PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

ESCOLA POLITECNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA URBANA

LEANDRO ZUIN QUIBAO

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE NA GERAÇÃO E PURIFICAÇÃO EM MODELO DE USINA DE BIOGÁS

Campinas - SP

2025

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

ESCOLA POLITECNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA URBANA

LEANDRO ZUIN QUIBAO

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE NA GERAÇÃO E PURIFICAÇÃO EM MODELO DE USINA DE BIOGÁS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito para obtenção do Título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Ademar Takeo Akabane
Co-orientadora: Profa. Dra. Betânia Hoss Lunelli

Campinas- SP

2025

Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI
Gerador de fichas catalográficas da Universidade PUC-Campinas
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Quibao, Leandro Zuin

Q6s Sistema de aquisição de dados e controle na geração e purificação em modelo de usina de biogás / Leandro Zuin Quibao. - Campinas: PUC-Campinas, 2025.

40 f.

Orientador: Ademar Takeo Akabane. Coorientador: Betânia Hoss Lunelli

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2025.
Inclui bibliografia.

1. Sistemas de Controle. 2. Microalgas. 3. Biogás. I. Akabane, Ademar Takeo. II. Lunelli, Betânia Hoss III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola Politécnica. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. IV. Título.

LEANDRO ZUIN QUIBAO

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE NA GERAÇÃO E PURIFICAÇÃO EM MODELO DE USINA DE BIOGÁS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Ademar Takeo Akabane

Dissertação defendida e aprovada em 28 de fevereiro de 2025 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:

Profa. Dra. Ademar Takeo Akabane
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Profa. Dra. Betânia Hoss Lunelli
Coorientadora da Dissertação
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Prof. Dr. Rafael Souza Farias
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Dr. Victor Coelho Geraldo
Engenheiro Químico da 3M

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos aos professores do Programa de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Pontifícia Universidade Católica de Campinas pelo incentivo e apoio, à minha co-orientadora Betânia Hoss Lunelli pela dedicação e atenção dispensada ao longo do curso e em especial ao Prof. Dr. Ademar Takeo Akabane por aceitar o desafio de ser meu orientador em um tema que, a princípio, parecia totalmente novidade para si.

Agradeço à Pontifícia Universidade Católica de Campinas e a CAPES por permitirem e apoiarem esse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RESUMO

QUIBAO, L. Z. **Sistema de aquisição de dados e controle na geração e purificação em modelo de usina de biogás**. 2025. 40f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

A crescente demanda energética tem impulsionado a busca por fontes de energia alternativas, com o objetivo de substituir os combustíveis fósseis por opções renováveis e menos poluentes, como o biogás é considerado um forte candidato para a transformação sustentável da matriz energética mundial. No entanto, ainda existem desafios técnicos e econômicos significativos para a aplicação eficiente do biogás na geração de energia elétrica ou térmica e como substituto do gás natural, visto que há a necessidade de processos de purificação físicos ou químicos que reduzam a concentração de dióxido de carbono na mistura gasosa. Como alternativa, estão sendo estudados cultivos de microalgas para a captura fotossintética de CO_2 e conversão em biomassa, com níveis de eficiência relacionados em grande parte a evolução populacional destes microrganismos. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema para monitorar e controlar temperatura em um processo de digestão anaeróbia e estimular o crescimento de microalgas em fotobiorreator proporcionando controle de luminosidade, periodicidade e cor. A eficiência do método de purificação proposto foi avaliada através da análise da mistura gasosa, quantificando os elementos CO_2 e CH_4 antes e depois do processamento, utilizando o método de análise Orsat comparado com os sensores propostos. Com base nos resultados obtidos, a captura de CO_2 pelas microalgas foi de aproximadamente 1,67% durante um período de 30 minutos de circulação do biogás no fotobiorreator.

Palavras-chave: Sensores, digestão anaeróbia, microalgas, biogás, fotobiorreator.

ABSTRACT

QUIBAO, L. Z. **Data acquisition and control system in the generation and purification model of a biogas plant.** 2025. 40f. Dissertation (Master's) – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

The growing energy demand has driven the search for alternative energy sources, aiming to replace fossil fuels with renewable and less polluting options. In this context, biogas is considered a strong candidate for the sustainable transformation of the global energy matrix. However, there are still significant technical and economic challenges for the efficient application of biogas in electricity or thermal energy generation and as a substitute for natural gas, given the need for physical or chemical purification processes to reduce the concentration of carbon dioxide in the gas mixture. As an alternative, the cultivation of microalgae is being studied for the photosynthetic capture of CO_2 and its conversion into biomass, with efficiency levels largely dependent on the population growth of these microorganisms. This study aimed to develop a system to monitor and control temperature in an anaerobic digestion process and stimulate the growth of microalgae in a photobioreactor by providing control over light intensity, periodicity, and color. The efficiency of the proposed purification method was evaluated through the analysis of the gas mixture, quantifying CO_2 and CH_4 elements before and after processing, using the Orsat analysis method compared with the proposed sensors. Based on the obtained results, CO_2 capture by microalgae was approximately 1.67% over a 30-minute period of biogas circulation in the photobioreactor.

.

Keywords: Sensors, anaerobic digestion, microalgae, biogas, photobioreactor.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Faixas de temperatura ótimas para diferentes gêneros de bactéria. 27

TABELA 2. Tipo e proporção de resíduos 29

TABELA 3. Custo de componentes do Analisador de Gases 31

TABELA 4. Valores iniciais e finais da análise gasosa bruta. 33

TABELA 5. Valores iniciais e finais da análise de biogás purificado. 35

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. REPRESENTAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO_2 POR CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS 11

