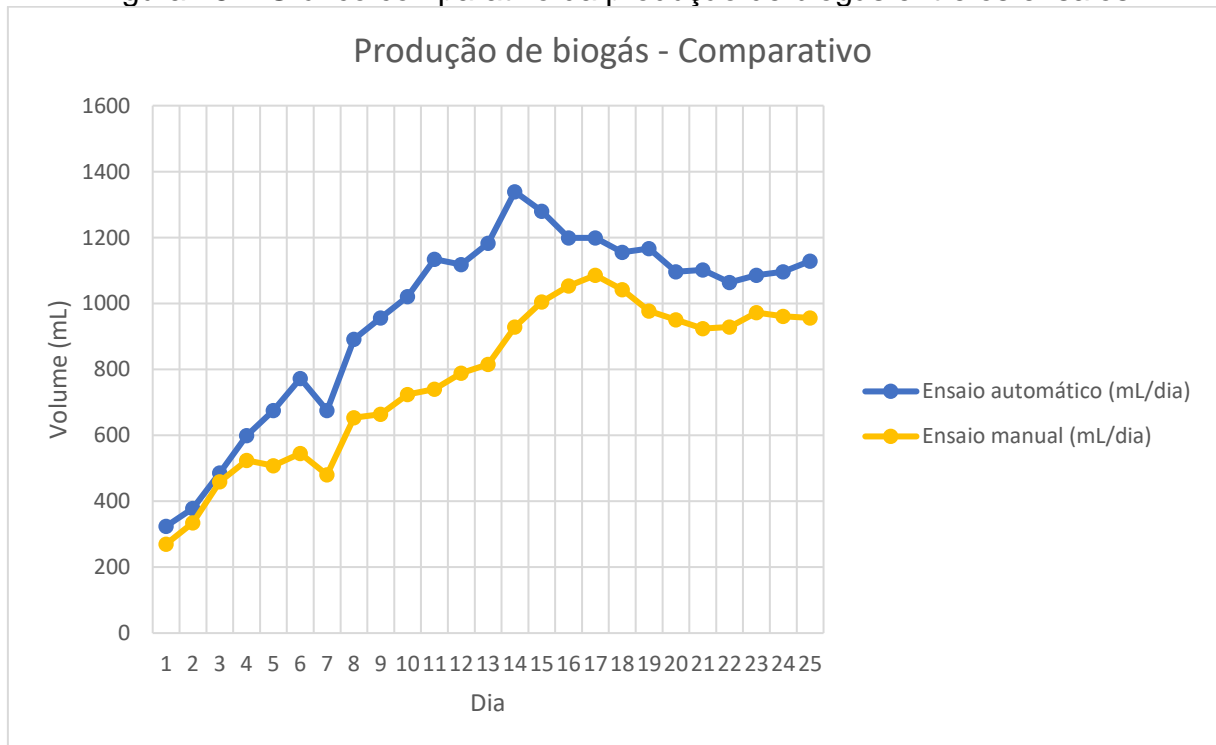
Figura 17 – Gráfico de produção de biogás do ensaio automático



Fonte: O autor (2025)

Na Figura 18 é possível analisar a diferença de produção de biogás através da junção dos dois gráficos.

Figura 18 – Gráfico comparativo da produção de biogás entre os ensaios



Fonte: O autor (2025)

A comparação direta entre os dois ensaios demonstra que o sistema automatizado apresentou volume total superior de biogás e atingiu seu pico produtivo de forma antecipada. Esse desempenho pode ser atribuído principalmente à agitação intermitente e controlada, que promoveu maior homogeneidade do meio reacional, reduzindo zonas de sedimentação e aumentando a disponibilidade de matéria orgânica para degradação microbiana. Segundo Chernicharo (2007), a mistura adequada é um dos fatores mais determinantes para elevar a taxa de conversão de sólidos voláteis em biogás em sistemas anaeróbios. Comparando com o valor máximo de produção teórico calculado de 36L, o sistema automatizado apresentou uma eficiência de aproximadamente 67% enquanto o sistema manual atingiu somente 54%.

Embora a alimentação automática tivesse potencial para intensificar ainda mais esse ganho, observa-se que apenas o controle da agitação já proporcionou uma diferença significativa entre os ensaios. Esse resultado confirma que melhorias na condução operacional mesmo quando implementadas parcialmente podem elevar substancialmente o desempenho do processo de digestão anaeróbia (KUNZ; STEIMETZ; AMARAL 2022).

