

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS  
ESCOLA POLITECNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE  
INFRAESTRUTURA URBANA**

**AUGUSTO PAES VILLAS BÔAS**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE BIODIGESTOR E FOTOBIORREATOR PARA  
PRODUÇÃO E PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA CODIGESTÃO  
ANAERÓBIA**

**CAMPINAS  
2025**

**AUGUSTO PAES VILLAS BÔAS**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE BIODIGESTOR E FOTOBIORREATOR PARA  
PRODUÇÃO E PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA CODIGESTÃO  
ANAERÓBIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* 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.

Orientadora: Profa. Dra. Betânia Hoss Lunelli

**CAMPINAS  
2025**

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

Paes Villas Bôas, Augusto

Bundefinedp PROJETO E CONSTRUÇÃO DE BIODIGESTOR E  
FOTOBIORREATOR PARA PRODUÇÃO E PURIFICAÇÃO DE  
BIOGÁS A PARTIR DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA /  
Augusto Paes Villas Bôas. - Campinas: PUC-Campinas, 2025.

56 f.il.

Orientador: 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. Resíduos Orgânicos. 2. Microalgas. 3. Transição  
Energética. I. Hoss Lunelli, Betânia. II. Pontifícia Universidade  
Católica de Campinas. Escola Politécnica. Programa de Pós-  
graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.

**AUGUSTO PAES VILLAS BÔAS**

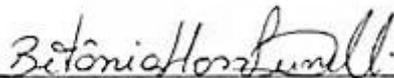
**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE BIODIGESTOR E  
FOTOBIORREATOR PARA PRODUÇÃO E  
PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA  
CODIGESTÃO ANAERÓBIA**

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.

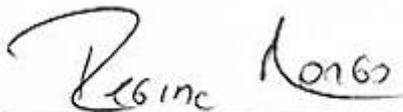
Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Betânia Hoss Lunelli

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



---

Profa. Dra. Betânia Hoss Lunelli  
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Profa. Dra. Regina Márcia Longo  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Documento assinado digitalmente

 DANIELA SILVA GOMES MOREIRA DO VALLE  
Data: 24/02/2025 14:43:22 -0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Dra. Daniela Silva Gomes Moreira do Valle  
CNPEM

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por permitir e me ajudar no estudo e dedicação a este trabalho.

Em segundo lugar à toda minha família, em especial minha esposa, Flávia, que sempre me apoia e me ajuda em TODOS os aspectos.

Em terceiro lugar, agradeço a minha orientadora, Profa. Betânia Hoss Lunelli, que em todos os momentos, me ajudou, amparou e motivou a sempre fazer mais, e não desistir frente aos obstáculos que num primeiro momento, eram imprevisíveis.

Em quarto e não menos importante, gostaria de agradecer duas empresas que, através de seu apoio, possibilitaram o prosseguimento desta pesquisa. A empresa de plásticos e polímeros Plásticos Rafard, do proprietário e amigo, Flávio Chiarion e da empresa de suinocultura Frigodeliss, do grupo Bressiani, proprietário e amigo Fábio Bressiani.

Agradeço imensamente a 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.

Pode-se resumir os resultados satisfatórios do trabalho como uma fusão de esforços, ensinamentos, experiências e sugestões adquiridas com todos os citados acima, fazendo jus à frase bem cunhada pela grande mente que este mundo pode presenciar, Isaac Newton:

*“...Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”*

## RESUMO

VILLAS BÔAS, A. P. **Projeto e construção de biodigestor e fotobiorreator para produção e purificação de biogás a partir da codigestão anaeróbia.** 2025. 54f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2025.