FIGURA 2. REPRESENTAÇÃO EM 3D DO BIODIGESTOR. 18

FIGURA 3. REPRESENTAÇÃO EM 3D DO FOTOBIORREATOR. 20

FIGURA 4. KITASSATO COM SENSORES DE ANÁLISE DE GÁS. 21

FIGURA 5. SENSOR DE TURBIDEZ ST-100. 23

FIGURA 6. SENSOR SCD30 DE CO_2 24

FIGURA 7. SENSOR DE PRESSÃO BMP280. 25

FIGURA 8. SENSOR MQ-4 DE GÁS METANO. 26

FIGURA 9. CARGA DE MATERIAL ORGÂNICO E INÓCULO NO BIODIGESTOR 30

FIGURA 10. FOTOBIORREATOR EM OPERAÇÃO 31

FIGURA 11. TEMPERATURAS INTERNA, ENTRADA E SAÍDA DE ÁGUA DO BIODIGESTOR. 32

FIGURA 12. FAIXAS DE TEMPERATURA ÓTIMAS DE ACORDO COM GERARDI (2003). 33

FIGURA 13. RESULTADO DE ANÁLISE DO GÁS BRUTO. 34

FIGURA 14. RESULTADO DE ANÁLISE DO BIOGÁS PURIFICADO. 35

SUMÁRIO

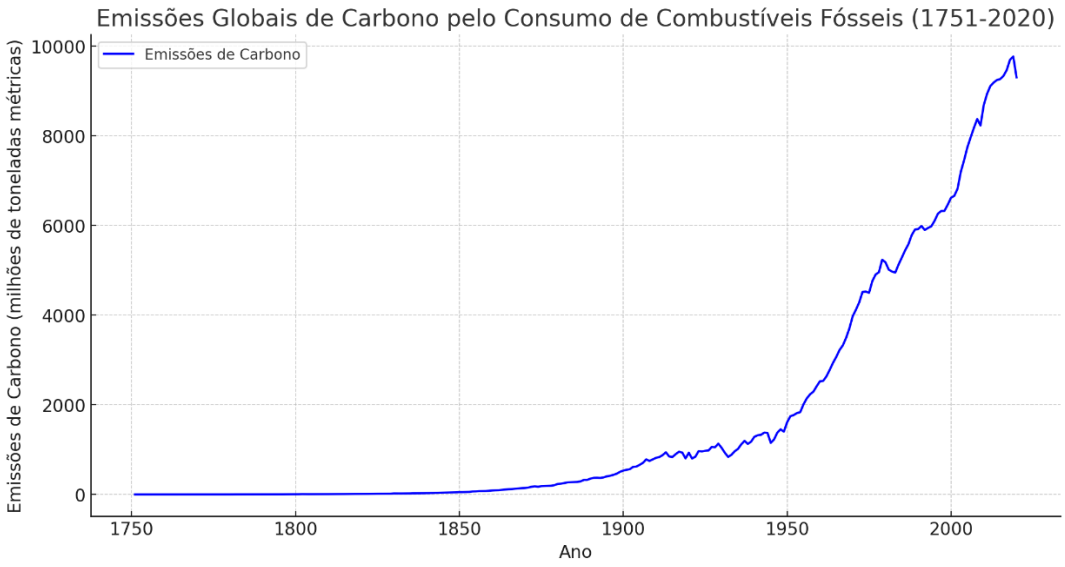
1 INTRODUÇÃO 11
2 OBJETIVOS 13
2.1 Objetivo Geral 13
2.2 Objetivos Específicos 13
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 14
3.1 Biogás 14
3.2 Microalgas 14
3.3 Sistemas de Cultivo 15
3.4 Método de análise Orsat 17
4 METODOLOGIA 18
4.1 Projeto e Construção 18
4.1.1 Biodigestor 18
4.1.2 Fotobiorreator 19
4.1.3 Analisador de gases 20
4.2 Definição dos Sensores 21
4.2.1 Sensor DS18B20 (Temperatura) 22
4.2.2 Sensor ST100 (Turbidez) 23
4.2.3 Sensor SCD30 (CO_2) 24
4.2.4 Sensor BMP280 (Pressão) 24
4.2.5 Sensor MQ-4 (Metano) 25
4.3 Definição dos Parâmetros Iniciais 26
4.3.1 Parâmetros do Biodigestor 26
4.3.2 Parâmetros do Fotobiorreator 27
5 PREPARAÇÃO E DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL 29
5.1 (Co)digestão anaeróbia (biodigestor) 29
5.2 Cultivo de microalgas 30
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 31
6.1 Custo médio de montagem do analisador de gases 31
6.2 Monitoramento e controle de temperatura 32
6.3 Análise gasosa por sensores de amostra bruta 33
6.4 Análise gasosa por método Orsat da amostra bruta 34
6.5 Análise gasosa por sensores de amostra purificada 34
6.6 Análise gasosa por método Orsat de amostra purificada 35
7 CONCLUSÃO 36
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 37
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 39

1 INTRODUÇÃO

O uso de combustíveis fósseis associados a altas taxas de desmatamentos e utilização de fertilizantes e defensivos agrícolas, contribuíram significativamente para o aumento da concentração de gases causadores do efeito estufa. Em 2020, a concentração média de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera era de 412,5 ± 0,1 ppm, valor considerado alto e maior do que o observado no ano anterior (BLUNDEN; BOYER, 2021).

O aumento da concentração de gases do efeito estufa é algo latente que vem preocupando ao longo da história. Hefner & Marland (2023) agregaram dados disponibilizados pelo *Carbon Dioxide Information and Analysis Center* (CDIAC) que mostram o aumento de emissões globais de CO_2 compreendendo o período de 1751 até 2020, bem como o agravamento nessa evolução ano a ano mostrado na **FIGURA 1**.

FIGURA 1. Representação das emissões de CO_2 por consumo de combustíveis fósseis



Fonte: Do autor, com dados obtidos de Hefner & Marland (2023)

A fim de mitigar essa tendência do crescente uso de combustíveis fósseis, há um crescente interesse em fontes alternativas de energia, motivado pela busca por sustentabilidade e características renováveis presentes em biocombustíveis como o bioetanol, biodiesel e biogás (MONLAU et al., 2015).

O principal elemento combustível que contribui para o poder calorífico do biogás é o metano (CH_4); uma maior concentração deste gás resulta em um aumento do potencial energético durante a combustão. Por outro lado, uma maior concentração de CO_2 no biogás reduz proporcionalmente seu poder calorífico (SAFARI; DINCER, 2019).

Como microrganismos unicelulares foto-autotróficos, as microalgas (cianobactérias, dentre outras) são responsáveis por aproximadamente 40% da fotossíntese global, requisitando o CO_2 do ambiente para promover seu crescimento e, dessa forma, reduzir a concentração desse gás que contribui para o efeito estufa na atmosfera (VAZ et al., 2019). A utilização de microalgas para a captura de CO_2 pode então ser uma tecnologia de uso potencial na otimização de biogás combustível devido ao seu alto poder de fixação, taxa de crescimento e adaptação a diversas condições de cultivo (GUO et al., 2018).

O objetivo deste projeto é criar um sistema de monitoramento e controle de um biodigestor e de um fotobiorreator para geração e purificação de biogás em pequena escala, além de um dispositivo de análise de gases para avaliação da eficiência da solução proposta através da quantificação do teor de dióxido de CO_2 e CH_4.

Baseado na revisão de estudos sobre o crescimento populacional de microalgas em ambientes de cultivo com parâmetros controlados, foi desenvolvido um protótipo de um fotobiorreator de placa plana com sistema de controle de estímulos luminosos e monitoramento de temperatura. O dispositivo analisador de gases proposto foi utilizado para medir a concentração de CO_2 e CH_4 na mistura gasosa *in-natura* e após a passagem pelo interior do fotobiorreator, preenchido com biomassa de microalgas, avaliando assim a capacidade de purificação do biogás pela redução da concentração de dióxido de carbono em relação ao metano.

Após identificar os parâmetros ideais para o cultivo das microalgas no dispositivo, esses parâmetros podem ser adaptados para utilização processos produtivos de grande escala.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do trabalho é projetar um sistema de monitoramento e controle de um biodigestor e de um fotobiorreator para geração e purificação de biogás em pequena escala, além de um dispositivo de análise de gases para avaliação da eficiência da solução proposta através da quantificação do teor de dióxido de CO_2 e CH_4.

2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar um biodigestor e um fotobiorreator utilizando o *software* Autodesk Inventor;
- Selecionar sensores para monitorar e controlar os parâmetros desejados;
- Desenvolver sistemas de controle, aquisição e registro de dados para o biodigestor e o fotobiorreator;
- Realizar a aquisição de dados e compará-los com os obtidos por métodos convencionais de análise, a fim de validar o sistema desenvolvido.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Entre os conceitos-chave, destaca-se o processo de produção de biogás e métodos de *upgrading* para aumento do poder calorífico, através da maior concentração de metano na mistura gasosa. Esse objetivo pode ser alcançado por métodos como a adsorção de CO_2 por microalgas.

3.1 Biogás

Durante o processo de digestão anaeróbia, reações bioquímicas liberam uma mistura gasosa conhecida como biogás. A composição deste gás varia conforme a natureza dos resíduos orgânicos, além de fatores como temperatura e pH do biodigestor. O biogás é predominantemente composto por metano, com concentrações variando entre 40% e 75%, e dióxido de carbono, em uma fração complementar de 25% a 60%. Além disso, pode conter outros gases em menores proporções e até mesmo vapor d'água (SRINUANPAN et al., 2019).

A razão ideal carbono/nitrogênio para a produção de de biogás com a melhor qualidade, ou seja, com a maior proporção de CH_4 com relação a CO_2, deve estar entre 20:1 e 30:1 no início do processo de digestão anaeróbia (KARLSSON, 2014)

A capacidade calorífica do metano em queima quando puro é descrito pelo Potencial Calorífico Inferior (PCI), sendo de 35.800 MJ/m³ em condições normais de temperatura e pressão (CNTP). A capacidade em um biogás bruto extraído de um biodigestor será correspondente à fração desse gás na mistura resultante, tal qual uma concentração comum de 60% de metano tem poder calorifico de 21.480 kJ m^{-3}. (MORAN et al., 2018)

A principal característica desejada no biogás é seu potencial combustível, proporcionado pelo CH_4. Quanto maior sua concentração, melhor o potencial calorífico e energético. Por outro lado, altas concentrações de CO_2 reduzem esse poder calorífico (SAFARI; DINCER, 2019).

3.2 Microalgas

As microalgas são microrganismos fotossintéticos unicelulares de linhagem como as cianobactérias, algas verdes e dentre outras que desempenham um papel crucial na fotossíntese global, responsáveis por cerca de 40% desse processo na

Terra (ZHU, 2015). São conhecidas por sua alta capacidade de fixação de CO_2, rápido crescimento e forte adaptação ambiental, características que as tornam ideais para aplicações em bioenergia, biorremediação e captura de carbono (ALASWAD et al., 2015).