Após o final do experimento, a saída de biogás foi fechada para acumular uma quantidade maior de gás no recipiente a fim de realizar a análise da qualidade do biogás de cada um dos ensaios. A análise foi realizada com um analisador de biogás que a empresa possui na planta, como mostra a Figura 19. Na Tabela 4 abaixo temos o comparativo entre os dois recipientes. Analisando a tabela, pode-se verificar que o biogás do sistema automatizado possui uma maior concentração de metano, gás de maior valor no biogás, o que implica em uma maior concentração de dióxido de carbono no sistema manual. O sistema manual apresentou uma maior concentração de O₂ o que provavelmente está relacionada à agitação manual, uma vez que o operador pode manusear o recipiente de forma descuidada, acarretando uma entrada de oxigênio em algum dos pontos de entrada/saída. O oxigênio está diretamente ligado a diminuição do gás sulfídrico, como percebe-se na Tabela 4 que no sistema manual possui um nível menor desse gás.

Figura 19 – Análise de biogás do ensaio automático



Fonte: O autor (2025)

Tabela 4 – Comparativo da qualidade de biogás

Tipo de gás	Ensaio manual	Ensaio automático
Metano (CH₄)	52,03%	56,38%
Dióxido de carbono (CO₂)	33,62%	29,07%
Oxigênio (O₂)	3,12%	1,54%
Gás sulfídrico (H₂S)	112 ppm	122 ppm

Fonte: O autor (2025)

A qualidade do biogás está diretamente associada ao teor de metano, sendo que concentrações mais elevadas aumentam seu poder calorífico e eficiência energética. Já o dióxido de carbono tende a reduzir o valor energético da mistura, enquanto o oxigênio deve permanecer próximo de zero, pois indica entrada de ar e risco operacional. Além disso, o sulfeto de hidrogênio, mesmo em pequenas quantidades, é indesejável devido à sua toxicidade e ao potencial corrosivo sobre equipamentos (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

Assim, os resultados demonstram que a automação não apenas padronizou as condições operacionais, mas também elevou a eficiência da digestão anaeróbia, conforme evidenciado pela maior redução de ST e SV no ensaio automatizado em comparação ao processo manual.

4.5 DISCUSSÃO

A análise final dos ensaios demonstra que a implementação do sistema automatizado resultou em melhorias consideráveis tanto na produção de biogás quanto na eficiência de degradação da matéria orgânica. A operação contínua e controlada dos dispositivos de agitação e monitoramento favoreceu condições melhores dentro dos reatores, reduzindo problemas comuns que ocorrem nos ensaios manuais. Esses fatores ajudaram para que a atividade das bactérias envolvidas nos recipientes fosse mais eficiente em um ambiente mais homogêneo.

Além do melhor desempenho, a automação teve impacto direto na confiabilidade dos resultados do experimento. A redução da necessidade de ação humana diminuiu as incertezas e variações associadas, como por exemplo as diferenças na intensidade de agitação, alimentação com quantidades diferentes do previsto e alimentação em horários diferentes do pré-estabelecido. Com a automação, o operador passa a exercer um papel majoritariamente de supervisão e análise, o que melhora a confiabilidade dos resultados e reduz os erros operacionais.

Embora o sistema de alimentação automática tenha funcionado apenas nos primeiros dias do experimento, sua utilização demonstrou uma facilidade maior na alimentação dos ensaios futuros. Esse bombeamento intermitente, assim como a agitação pode ser crucial principalmente nos períodos em que não há expediente no laboratório.

A qualidade do biogás também constitui um parâmetro fundamental para sua utilização energética. Conforme apresentado na Tabela 4, o sistema automatizado resultou em um biogás de melhor qualidade, com maior concentração de metano. Observou-se ainda que a fração de oxigênio no biogás obtido pelo sistema automatizado manteve-se menor ao longo do experimento. Esse comportamento está associado a algum erro operacional ou à entrada acidental de ar atmosférico no ensaio manual, uma vez que o manuseio frequente dos recipientes pode elevar o teor de oxigênio na mistura gasosa.

O experimento representa um avanço importante para a empresa. Com os sistemas implementados no laboratório, os ensaios passam a se assemelhar a um biodigestor do tipo CSTR, que é um produto comum da empresa. Dessa forma, torna-se possível simular plantas que estão sendo projetadas ou até mesmo já existentes, permitindo compreender melhor seu funcionamento de acordo com os parâmetros ajustados em ambiente controlado. Em diversas plantas é comum haver o sequenciamento de tanques, com o substrato sendo bombeado de um para outro, algo igualmente viável de reproduzir no laboratório. Com o sistema de medição da quantidade de biogás gerado, torna-se possível ajustar as taxas de alimentação, os tempos de agitação e a temperatura, possibilitando análises mais acuradas sobre qual configuração operacional apresenta maior eficiência.