As emissões globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) têm aumentado de forma contínua e progressiva desde a revolução industrial. Nas últimas décadas, entretanto, o cenário de emissões só se agravou, passando de 9,34 milhões de toneladas em 1960 para 36,44 milhões de toneladas em 2019. A concentração crescente de CO<sub>2</sub> atmosférico é atribuída, principalmente, ao consumo e a queima dos combustíveis fósseis, os quais correspondem a mais de 80% da demanda mundial de energia primária. As emissões de gases de efeito estufa (GEE), porém, não se restringem somente ao CO<sub>2</sub>, tendo como principais gases constituintes, além do próprio CO<sub>2</sub> com 79% das emissões, o metano (CH<sub>4</sub>) com 11% e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) com 7%. A geração de energia renovável a partir de resíduos orgânicos contribui para a oferta de energia local, para a mitigação das emissões de GEE, além de gerar um produto de valor agregado. A digestão anaeróbia vem sendo apontada como uma solução bastante promissora, principalmente, por representar uma tecnologia com soluções conectadas as crescentes necessidades de desenvolvimento sustentável, uma vez que ela pode ser empregada tanto no tratamento de resíduos orgânicos urbanos quanto na produção de bioenergia como o biogás. No entanto, antes da sua utilização, o biogás bruto deve passar por um processo de purificação, onde o nível de purificação pode variar consideravelmente dependendo da aplicação desejada. Uma opção bastante interessante para a purificação do biogás pode ser através da captura fotossintética do carbono presente em sua composição por meio de microalgas, uma vez que elas são capazes de converter o CO<sub>2</sub> do biogás em biomassa celular através do processo de fotossíntese. Dentro desse contexto, o objetivo principal desse trabalho foi projetar e construir um biodigestor e um fotobiorreator para a produção e purificação de biogás, com sensoriamento em tempo integral para avaliação da qualidade do biogás produzido. O projeto dos equipamentos foi realizado com o auxílio de *softwares* como Inventor e CFD. Na sequência foi realizada a construção e a instrumentação do biodigestor e do fotobiorreator, para posterior uso na realização dos experimentos para a produção de biogás, a partir da codigestão anaeróbia de resíduos de alimentos e dejetos suínos, e sua purificação biológica com o uso de microalgas. Os resultados obtidos neste estudo demonstraram a viabilidade do processo de (co)digestão anaeróbia para a produção de biogás, utilizando resíduos de alimentos e dejetos suínos. Após 120 dias de reação, o biogás gerado apresentou uma concentração de 75,17% de CH<sub>4</sub> e 24,82% de CO<sub>2</sub>, evidenciando a eficácia do biodigestor construído. Além disso, foi possível verificar a importância da purificação do biogás, uma vez que a análise dos dados mostrou um aumento de 1,67% na concentração de CH<sub>4</sub> após 30 minutos de purificação utilizando microalgas.

**Palavras-chave:** Digestão anaeróbia, resíduos orgânicos, microalgas, captura fotossintética, transição energética, energia limpa.

## ABSTRACT

VILLAS BÔAS, A. P. **Design and construction of a biodigester and photobioreactor for the production and purification of biogas from anaerobic codigestion.** 2025. 54f. Dissertation (Master's), Stricto Sensu Post-graduation Program in Urban Infrastructure Systems, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2025.

Global carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions have steadily increased since the industrial revolution. However, the situation has worsened in recent decades, with emissions rising from 9.34 million metric tons in 1960 to 36.44 million metric tons in 2019. The growing concentration of atmospheric CO<sub>2</sub> is primarily attributed to the consumption and burning of fossil fuels, which account for more than 80% of the world's primary energy demand. However, greenhouse gas (GHG) emissions are not limited to CO<sub>2</sub> alone. The leading contributing gases include methane (CH<sub>4</sub>), which accounts for 11%; nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), which accounts for 7%; and CO<sub>2</sub>, which makes up 79% of total emissions. A potential strategy to reduce GHG emissions is generating renewable energy from organic waste. This approach contributes to local energy supplies, reduces GHG emissions, and generates value-added products. Anaerobic digestion—a process that breaks down organic matter without oxygen—has emerged as a potential solution. This method can treat urban organic waste and produce bioenergy, such as biogas. However, before biogas can be used, it must undergo a purification process, which can vary significantly depending on the desired application. An exciting method for purifying biogas involves the photosynthetic capture of CO<sub>2</sub> by microalgae. Microalgae can convert the CO<sub>2</sub> in biogas into cellular biomass through photosynthesis. In this context, the main objective of this work was to design and construct a biodigester and photobioreactor for the production and purification of biogas, with continuous monitoring to assess its quality. The equipment was designed using software such as Inventor and CFD. The biodigester and photobioreactor were then built, equipped with sensors, and prepared for experiments to produce biogas from the anaerobic (co)digestion of food waste and pig manure, followed by biological purification using microalgae. The results obtained in this study demonstrated the viability of the anaerobic (co)digestion process for biogas production, using food waste and pig manure. After 120 days of reaction, the biogas generated had a concentration of 75.17% CH<sub>4</sub> and 24.82% CO<sub>2</sub>, demonstrating the effectiveness of the biodigester built. In addition, it was possible to verify the importance of biogas purification, since data analysis showed a 1.67% increase in CH<sub>4</sub> concentration after 30 minutes of purification using microalgae.