Recentemente, o cultivo de microalgas tem sido amplamente estudado para a purificação de efluentes e o *upgrading* de biogás. Durante a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos ocorre a produção do biogás bruto, uma mistura gasosa que parte de sua composição é representada pelo gás CO_2 a ser adsorvido e contribuirá para o desenvolvimento desses microrganismos (ZHANG et al., 2018).

Yan e Zheng (2014) também observaram alta eficiência de remoção de nutrientes principais e CO_2 de determinada mistura gasosa ao estudar a evolução quantitativa de biomassa algal e o *upgrading* do biogás utilizando alga verde *Chlorella sp*. em um fotobiorreator usando diodos emissores de luz (LEDs) em determinadas cores. Ao experimentar diversas configurações alterando a relação entre quantidade de luz azul e vermelha, bem como tempos e ciclos de exposição, perceberam que ocorrem alterações na taxa de desenvolvimento das microalgas verdes *Chrorella sp*. e até mesmo na adsorção de CO_2.

Apesar das vantagens, o cultivo de microalgas enfrenta desafios como os altos custos de produção e a necessidade de tecnologias eficientes para a colheita e processamento das algas em larga escala (ZHANG et al., 2018). No entanto, o desenvolvimento de fotobiorreatores mais econômicos tem mostrado grande potencial para superar essas barreiras e promover maior eficiência ao processo (CAO et al., 2017).

3.3 Sistemas de Cultivo

O cultivo de microalgas pode ser realizado em sistemas de armazenamento fechados ou abertos, também conhecidos como *indoor* ou *outdoor*, respectivamente (OZKAN et al., 2012; VASUMATHI et al., 2012). Cada sistema é projetado e construído de acordo com as finalidades e a otimização das características de cada método. Geralmente, sistemas abertos de cultivo são utilizados devido à baixa necessidade de manutenção e à facilidade de implementação. Em ambientes abertos, grandes áreas

estão disponíveis e podem aproveitar a radiação UV proveniente do sol (CHISTI, 2007).

Diferente dos sistemas abertos, os fotobiorreatores são fechados e limitam o espaço e a troca térmica e gasosa com o ambiente. Esses sistemas foram projetados visando uma maior eficiência, superando as limitações dos sistemas abertos em relação ao espaço necessário para sua operação.

Em sistemas fechados, existem características que otimizam o cultivo e manutenção das microalgas, como por exemplo a elevada relação entre a área existente e a área iluminada, fazendo com que a exposição de toda população de algas à radiação UV da luz seja feita de modo homogêneo e controlado. Isso garante, além do controle preciso do processo, uma gama de personalização específica visando a otimização das condições vitais das algas, evitando contaminações e podendo cultivar espécies determinadas (SIERRA et al., 2008; BAHADAR; KHAN, 2013).

Estudado em escala reduzida, o aperfeiçoamento dos fotobiorreatores foi realizado para determinadas espécies, o que, para fins comerciais, se mostrou efetivo, apesar do alto custo dos componentes de construção e de implementação do sistema (POSTEN, 2009; TREDICI et al., 2010). Algumas características são importantes na produção de microalgas:

- Monitoramento e controle do pH, CO_2 e fontes de energia para microalgas;
- Monitoramento e controle da radiação UV e cores específicas para cada espécie;
- Monitoramento e controle da agitação para manter a homogeneidade na câmera de cultivo, evitando problemas como bioincrustrações;
- Monitoramento e controle da biomassa condicionada a determinados volumes;
- Monitoramento e controle do crescimento e condições de vida à fim de realizar a colheita correta da biomassa.

Os sistemas fechados são responsáveis pelo desenvolvimento e avanço da produção de microalgas que para serem cultivadas exigem controle e atenção elevados. Com os estudos em pequena escala, se torna possível a transição com maior segurança e assertividade para escala industrial (TREDICI, 2004; TREDICI et al., 2010).

No campo dos fotobiorreatores de sistemas fechados, a classificação pode ser feita principalmente com base no formato e no funcionamento, como exemplificado pelo fotobiorreator de placa plana. Este tipo de biorreator, predominantemente

retangular, apresenta uma elevada área superficial em relação ao espaço ocupado. Geralmente, utiliza iluminação artificial, embora também possa empregar iluminação solar natural (SINGH; SHARMA, 2012). Ao longo do tempo, este tipo de reator passou por inúmeras modificações, todas elas com o objetivo de otimizar o cultivo de microalgas. Uma das mudanças mais significativas foi a incorporação de aeradores no fundo do reator como dispersores dos gases utilizados. Esses gases fornecem a maior parte da energia para o sistema, sendo preferencialmente o próprio gás que será purificado (WANG; LAN; HORSMAN, 2012).

3.4 Método de análise Orsat

O método de análise Orsat é um procedimento clássico e amplamente utilizado para a análise de misturas gasosas através da determinação precisa de concentrações volumétricas de seus componentes. Apesar de não ser um método altamente sensível para baixas concentrações, possui grande reprodutibilidade e é altamente acessível quanto a reagentes e recursos utilizados (DEMIRBAS et al., 2018)

A composição do biogás, predominantemente constituída por metano e dióxido de carbono, é de grande interesse tanto pelo seu potencial energético quanto pelo impacto ambiental. O metano, como combustível, possui elevado poder calorífico, enquanto o dióxido de carbono é um gás de efeito estufa significativo. Para avaliar essa relação, estudos indicam a utilização do método Orsat para medir a qualidade do biogás proveniente de resíduos agrícolas, palha de arroz ou esterco animal Por meio da absorção seletiva de dióxido de carbono por reagentes químicos específicos, é possível quantificar a parcela remanescente da mistura gasosa, permitindo assim determinar a concentração aproximada de metano presente no biogás.(DEMIRBAS, 2006).

4 METODOLOGIA

A sequência de etapas que viabilizou o desenvolvimento da pesquisa é descrita desde a concepção e elaboração do modelo dos equipamentos, até ser detalhada nos aspectos relacionados aos sistemas de monitorização, com ênfase no fotobiorreator. Vale destacar que os equipamentos (biodigestor e fotobiorreator) foram construídos em conjunto com Augusto Paes Villas Bôas, também mestrando do Programa de pós graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, durante o desenvolvimento do seu projeto.

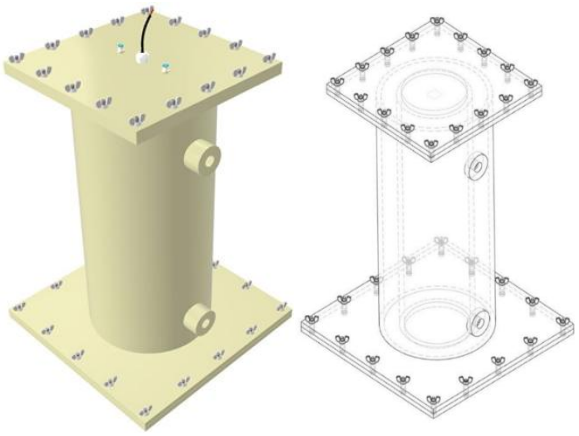
4.1 Projeto e Construção

Nessa etapa são descritos o projeto e a construção dos equipamentos, biodigestor e fotobiorreator. As premissas do desenvolvimento estiveram alinhadas sempre que possível com o uso de materiais recicláveis, fabricação simplificada e executadas sem a utilização de serviços especializados.

4.1.1 Biodigestor

Foi desenvolvido um projeto de biodigestor de pequena escala como representado na FIGURA 2, respeitando espaço disponível no Laboratório de Processos Químicos do Campus 1 da PUC Campinas, tendo a dimensão máxima representada pela base inferior quadrada com lado de medida 380 mm e altura de 530 mm da base até a parte superior.

FIGURA 2. Representação em 3D do biodigestor.



Fonte: Do autor (2024).

A construção do dispositivo foi realizada com material polietileno de alta densidade (PEAD), composta por um tubo central envolvido por outro de maior diâmetro, com tampas em suas extremidades. A parede externa possui dois orifícios que representam a entrada e saída de água.

O espaço disponível entre os tubos concêntricos pode ser visualizado na representação interna também apresentada pela FIGURA 2, por onde circula um fluxo contínuo de água bombeado a partir de um reservatório de aquecimento.

Após a construção, foram realizados testes de estanqueidade com ar comprimido na câmara interna, bem como no espaço por onde circula a água, garantindo que não haja possibilidade de vazamento da câmara interna e nem o escape de água para o espaço interior ou exterior do biodigestor.