Olhando para um caso de um biodigestor real, a automação nem sempre será a melhor escolha. Apesar de tornar o sistema mais eficiente, dependendo da quantidade de substrato disponível e do valor de investimento disponível, a planta pode se tornar cara frente ao retorno. Por se tratar de um setor em crescimento recente, muitos equipamentos, sensores e outros dispositivos necessários para a automação de um biodigestor, são importados e muito custosos. Muitas tecnologias novas estão surgindo, mas o setor ainda depende muito de componentes importados, como é verificado na empresa Archea.

4.6 MELHORIAS FUTURAS

O experimento, como já foi demonstrado, teve seu resultado satisfatório como esperado. Entretanto, sempre existem melhorias a serem feitas, e este trabalho não foi diferente.

No futuro serão implementados agitadores maiores, com maior torque para substratos que possuam na sua composição maior teor de sólidos, materiais mais abrasivos e mais fibras. Como durante o experimento foi utilizado um substrato de fácil agitação, não ocorreu nenhum problema. Mas, no caso descrito anteriormente, é provável que o motor utilizado apresente travamento ou grandes variações na velocidade.

O sistema de bombeamento precisa ser repensado, pois no caso do experimento não funcionou como esperado. Para que esse sistema funcione da maneira correta, novos tipos de bombas serão estudados e testados, assim como tubulações com maiores diâmetros para que o escoamento ocorra da melhor maneira.

No caso do sistema de medição de biogás, será implementado um visor em tempo real, inicialmente um display LCD, para que seja possível acompanhar diariamente a quantidade de ciclos e a quantidade de biogás gerado. Outro ponto a melhorar é a liberação de biogás, que até o momento está sendo liberado na atmosfera. Para isso, será estudada uma forma eficiente de armazenar o gás, assim, conseguindo também analisar a sua composição.

Para um futuro mais distante e com os sistemas instalados consolidados, é possível estudar a implementação de um sistema supervisorio para o laboratório. Nesse sistema supervisorio, podem ser ajustado todos os parâmetros envolvidos, mostrando todos os dados em tempo real e gerando gráficos de produção instantaneamente.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver, implementar e avaliar um sistema de automação para um laboratório de análises de produção de biogás, buscando aprimorar a exatidão das medições, aumentar a eficiência operacional e aproximar as condições experimentais daquelas observadas em biodigestores reais. A automação proposta integrou três subsistemas principais: agitação, alimentação e medição da produção de biogás, interligados por um microcontrolador responsável pelo controle e pela aquisição de dados.

Os testes iniciais validaram o funcionamento dos componentes desenvolvidos, demonstrando estabilidade do agitador, acurácia do sistema de medição baseado em eudiômetro eletrônico e funcionamento satisfatório das bombas peristálticas. Durante o experimento, ocorreu falha no sistema de alimentação, exigindo operação manual dessa etapa. Apesar dessa limitação, a manutenção do mesmo volume diário nos dois ensaios garantiu condições comparáveis para a avaliação do desempenho dos sistemas.

Os resultados obtidos ao longo dos 25 dias demonstraram diferenças expressivas entre os ensaios manual e automatizado. O sistema automatizado apresentou maior redução dos teores de sólidos totais e sólidos voláteis, indicando maior degradação da matéria orgânica. O volume total de biogás produzido também foi superior no ensaio automatizado, além de apresentar resposta mais rápida do processo biológico, com pico produtivo antecipado em relação ao método manual. A qualidade do biogás diferiu entre os sistemas, com maior teor de metano (CH_4) no ensaio automatizado, evidenciando condições mais favoráveis à digestão anaeróbia e menor influência de entrada acidental de oxigênio.

A análise dos resultados confirma que a automação melhora significativamente a eficiência do processo. A agitação controlada, em especial, mostrou impacto direto sobre a degradação dos substratos e a geração de biogás, representando um dos elementos mais relevantes do sistema proposto. Além disso, a automação contribuiu para a padronização dos procedimentos, aumentando a confiabilidade dos dados experimentais e possibilitando a reprodução das condições de operação de biodigestores do tipo CSTR, utilizados comercialmente.