**Keywords:** Anaerobic digestion, organic waste, microalgae, photosynthetic capture, energy transition, clean energy.

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 1.</b> CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS ABERTO E FECHADO. ....	25
<b>QUADRO 2.</b> CARACTERÍSTICAS DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA USADA PARA O AQUECIMENTO DO FLUIDO. ....	35

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1.</b> TIPO E QUANTIDADE DE RESÍDUOS.....	39
<b>TABELA 2.</b> PARÂMETROS OPERACIONAIS DO BIODIGESTOR.....	40
<b>TABELA 3.</b> COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS. ....	45
<b>TABELA 4.</b> COMPOSIÇÃO MÉDIA DO BIOGÁS.....	46
<b>TABELA 5.</b> COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS APÓS 30 MINUTOS DE PURIFICAÇÃO. ....	49
<b>TABELA 6.</b> COMPOSIÇÃO MÉDIA DO BIOGÁS APÓS PURIFICAÇÃO. ....	49

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> SISTEMAS ABERTOS DE CULTIVO DE MICROALGAS.....	22
<b>FIGURA 2.</b> FOTOBIORREATOR TUBULAR VERTICAL. ....	24
<b>FIGURA 3.</b> FOTOBIORREATOR TUBULAR HORIZONTAL. ....	26
<b>FIGURA 4.</b> FOTOBIORREATOR DE PLACA PLANA. ....	26
<b>FIGURA 5.</b> VISTA ISOMÉTRICA DO PROJETO DO BIODIGESTOR. ....	28
<b>FIGURA 6.</b> VISTA ISOMÉTRICA DO PROJETO DO FOTOBIORREATOR.....	29
<b>FIGURA 7.</b> CILINDRO DE PEAD USADO NA CONSTRUÇÃO DA CAMISA DO BIODIGESTOR. ....	30
<b>FIGURA 8.</b> FLANGES USADAS COMO BASE E TAMPA DO BIODIGESTOR.....	30
<b>FIGURA 9.</b> ADAPTADORES TIPO ESPIGÃO ACOPLADOS AO BIODIGESTOR.....	32
<b>FIGURA 10.</b> SENSOR DE TEMPERATURA ACOPLADO AO BIODIGESTOR. ....	33
<b>FIGURA 11.</b> SISTEMA DE HIDROAQUECIMENTO. ....	34
<b>FIGURA 12.</b> RESERVATÓRIO DE EXPANSÃO. ....	36
<b>FIGURA 13.</b> ALIMENTAÇÃO “BACKUP” FOTOBIORREATOR. ....	37
<b>FIGURA 14.</b> FOTOBIORREATOR COM TAMPA SENSORIZADA. ....	38
<b>FIGURA 15.</b> DEJETO EQUINO EM INCUBAÇÃO À 37 °C E 70 RPM.....	39
<b>FIGURA 16.</b> CULTIVO DE MICROALGAS EM ERLNMEYERS.....	41
<b>FIGURA 17.</b> KIT DE ANÁLISE DE BIOGÁS COM BIOFOTO.....	41
<b>FIGURA 18.</b> SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE RELÊS E MONITORAMENTO DE TEMPERATURA EM TEMPO REAL. ....	42
<b>FIGURA 19.</b> PERFIL DE TEMPERATURA NO BIODIGESTOR. ....	43
<b>FIGURA 20.</b> DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, FLUXO DE CALOR E PADRÕES DE PRESSÃO NO BIODIGESTOR SIMULADOS COM O SOFTWARE CFD. ....	44
<b>FIGURA 21.</b> COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS APÓS 60 E 120 DIAS DE (CO)DIGESTÃO. ....	45
<b>FIGURA 22.</b> COMPOSIÇÃO PERCENTUAL MÉDIA DO BIOGÁS APÓS 60 E 120 DIAS DE (CO)DIGESTÃO. ....	46
<b>FIGURA 23.</b> BIOFOTO USADO PARA QUANTIFICAR NH <sub>3</sub> E H <sub>2</sub> S PRESENTES NO BIOGÁS. ....	47
<b>FIGURA 24.</b> KIT USADO PARA QUANTIFICAR CH <sub>4</sub> E CO <sub>2</sub> PRESENTES NO BIOGÁS. ....	47
<b>FIGURA 25.</b> PERFIL DA CONCENTRAÇÃO DE BIOMASSA MICROALGAL AO LONGO DO TEMPO. .	48
<b>FIGURA 26.</b> COMPOSIÇÃO PERCENTUAL DO BIOGÁS APÓS PURIFICAÇÃO BIOLÓGICA. ....	49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	15
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	15
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	16
<b>3.1</b>	<b>Digestão Anaeróbia</b>	16
<b>3.2</b>	<b>Fatores que influenciam a digestão anaeróbia</b>	18
3.2.1	pH	18
3.2.2	Temperatura	18
3.2.3	Razão entre carbono e nitrogênio	19
3.2.4	Tempo de retenção hidráulica	19
3.2.5	Tamanho da partícula	20
<b>3.3</b>	<b>Biogás</b>	20
<b>3.4</b>	<b>Microalgas</b>	21
3.3.1	Sistemas de Cultivos	21
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	27
<b>4.1</b>	<b>Planejamento e Projeto</b>	27
<b>4.2</b>	<b>Construção dos Equipamentos</b>	29
4.2.1	Biodigestor	29
4.2.2	Reservatório de expansão	35
4.2.3	Fotobiorreator	36
<b>4.3</b>	<b>Desenvolvimento Experimental</b>	38
4.3.1	(Co)digestão anaeróbia	38
4.3.2	Cultivo de microalgas	40
4.3.3	Análise de biogás	41
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	42