4.1.2 Fotobiorreator

O modelo construtivo do fotobiorreator apresentado na FIGURA 3 caracteriza-se por ser um sistema fechado de placa plana. Essa escolha deve-se à simplicidade de fabricação, considerando a disponibilidade de materiais e ferramentas. Todos os componentes foram confeccionados em policarbonato transparente de 5 mm de espessura, usinados por uma router CNC. A dimensão útil do dispositivo é de 250 mm de largura por 500 mm de altura e 110 mm de profundidade, comportando um volume de cultivo de até 10 litros até seu nível máximo. As peças que correspondem às laterais, fundo e aba de fixação são soldadas por uso de solvente químico específico para o tipo de material selecionado. A tampa possui um sulco para posicionamento de um anel de vedação de borracha e foi fixada por meio de 12 parafusos M6 com porcas borboleta.

FIGURA 3. Representação em 3D do fotobiorreator.

Fonte: Do autor (2024).

Foram realizados testes de estanqueidade e verificação da existência de passagem de gases apenas pelos acopladores das mangueiras pneumáticas.

Em uma das laterais maiores do fotobiorreator estão posicionadas fitas LED com densidade de 60 LEDs por metro, totalizando 546 LEDs em 21 segmentos com 26 LEDs endereçáveis RGB cada. As fitas estão coladas em uma placa de vidro que pode ser desacoplada do dispositivo para manutenção. Na lateral posterior, um espelho é posicionado para garantir que a luminosidade que incide no interior seja refletida e não dissipada no ambiente, reduzindo perdas e evitando luminosidade indesejada no ambiente. O controle é feito através de sinal digital para os LEDs RGB endereçáveis. Parâmetros que caracterizam a iluminação poderão ser definidos e controlados, tal como o *duty-cycle* (tempos em que o led estará aceso ou apagado durante o dia), comprimento de onda (de acordo com acionamento e controle das cores de LED RGB) e intensidade (através da modulação da intensidade luminosa dos LEDs).

4.1.3 Analisador de gases

A fim de avaliar a eficiência e viabilidade do processo de redução da concentração de CO_2 em uma amostra gasosa proveniente do biodigestor, é necessário medir as concentrações dos gases contidos na mistura. Primeiramente, foram medidas as concentrações de metano e dióxido de carbono em amostras retiradas na saída do biodigestor, sendo posteriormente comparadas com medições

realizadas em amostras coletadas na saída do fotobiorreator em diferentes períodos de recirculação.

Um Kitassato com capacidade de 2L foi selecionado para acomodar as placas de prototipagem que conectam os sensores (Sensor SCD30 (CO_2), Sensor BMP280 (Pressão) e Sensor MQ-4 (Metano)) a um Arduino Nano. Considerando que o microcontrolador opera em 5V, foi utilizado um conversor de nível lógico para ajustar o sinal dos sensores digitais, que operam em 3,3 Volts, a essa tensão. Após a inserção de sílica gel no interior do recipiente para garantir um nível reduzido de umidade relativa do ar dentro do dispositivo, a placa de prototipagem foi posicionada e o bocal superior selado com uma rolha. O cabo de conexão do dispositivo de medição atravessa a rolha, com vedação assegurada por um prensa-cabos. A montagem resultante é apresentada na FIGURA 4.

FIGURA 4. Kitassato com sensores de análise de gás.

Fonte: Do autor (2024).

A presença de sílica gel no interior do dispositivo busca uma melhor resposta do sensor de metano, visto que a umidade relativa do ar afeta negativamente a sua sensibilidade de acordo com os dados do fabricante.

4.2 Definição dos Sensores

Diversos sensores foram adquiridos de acordo com a disponibilidade no mercado brasileiro, levando em consideração também o custo e métodos de

comunicação e conectividade com microcontroladores e dispositivos de aquisição de dados.

4.2.1 Sensor DS18B20 (Temperatura)

A principal variável monitorada e controlada no biodigestor é a temperatura interna, garantindo a condição de maior eficiência para a codigestão anaeróbia. Foram posicionados 3 sensores de temperatura no dispositivo, correspondendo a medição da temperatura da câmara interna, entrada e saída de água.

No fotobiorreator, realiza-se o monitoramento da temperatura do meio de cultivo de microalgas. Embora não haja um controle direto de temperatura nesse ambiente, é fundamental conhecer essa variável para correlacioná-la com as curvas de crescimento dos microrganismos. Dessa forma, é possível identificar as condições mais favoráveis para o desempenho dos organismos, além de permitir ajustes na intensidade luminosa caso haja detecção de aumento na temperatura. Para fins de monitoramento e comparação, um sensor de mesmo modelo foi fixado na estrutura metálica de suporte para medir a temperatura ambiente.

Ao todo, foram utilizadas 5 unidades do sensor DS18B20 com encapsulamento do tipo sonda que confere resistência a imersão completa, característica essencial para aplicação. A sua faixa de medição que vai de -55 a 125 °C possui acurácia de ± 0,5 °C entre -10 °C a +85 °C, abrangendo toda a faixa de operação do sistema com ótima precisão. Cada sensor possui um identificador único e permite que todos os pontos de medição compartilhem um único barramento de comunicação denominado 1-*Wire*, simplificando a montagem, passagem de cabos e integração com o dispositivo registrador de dados. Com apenas 3 fios, sendo a alimentação 5 Volts, GND e sinal, não se faz necessário nenhum circuito de condicionamento de sinais e alimentação específica, o que torna a escolha desse sensor ainda mais assertiva para a aplicação.

Cada sensor é representado por um número de 1 a 5 e posicionado nos pontos referenciados, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1. Pontos monitorados por sensores de temperatura.

Sensor	Local monitorado
1	Câmara interna biodigestor
2	Ambiente
3	Água de entrada biodigestor
4	Água de saída biodigestor
5	Meio de cultivo fotobiorreator

Fonte: Do autor (2024)

4.2.2 Sensor ST100 (Turbidez)

O sensor ST100 (FIGURA 5) é um sensor analógico capaz de avaliar a quantidade de sólidos suspensos em um líquido por meio da interrupção de um feixe infravermelho entre a haste transmissora e receptora, correlacionando a redução na transmitância luminosa com a presença de partículas suspensas em meio aquoso. A alimentação do sensor é de 5VDC e a saída é de 4.5V para um meio totalmente translúcido e 0 V para transmitância 0, de forma que o monitoramento desse sinal por um microcontrolador compatível permite que seja avaliada alterações na quantidade de partículas suspensas através de um sinal proporcional.

FIGURA 5. Sensor de turbidez ST-100.

Fonte: Do autor (2024)

Sabendo que uma maior quantidade de sólido suspenso no meio estudado é representada pelo desenvolvimento das microalgas, a análise do sinal desse sensor permite traçar uma estimativa do desenvolvimento dos microrganismos e até mesmo saber quais condições do proporcionam maior evolução da grandeza medida na mesma base de tempo.

4.2.3 Sensor SCD30 (CO_2)

O módulo sensor SCD30 mostrado na FIGURA 6, possui a tecnologia de medição através de luz infravermelha, detectando concentrações de dióxido de carbono garantindo precisão de ± 30 ppm entre 400 e 10.000 ppm e podendo realizar medições em valores que podem alcançar 40.000 ppm. A comunicação é proporcionada por uma interface digital I_2C que permite a associação de outros sensores no mesmo barramento de comunicação, simplificando a conexão e garantindo a interoperabilidade.

FIGURA 6. Sensor SCD30 de CO_2

Fonte: Do autor (2024)

Também está presente no mesmo módulo um sensor de temperatura e umidade utilizados nas rotinas de calibração interna do sensor. Levando em consideração que esse sensor estará posicionado dentro do reservatório analisador de gases, isso também permitirá o registro com precisão de ± 0,4 °C para temperaturas na faixa operacional, bem como ± 3 % para umidade.

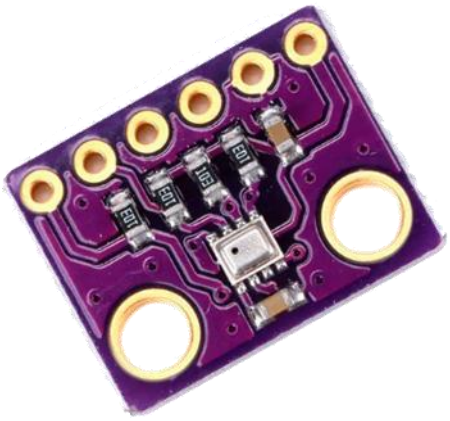
A tensão de alimentação desse sensor é de 3,3 VDC, de forma que um conversor de nível lógico será necessário caso se deseje um interfaceamento com microcontroladores que operam em 5 VDC, garantindo as tensões operacionais adequadas.