De forma geral, os resultados demonstram que a automação constitui uma ferramenta eficaz para elevar a qualidade das análises laboratoriais de produção de

biogás, representando um avanço significativo para a empresa e oferecendo base técnica sólida para o desenvolvimento de estudos mais complexos e aplicações em escala industrial.

REFERÊNCIAS

- ABILOGÁS – Associação Brasileira do Biogás. *Panorama do Biogás e Biometano no Brasil 2024*. Disponível em: <https://abiogas.org.br>. Acesso em: 4 nov. 2025.
- ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, v. 36, n. 2, p. 452–466, 2018.
- APHA; AWWA; WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2012.
- BNEWS. Biometano brasileiro vive momento histórico com crescimento de 19% ao ano do setor. Disponível em: <https://www.bnews.com.br/noticias/economia-e-mercado/bnews-cop30-biometano-brasileiro-vive-momento-historico-com-crescimento-de-19-ao-ano-do-setor.html>. Acesso em: 15 out. 2025.
- BUDZIANOWSKI, W. M. Biogas upgrading technologies: state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 1144–1167, 2016.
- BALAGURUSAMY, N.; CHANDEL, A. K.,. *Biogas Production: From Anaerobic Digestion to a Sustainable Bioenergy Industry*. Cham: Springer, 2020.
- CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. Belo Horizonte: UFMG, 2007.
- CIBIOGÁS. *Panorama do Biogás no Brasil 2024*. Disponível em: <https://www.abegas.org.br/arquivos/95755>. Acesso em: 15 out. 2025.
- CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis. *Atlas do Biogás e do Biometano 2023*. Foz do Iguaçu: CIBIOGÁS, 2023. Disponível em: <https://cibiogas.org>. Acesso em: 4 nov. 2025.
- CIBIOGÁS. Biogás nas indústrias brasileiras: como a fonte pode impulsionar o setor. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/biogás-nas-indústrias-brasileiras-como-a-fonte-pode-impulsionar-o-setor/>. Acesso em: 20 set. 2025.

ELETROGATE. Motor de passo NEMA 17 – 4.2 kgf, 1.7 A. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/nema-17-4-2-kgf-1-7-a>. Acesso em: 18 set. 2025.

ELETROGATE. Driver A4988 com dissipador. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/driver-motor-de-passo-a4988-c-dissipador-de-calor>. Acesso em: 29 ago. 2025.

ELETROGATE. Módulo RTC DS1307. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-real-time-clock-ds1307>. Acesso em: 2 set. 2025.

ELETROGATE. Módulo Micro SD Card. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-micro-sd-card>. Acesso em: 15 ago. 2025.

ENERGYEDIA. Gas Yields and Methane Contents for Various Substrates. 2023. Disponível em: https://energypedia.info/wiki/Gas_Yields_and_Methane_Contents_for_Various_Substrates. Acesso em: 22 set. 2025.

KAPDI, S. S. et al. Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. *Renewable Energy*, v. 30, p. 1195–1202, 2005.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do (ed.). *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*. 2. ed. Concórdia: SBERA; EMBRAPA Suínos e Aves, 2022.

MATA-ALVAREZ, J. *Anaerobic Digestion: Processes, Products and Applications*. 3. ed. London: IWA Publishing, 2014.

METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

NACKE, Oliver. *Biogasanlagen*. Hessisch Oldendorf, Alemanha, 2001. Não publicado.
NOTÍCIAS AGRÍCOLAS. Brasil pode mais do que triplicar produção de biometano até 2027. Disponível em:

<https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/agronegocio/408937-brasil-pode-mais-do-que-triplicar-producao-de-biometano-ate-2027-e-o-estado-de-sp-deve-liderar-descarbonizacao-do-transporte-pesado-e-da-industria.html>. Acesso em: 15 out. 2025.

PORTAL ENERGIA E BIOGÁS. *4º Ep - Tubo Eudiômetro*. Biogás e Energia, 04 out. 2022. Disponível em: <https://biogaseenergia.com.br/4o-episodio-tubo-eudiometro>. Acesso em: 24 nov. 2025.

PROENÇA, Alexandre Júlio. *Potencial de produção de biogás através da digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário da UFSC*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

ROBOCORE. Bomba peristáltica. Disponível em: <https://www.robocore.net/atuador/bomba-peristaltica>. Acesso em: 22 set. 2025.

VDI 4630. *Fermentation of Organic Materials – Characterisation of the Substrate, Sampling, Collection of Material Data, Fermentation Tests*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2016.

WIELAND, P. Biogas production: current states and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 85, p. 849–860, 2011.