<b>5.1 Sistema de controle e automação .....</b>	<b>42</b>
<b>5.2 Simulação da distribuição de temperatura no biodigestor .....</b>	<b>43</b>
<b>5.3 Produção e purificação do biogás .....</b>	<b>44</b>
<b>6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As emissões globais de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) têm aumentado de forma contínua e progressiva desde a revolução industrial na metade do século XVIII. Nas últimas décadas, entretanto, o cenário de emissões de  $\text{CO}_2$  só se agravou, passando de 9,34 milhões de toneladas em 1960 para 36,44 milhões de toneladas em 2019 (EPA, 2021; ONYEAKA et al., 2021). Em 2019, no Brasil foram emitidas cerca de 467,4 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2\text{eq}$ ), o que corresponde a 21 milhões de toneladas métricas de metano ( $\text{CH}_4$ ). Sendo o Brasil, portanto, o 5º maior emissor de  $\text{CH}_4$  do mundo, respondendo por 5,5% das emissões (SEEG, 2022). Entende-se hoje, de forma unânime, que a implementação e a adoção contínua de alternativas para a geração de energia limpa e renovável são fundamentais para assegurar o desenvolvimento sustentável das novas gerações.

A necessidade de desenvolver processos industriais renováveis e sustentáveis é um dos maiores desafios globais a ser enfrentado pela humanidade. Os processos tradicionais de produção são insustentáveis, utilizam matéria-prima não renovável e liberam grandes quantidades de gases de efeito estufa (GEE) e produtos tóxicos residuais para o meio ambiente (ARUN et al., 2020).

A (co)digestão anaeróbia vem sendo apontada como uma solução bastante promissora, principalmente, por representar uma tecnologia com soluções conectadas às crescentes necessidades de desenvolvimento sustentável, uma vez que ela pode ser empregada tanto no tratamento de resíduos urbanos (fração orgânica), agrícolas e agroindustriais quanto na produção de bioenergia, além de contribuir para redução das emissões de GEE e a disposição final de resíduos em aterros sanitários (WARD et al., 2008; GOLDEMBERG, 2009; ARAUJO, 2017; ANGELIDAKI et al., 2018; LI et al., 2020; CHEW et al., 2021). Como resultado do processo de (co)digestão anaeróbia, são gerados dois produtos principais: uma mistura gasosa, denominada biogás, composta principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ); e uma mistura líquida, o digestato, que contém matéria inorgânica e resíduos orgânicos não convertidos (ANGELIDAKI et al., 2018). Antes de ser utilizado, o biogás bruto deve passar por um processo de “upgrading” para aumentar a concentração de metano. O nível de purificação necessário pode variar consideravelmente, dependendo da aplicação desejada.

Uma opção bastante interessante para a purificação do biogás pode ser através da captura fotossintética do carbono presente em sua composição, realizada por microalgas e cianobactérias, que são capazes de converter o CO<sub>2</sub> em biomassa celular através do processo de fotossíntese (NAGARAJAN et al., 2019). Dentro deste contexto, esse trabalho teve como objetivo projetar e construir biorreatores em escala de bancada para a produção e purificação do biogás, a partir da codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos urbanos e agroindustriais. Buscou-se desenvolver um processo eficiente de produção e purificação, de modo que o biogás gerado possa ser utilizado como fonte de energia alternativa em diferentes aplicações, como energia elétrica e/ou térmica.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo principal do trabalho é projetar e construir um sistema de geração de biogás a partir da codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos urbanos e agroindustriais, e purificar esse biogás por meio do processo de fotossíntese realizado por microalgas cultivadas em sistema fechado.