4.2.4 Sensor BMP280 (Pressão)

O BMP280 mostrado na FIGURA 7 é um sensor barométrico de alta precisão amplamente utilizado em aplicações que requerem precisão, baixo consumo de energia e capacidade de medir pressão e temperatura. Com uma faixa operacional de

pressão entre 300 hPa e 1100 hPa e uma faixa de temperatura entre -40 °C e +85 °C, a precisão do BMP280 é notável com um erro absoluto de ± 1 hPa para medições de pressão e ±1 °C para medições de temperatura (BOSCH SENSORTEC, 2020).

FIGURA 7. Sensor de pressão BMP280.



Fonte: Do autor (2024)

A estabilidade a longo prazo do BMP280 reduz a necessidade de recalibração frequente, característica essencial para um dispositivo confiável de aquisição de dados como o que foi desenvolvido neste projeto. Apesar do sensor oferecer dados de temperatura, estes foram desconsiderados frente a maior precisão absoluta do módulo SCD30.

O método de comunicação I_2C oferece flexibilidade na comunicação e integração com o barramento de comunicação de outros sensores, permitindo a comunicação com o microcontrolador utilizando apenas 2 fios. Assim como o SCD30, possui tensão nominal de trabalho por volta de 3,3VDC, também necessitando de um conversor de nível lógico caso seja conectado em microcontroladores 5VDC.

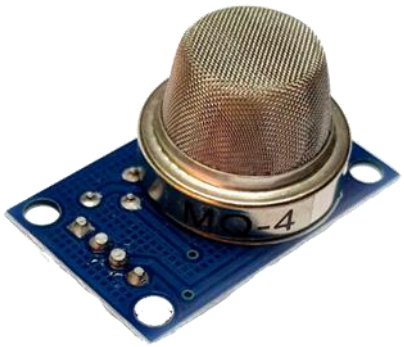
Ao ser aplicado no analisador de gases proposto, permite o monitoramento da quantidade injetada da amostra, permitindo a avaliação da repetibilidade em condições de mesma temperatura e pressão

4.2.5 Sensor MQ-4 (Metano)

A série de sensores MQ é composta por sensores eletroquímicos que possuem a capacidade de serem sensibilizados por determinados gases. O sensor MQ-4, mostrado na FIGURA 8 é responsável pela capacidade de detectar a presença de gás

metano em concentrações entre 200 a 10000 ppm em umidade relativa de até 65 % ± 5 %. Quanto menor a umidade relativa presente na amostra a ser analisada, maior será a acurácia desse sensor.

FIGURA 8. Sensor MQ-4 de gás metano.



Fonte: Do autor (2024)

O MQ-4 envia os valores de medição através de um sinal analógico, variado proporcionalmente à concentração de metano detectada e que pode ser interpretado pela leitura desse sinal em microcontroladores. Por ser alimentado com 5VDC, o sinal emitido será compatível com a faixa de trabalho e pode ser diretamente conectado em dispositivos como o Arduino Nano, por exemplo. Ao ser aplicado no analisador de gases, permite a quantificação do gás CH_4 na mistura avaliada.

4.3 Definição dos Parâmetros Iniciais

Simultaneamente à construção dos equipamentos e do sistema de monitoramento, foi realizada uma busca por parâmetros ideais ou otimizados disponíveis na literatura. Foram coletadas informações relevantes sobre os parâmetros relacionados a bactérias mesofílicas presentes no biodigestor, bem como sobre o cultivo de microalgas no fotobiorreator.

4.3.1 Parâmetros do Biodigestor

A digestão anaeróbia na maioria dos biorreatores ocorre nas temperaturas mesofílicas ou termofílicas, sendo respectivamente otimizadas em 37 °C e 55 °C respectivamente. Na TABELA 1, adaptada de Gerardi (2003), são listados alguns gêneros de bactérias metanogênicas mais comuns e suas respectivas temperaturas ótimas de operação metanogênica.

TABELA 1. Faixas de temperatura ótimas para diferentes gêneros de bactéria.

Faixa de temperatura	Gênero	Temperatura ótima (°C)
Mesofílica	Methanobacterium	37–45
	Methanobrevibacter	37–40
	Methanosphaera	35–40
	Methanolobus	35–40
	Methanococcus	35–40
	Methanosarcina	30–40
	Methanocorpusculum	30–40
	Methanoculleus	35–40
	Methanogenium	20–40
	Methanoplanus	30–40
	Methanospirillum	35–40
	Methanococcoides	30–35
	Methanolobus	35–40
	Methanohalophilus	35–45
Termofílica	Methanohalobium	50–55
	Methanosarcina	50–55

Fonte: Adaptado de Gerardi (2003).

A seleção de temperatura de trabalho do biodigestor considera que a maioria dos gêneros catalogados corresponde à faixa de temperatura ótima mesofílica, além de temperaturas mais baixas implicarem menor custo energético para o aquecimento do sistema. Visto que 37 °C é a menor temperatura incluindo 13 dos 14 gêneros mesofílicos analisados, esta foi definida como a temperatura interna do biodigestor.

4.3.2 Parâmetros do Fotobiorreator

Segundo Acién (2017), microalgas de água doce possuem temperatura ótima entre 25 e 35 °C, suportando temperaturas de até 40 °C por curtos períodos. Apesar do sistema proposto não possuir controle dessa grandeza, um sensor monitora a temperatura do meio de cultivo, além de realizar a redução da potência luminosa caso seja detectado aquecimento acima dos 30 °C.

Segundo Yan (2014), há uma relação significativa na proporção entre diferentes cores de iluminação observadas em estudos comparativos entre luz branca e diversas configurações que combinam luz azul e vermelha em distintas proporções. Tratamentos realizados com as razões de vermelho/azul nas proporções de 3:7, 5:5 e 7:3 demonstraram desempenho superior na melhoria da qualidade do biogás, por meio da redução de CO_2. Tomando como base essas definições, considerou-se como

parâmetro inicial para a operação experimental uma proporção de 50% entre luz azul e vermelha visto que Yan (2014) pontua essa relação como a melhor opção atendendo simultaneamente o maior estímulo de crescimento microalgal e redução de concentração de CO_2.

Acién (2017) cita que organismos foto-autotróficos interagem com as fontes com comprimento de onda entre 400 e 700 *nm*, representadas justamente pelas respectivas cores azul e vermelho. Suas observações se estendem também no que diz respeito a relação da intensidade luminosa com desenvolvimento das microalgas. Ao contrário do que se imaginaria, aumentar deliberadamente o fluxo luminoso não significa que a atividade fotossintética irá aumentar na mesma proporção, visto que com a *Chlorella sp.* ocorria a saturação entre 100 e 500 $\mu E.m^{-2}.s^{-1}$ e fotoinibição em irradiações acima de 1000 $\mu E.m^{-2}.s^{-1}$. Conhecer os limites operacionais da iluminação para colônias de microalgas permite ajustar a potência luminosa de forma eficiente. A luz não deve ser tão baixa que impeça o desenvolvimento ideal, nem tão alta, a ponto de promover fotoinibição, prejudicando o crescimento dos microrganismos e a eficiência energética do sistema.

Com relação ao pH, Zanetta (2018) cita o controle através da injeção de CO_2 para garantir a regulação do sistema em níveis entre 8,2 a 8,6 como um ponto importante, porém não foi considerado nesse trabalho em que o foco esteve no controle de estímulos luminosos. Espera-se obter a regulação do sistema através da injeção de biogás bruto que contém dióxido de carbono em sua composição.

É relevante destacar que, em sistemas voltados para o desenvolvimento de microalgas, especialmente na melhoria da qualidade do biogás por meio da redução da proporção de CO2, todos os autores consultados indicam o controle da luminosidade como a característica primordial para aumentar a eficiência do processo. Essa é seguida pelo controle da temperatura e do pH.

A microalga inoculada no cultivo foi a *Chrorella sp.*, selecionada de acordo com a disponibilidade, sua boa capacidade de captura de CO_2, bem como o uso da espécie em diversos estudos que avaliam o poder de melhoria de um biogás através da aplicação dessa cultura.

5 PREPARAÇÃO E DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Processos Químicos da Escola Politécnica da PUC-Campinas ao longo do ano de 2024. Essa seção trata de toda a preparação do material utilizado em cada dispositivo durante o processo

5.1 (Co)digestão anaeróbia (biodigestor)

No processo de (co)digestão anaeróbia, foi utilizado como substrato amostras de dejeto suíno e alimentos impróprios para consumo. O substrato alimentar foi composto por quatro tipos de vegetais detalhados na TABELA 2. A proporção determinada busca alcançar a razão carbono/nitrogênio ideal para o início do processo

TABELA 2. Tipo e proporção de resíduos

Resíduo	Percentual na mistura (%)
Banana	35,0
Batata	45.0
Casca de Laranja	10,0
Maçã	10,0

Fonte: Do autor (2024)

A amostra alimentar foi triturada até se obter uma mistura homogênea composta por partículas de aproximadamente 4mm. Foram coletadas três amostras desses resíduos com cerca de 5 g cada, e submetidas a um processo de secagem em estufa a 65 °C por 48 horas, seguidas de secagem em mufla a 400 °C por 3 horas, com o objetivo de determinar a concentração de carbono, atestando então que a relação de carbono/nitrogênio correspondeu a 25:1, dentro da faixa ótima proposta por Karlsson, et al. (2014).

O inóculo utilizado foi obtido a partir de dejeto equino diluído em água destilada em proporção de 1:10 e condicionado em uma incubadora horizontal modelo *shaker* MA832/1, marca Marconi, à 37 °C e agitação de 70 rpm durante 3 semanas antes de ser alimentado no biodigestor.

Em mistura sob proporção de 2:1 entre resíduos de alimentos e dejetos suínos, o material orgânico foi adicionado na câmara do biodigestor juntamente com o inóculo no dia 13 de maio de 2024

FIGURA 9. Carga de material orgânico e inóculo no biodigestor

Fonte: Do autor (2024)

5.2 Cultivo de microalgas

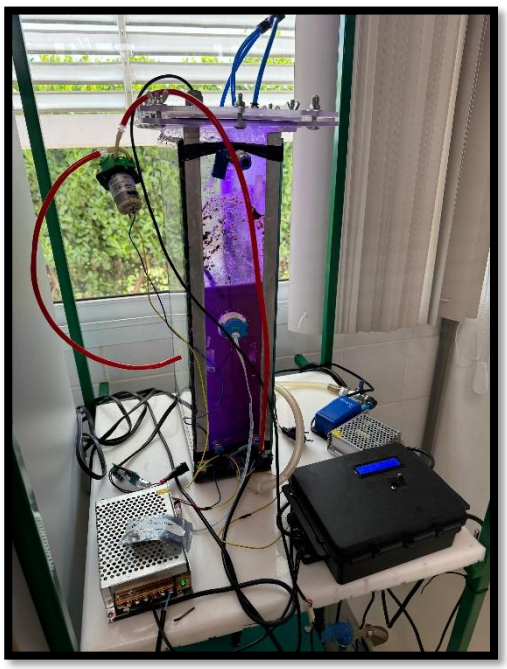
A microalga selecionada para o experimento foi a alga verde *Chlorella vulgaris*, conhecida pela alta capacidade de adsorção de CO_2, disponibilidade e de mesma família que os gêneros utilizados por autores como Yan e Zheng (2014).

Ao ser adquirida na forma liofilizada, foi então ativada e cultivada utilizando meio de cultivo sintético *Algae Culture Broth*, marca Millipore, em frascos Erlenmeyer contendo 150mL de meio sintético com a concentração de 1,87 grama de alga por litro de água. Após a preparação do meio, a proporção da alga utilizada foi de 0,6% (m/V).

O crescimento das microalgas nos Erlenmeyers ocorreu por um período de 30 dias à temperatura ambiente e sob luminosidade natural por cerca de 12 horas diárias. Após o período de crescimento, a solução contendo a biomassa microalgal foi adicionada ao fotobiorreator, juntamente com 4,5 Litros de meio de cultivo fresco e esterilizado.

Uma vez adicionadas as microalgas no fotobiorreator, ele passou a operar em ciclos de 12 horas diárias com os LEDs acionados a uma ração de 50% entre quantidade de azuis e vermelhos

FIGURA 10. Fotobiorreator em operação



Fonte: Do autor (2024)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Custo médio de montagem do analisador de gases

Visto que uma das propostas do projeto foi desenvolver um sistema de análise de gases de baixo custo, nessa etapa se registram os valores correspondentes de todos os componentes utilizados na construção do dispositivo. Os valores correspondem ao custo em reais no mercado brasileiro, adquiridos ao longo do ano de 2024.

TABELA 3. Custo de componentes do Analisador de Gases

ITEM	VALOR UNITÁRIO
Sensirion SCD-30 (CO2)	R$ 140,00
Sensor MQ-4 (CH4)	R$ 25,00
Bosch BMP280 (Pressão)	R$ 16,00
Arduino Nano	R$ 35,00
Kit 3x Mini Protoboard 170 pontos	R$ 20,00
Frasco Kitazato Vidro Boro 3.3 2000ml	R$ 85,00
Sílica Gel Azul 1kg	R$ 50,00
TOTAL	R$ 371,00

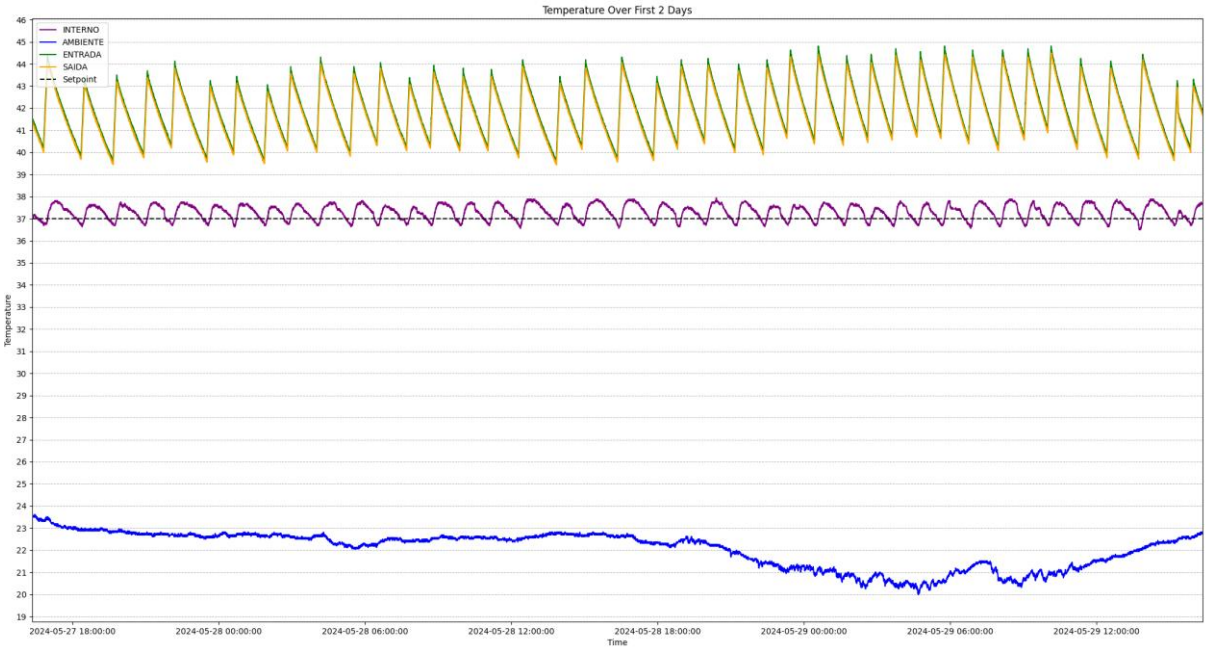
Fonte: Do Autor (2024)

Para fins de comparação e validação das medições, foi buscado no mercado e adquirido o Kit de Análise de Biogás da marca Alfakit, Código 3819. O manual técnico informa uma vida útil de até 100 testes com os insumos que acompanham o kit, em um valor total de R$1200.

6.2 Monitoramento e controle de temperatura

Na FIGURA 11 são apresentados os dados de temperatura coletados entre os dias 27 de maio de 2024 e 29 de maio de 2024, intervalo selecionado de acordo com a maior variação de temperatura ambiente dentre toda a operação. O sistema de monitoramento e controle realizou a leitura dos sensores a cada 10 segundos e o gráfico resultante mostra as temperaturas interna (Roxo), entrada (Verde) e saída (Amarelo) de água do biodigestor. A linha Azul representa a temperatura ambiente, com sensor fixado próximo ao equipamento.

FIGURA 11. Temperaturas interna, entrada e saída de água do biodigestor.



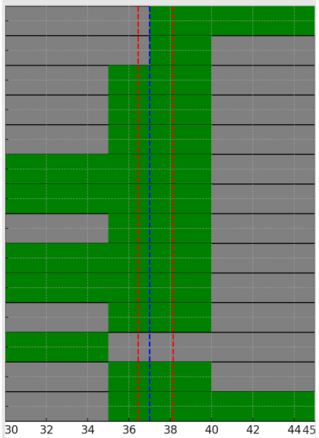
Fonte: Do autor (2024).

A temperatura interna foi definida com um *setpoint* de 37 °C, de forma que o pico de temperatura se deu em 38,13 °C e a menor temperatura sendo 36,44 °C. A variação da temperatura ambiente compreendeu a mínima de 19°C e máxima de 24°C. O perfil térmico interno demonstra que o sistema operou nas mesmas características independentemente das condições externas. É importante citar

também que, apesar da pequena variação da temperatura interna durante a operação, esta permaneceu a todo momento dentro da faixa de temperaturas descritas na TABELA 1, proposta por Gerardi (2003) e demonstrada na FIGURA 12. As linhas verticais tracejadas mostram a temperatura interna mínima e máxima registradas ao longo da aquisição de dados durante toda a operação do experimento.

FIGURA 12. Faixas de temperatura ótimas de acordo com Gerardi (2003).

Faixa	Gênero	T ótima (°C)
Mesofílica	*Methanobacterium*	37–45
	Methanobrevibacter	37–40
	Methanosphaera	35–40
	Methanolobus	35–40
	Methanococcus	35–40
	Methanosarcina	30–40
	Methanocorpusculum	30–40
	Methanoculleus	35–40
	Methanogenium	20–40
	Methanoplanus	30–40
	Methanospirillum	35–40
	Methanococcoides	30–35
	Methanolobus	35–40
	Methanohalophilus	35–45
Termofílica	*Methanohalobium*	50–55
	Methanosarcina	50–55



Fonte: Do autor (2024).

6.3 Análise gasosa por sensores de amostra bruta

No dia 4 de junho de 2024, 22 dias após o início da operação do biodigestor, uma amostra do conteúdo gasoso foi coletada utilizando uma bomba peristáltica e armazenada em uma bolsa (*bag*) para análise posterior. Parte dessa amostra foi injetada na entrada lateral do Kitassato com o uso de uma seringa, totalizando 20 mL, enquanto o analisador de gases realizava a leitura dos sensores. Os dados eram exibidos no terminal serial do computador a cada segundo. As leituras obtidas pelo dispositivo diretamente em ppm foram detalhadas na TABELA 4, correspondendo aos valores registrados após a estabilização, alcançada em um período de 2 minutos.

TABELA 4. Valores iniciais e finais da análise gasosa bruta.

	CO_2 (ppm)	CO2 (%)	CH_4 (ppm)	CH4 (%)
ENSAIO 1	1424	24,38	4417	75,62
ENSAIO 2	1490	24,87	4502	75,13
ENSAIO 3	1512	25,22	4483	74,78

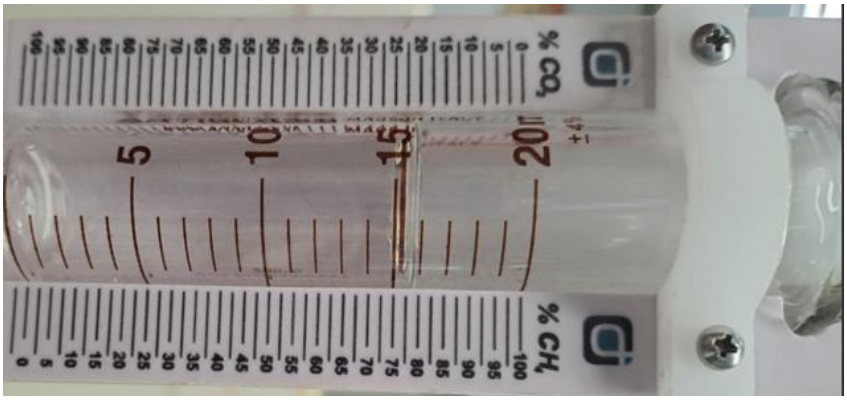
Fonte: Do autor (2024)

De acordo com os valores da TABELA 4, a proporção média entre os gases na amostra bruta é da ordem de 24,82% de CO_2 para 75,18% de CH_4. A presença de metano na amostra indica que está ocorrendo o processo de metanogênese no interior do biodigestor.

6.4 Análise gasosa por método Orsat da amostra bruta

A amostra bruta referida em 6.3, foi também analisada utilizando o método Orsat, através de kit de análise de biogás com biofoto, marca Alfakit. Ao seguir o procedimento indicado pelo manual de operação, o dispositivo de medição apresentou o resultado, conforme mostrado na FIGURA 13, indicando a relação de concentrações 25% de CO_2 e 75% de CH_4. O procedimento de análise foi realizado em duplicata, atestando a repetibilidade e trazendo o mesmo resultado.

FIGURA 13. Resultado de análise do gás bruto.



Fonte: Do autor (2024)

6.5 Análise gasosa por sensores de amostra purificada

A amostra bruta coletada conforme descrito no item 6.3 foi bombeada para o fotobiorreator por uma bomba peristáltica. Durante 30 minutos, a mesma bomba coletou o gás da parte superior do dispositivo e borbulhou no meio de cultivo com microalgas, formando um ciclo fechado.

Foi retirada a amostra do conteúdo gasoso do fotobiorreator utilizando a bomba peristáltica, armazenando em outra *bag* para posterior análise. De forma semelhante ao procedimento realizado com o gás bruto, uma parcela de 20 mL foi injetada no analisador de gases e os dados lidos pelo dispositivo foram transcritos na TABELA 5,

correspondendo aos valores após a estabilização alcançada em um tempo de 2 minutos.

De acordo com os valores da TABELA 5, a proporção média entre os gases na amostra purificada e avaliados em três ensaios é da ordem de 23,15% de CO_2 para 76,85% de CH_4, de forma que o processo de purificação executado durante 30 minutos proporcionou um *upgrade* médio na relação CO_2/CH_4 da ordem de 1,67%.

TABELA 5. Valores iniciais e finais da análise de biogás purificado.

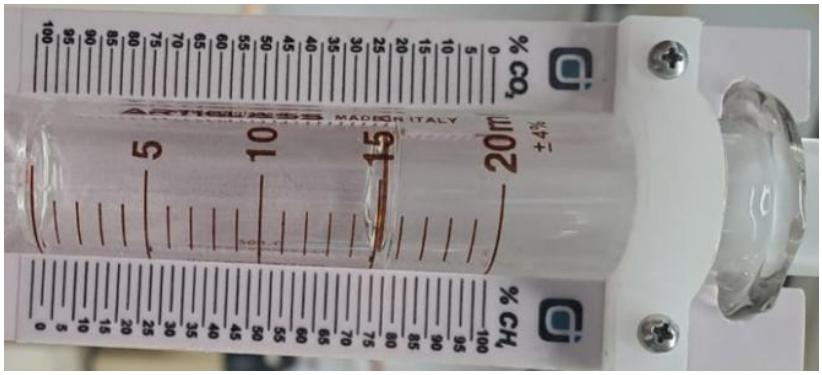
	CO2 (ppm)	CO2 (%)	CH4 (ppm)	CH4 (%)
ENSAIO 1	1067	22,81	3610	77,19
ENSAIO 2	1134	23,79	3632	76,21
ENSAIO 3	1048	22,85	3539	77,15

Fonte: Do autor (2024)

6.6 Análise gasosa por método Orsat de amostra purificada

A amostra purificada, conforme descrito no item 6.5, foi analisada também através do método Orsat seguindo as mesmas premissas descritas no item 6.4. O dispositivo de medição apresentou o resultado conforme mostrado na TABELA 5, indicando a relação de concentrações 25% de CO_2 e 75% de CH_4. Vale destacar que o posicionamento do êmbolo estava deslocado em relação a medida anterior, indicando um favorecimento na concentração de CH_4. Ao levar em consideração que a resolução declarada do kit de análise ser de 2,5%, a redução média de 1,67% detectada na análise utilizando os o analisador de gases pode não ser totalmente quantificada por esse método.

FIGURA 14. Resultado de análise do biogás purificado.



Fonte: Do autor (2024).

7 CONCLUSÃO

Ao observar temperaturas ótimas para a metanogênese em 14 gêneros mesofílicos, definiu-se 37°C como o *setpoint* da temperatura no interior do biodigestor, compreendendo a temperatura dentro da faixa proposta para 13 deles.

Os resultados da análise gasosa indicam que está ocorrendo processo de metanogênese, enquanto os registros de temperatura mostram que o sistema está operando como o esperado no que se refere a estabilidade térmica.

O biogás bruto gerado no processo apresentou concentrações da ordem de 75% de CH_4 e 25% de CO_2 em média, o que demostra a capacidade de geração do dispositivo, bem como a necessidade e viabilidade da amostra ser purificada para um uso mais eficiente. Percebe-se que a relação de proporção entre os resíduos de alimentos especificados proporcionou uma mistura bruta gasosa com a maior concentração de CH_4 na faixa consideranda para um biogás *in-natura*.

A atuação do controle luminoso do fotobiorreator apresentou o comportamento esperado, atendendo os requisitos do projeto no controle da intensidade luminosa, horas de operação durante o dia e relação da quantidade de LEDs azuis e vermelhos

Ao comparar as relações entre CO_2 e CH_4 de amostras de biogás bruto com o conteúdo purificado no fotobiorreator, percebeu-se um favorecimento na concentração de CH_4 da ordem de 1,67%, de forma que a passagem da mistura gasosa pelo meio de cultivo de microalgas *Chrorella vulgaris* durante 30 minutos garantiu que uma parcela do CO_2 fosse capturada. Ao considerar o desvio máximo de 30ppm já calibrado e especificado pelo fabricante do sensor SCD-30, existe um desvio máximo de 0,25% na quantização desse gás, de forma que a parcela remanescente pode ser considerada como a fração de CH_4 da amostra com semelhante nível de confiança.

O estudo comparou o método de análise desenvolvido através da leitura de sensores de baixo custo com o ensaio através do método Orsat em um kit comercial da Alfakit. O objetivo da utilização de um kit comercial foi de realizar a comparação e validação dos dados lidos pelo analisador de gases proposto e construído, o que foi concluído com sucesso e atestou a validade e correspondência dos dados quando o objetivo é quantificar a relação entre CO_2 e CH_4 na amostra gasosa.

Levando em consideração a capacidade de purificação de microalgas, era esperado que a concentração de CO_2 se reduzisse, dando lugar ao proporcional aumento da concentração de CH_4, o que foi observado na análise Orsat com a alteração de posição do êmbolo entre uma análise e outra, favorecendo a concentração de CH_4. Ao aliar os resultados quantitativos proporcionados pelos sensores no analisador de gases desenvolvido, percebe-se que houve de fato a redução na concentração de CO_2, contudo, abaixo da escala de medição do kit de análise Alfakit. É possível afirmar então que um sistema de análise com os sensores propostos apresenta resultados satisfatórios e com melhor resolução do que o método Orsat.

A análise da amostra purificada se deu de maneira acelerada, levando em consideração o processamento de uma amostra de biogás bruta durante apenas 30 minutos. Devido ao método de construção do fotobiorreator e materiais selecionados, foram detectadas microfissuras que podem, a longo prazo, permitir o escape do conteúdo gasoso, o que limitou o tempo de operação.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalho futuro, é incentivado o aproveitamento dos dispositivos construídos de forma a se explorar diferentes cenários em busca de condições otimizadas de funcionamento. No caso do biodigestor, estimula-se o uso de materiais orgânicos distintos em diferentes condições de temperatura com ajuste dos parâmetros do controlador, buscando combinações que melhor favoreçam a metanogênese em quantidade global de biogás, bem como a relação bruta mais favorável entre dióxido de carbono e metano.

O fotobiorreator pode ser utilizado em experimentos que possam comparar as diferentes configurações de luminosidade com estudos específicos da microbiologia, coletando amostras e quantificando matéria orgânica. Diferentes espécies de microalgas podem ser avaliadas, buscando a que possua melhor resposta de crescimento populacional, sugerindo-se sempre correlacionar essa evolução com a adsorção de CO_2 apresentada, bem como a melhora na qualidade da amostra de biogás.

Por fim, o analisador de gases construído pode colaborar com pesquisas futuras, podendo eventualmente ser melhorado e modificado de maneira que se permita a análise contínua.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIÉN, F. G. et al. Photobioreactors for the production of microalgae. In: GONZALEZ-FERNANDEZ, Cristina; MUÑOZ, Raúl (Eds.). Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, 2017. p. 1-44. DOI: 10.1016/B978-0-08-101023-5.00001-7.

ALASWAD, A.; DASSISTI, Michele; PRESCOTT, T.; OLABI, Abdul Ghani. Technologies and developments of third generation biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, p. 1446-1460, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.058.

BLUNDEN, J.; BOYER, T. State of the Climate in 2021. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 103, p. S1-S465, 2022. DOI:10.1175/2022BAMSStateoftheClimate.1.

CAO, Song et al. Improving of lipid productivity of the oleaginous microalgae Chlorella pyrenoidosa via atmospheric and room temperature plasma (ARTP). Bioresource Technology, v. 244, Part 2, p. 1400-1406, 2017. ISSN 0960-8524.

DEMIRBAS, A. Biogas Production from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, v. 28, n. 12, p. 1127–1134, 2006. DOI: 10.1080/009083190910479.

DEMIRBAS, A. et al. Chemical analyses of shale gas and conventional natural gas. *Petroleum Science and Technology*, v. 36(27), p. 2268–2274, 2018. DOI: 10.1080/10916466.2018.1504070.

GERARDI, Michael H. Methane-forming Bacteria. In: SCHWARTZ, M. Principles of Electrodynamics. New York: Wiley, 2003. p. 17-29. ISBN 978-0471206934.

GUO P, ZHANG Y, ZHAO Y. Biocapture of CO_2 by Different Microalgal-Based Technologies for Biogas Upgrading and Simultaneous Biogas Slurry Purification under Various Light Intensities and Photoperiods. *Int J Environ Res Public Health*. V. 15(3), p.528, 2018. DOI:10.3390/ijerph15030528

HEFNER, M.; MARLAND, G. *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions: 1751-2020 CDIAC-FF*. Research Institute for Environment, Energy, and Economics, Appalachian State University, 2023. Disponível em: https://rieee.appstate.edu/projects-programs/cdiac. Acesso em: 10 mar. 2025.

KARLSSON, T. et al. Manual Básico do Biogás. Univates. Lajeado: Editora da Univate, Brazil, 2014.

MONLAU F. et al. New opportunities for agricultural digestate valorization: current situation and perspectives. *Energy Environ Sci*, v. 8, p.1–20, 2015.

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N., BOETTNER, D. D., & BAILEY, M. B. (2018). Fundamentos da termodinâmica de engenharia. John Wiley & Filhos.

SAFARI, F., DINCER, I. Development and analysis of a novel biomass-based integrated system for multigeneration with hydrogen production. *International Journal Hydrogen Energy*, v. 44(7), p. 3511-3526, 2019.

SRINUANPAN, S., CHEIRSILP, B., BOONSAWANG, P., PRASERTSAN, P. Immobilized oleaginous microalgae as effective two-phase purify unit for biogas and anaerobic digester effluent coupling with lipid production. *Bioresour Technol*, v. 281, p. 149–157, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.02.085

VAZ B. D. S., COSTA J.A.V., MORAIS M.G. Innovative nanofiber technology to improve carbon dioxide biofixation in microalgae cultivation. *Bioresource Technology,* v. 273, p. 592–598, 2019.

YAN, C., ZHENG, Z. Performance of mixed LED light wavelengths on biogas upgrade and biogas fluid removal by microalga Chlorella sp. *Applied Energy*, v. 113, p. 1008-1014, 2014. ISSN 0306-2619. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.07.012

ZANETTA, M. D.L. Desenvolvimento de fotobiorreatores tipo Flat Panel para o cultivo superintensivo de microalgas, 2018. 58 p.