### **2.2 Objetivos Específicos**

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

- Projetar e construir um biodigestor para produção de biogás a partir da codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos;
- Projetar e construir um fotobiorreator para cultivo de microalgas e purificação do biogás;
- Realizar experimentos para a produção de biogás a partir da codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos utilizando o biodigestor;
- Realizar experimentos para cultivo de microalgas e purificação biológica do biogás usando o fotobiorreator.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

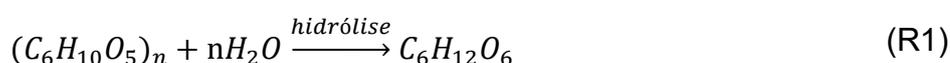
Dentre os vários problemas enfrentados pelo planeta nos últimos tempos, o aquecimento global se destaca, sendo intensificado pelos gases de efeito estufa. O CO<sub>2</sub> é um dos principais responsáveis por esse efeito, e sua emissão está diretamente ligada ao agravamento das mudanças climáticas. Uma das soluções promissoras para o tratamento do CO<sub>2</sub> é o uso de microalgas, que, por meio da fotossíntese, consomem o gás como fonte de alimento no processo de autonutrição. A seguir, será apresentada uma breve revisão sobre os tópicos mais relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

#### 3.1 Digestão Anaeróbia

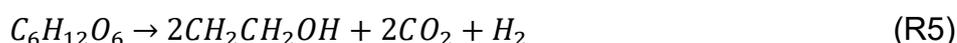
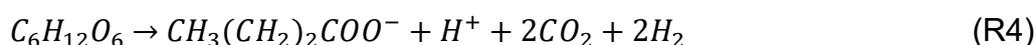
Cálculos estatísticos mostram que cerca de 50% dos resíduos municipais de todo o mundo são considerados resíduos orgânicos (XUE et al., 2017). Existem várias soluções para enfrentar tal situação, no entanto, uma solução que se mostra promissora é o tratamento dos resíduos através da digestão anaeróbia que apresenta vários benefícios em relação às outras existentes (EVANGELISTI et al., 2014; GAO et al., 2017). No que diz respeito às mudanças climáticas associadas às emissões de CO<sub>2</sub>, a digestão anaeróbia de resíduos se mostra eficiente, pois durante o processo bioquímico os nutrientes e a energia envolvida, podem ser recuperados, diferentes de processos como a queima (incineração), por exemplo, que o conteúdo energético é disperso (STYLES et al., 2022; XU et al., 2015).

A digestão anaeróbia, considerada um processo metabólico complexo, requer condições anaeróbias específicas para ocorrer. Além disso, está relacionada à atividade simultânea de microrganismos capazes de transformar material orgânico em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Esse processo consiste em reações bioquímicas que ocorrem em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

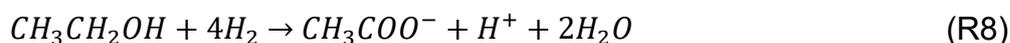
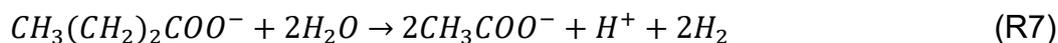
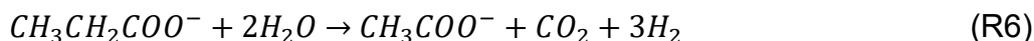
Na hidrólise ocorre a transformação da matéria orgânica complexa como carboidratos, proteínas e lipídios em produtos solúveis como açúcares, ácidos graxos e aminoácidos pelas bactérias hidrolíticas (R1) (ABBASI; TAUSEEF; ABBASI, 2011; GERARDI, 2003).



Na sequência, ocorre a etapa de acidogênese (R2 a R5) (KRISHNA; KALAMDHAD, 2014), onde os produtos solúveis da hidrólise são metabolizados no interior das células microbianas (bactérias acidogênicas) formando componentes intermediários, além de promover o surgimento e crescimento de novas células microbianas (GHOFRANI-ISFAHANI et al., 2020; CYSNEIROS et al., 2012; PHAM et al., 2012).



Os ácidos orgânicos produzidos durante a acidogênese são oxidados parcialmente na etapa de acetogênese, terceira etapa da digestão anaeróbia, formando hidrogênio, dióxido de carbono e acetato (R6 a R8) (CHERNICHARO, 2007).



Na última etapa, chamada de metanogênese, o hidrogênio e o acetato são convertidos em metano pelas bactérias metanogênicas (R9 e R10) (GHOFRANI-ISFAHANI et al., 2020; KRISHNA; KALAMDHAD, 2014).



Como resultado do processo de digestão anaeróbia, são gerados dois produtos principais: uma mistura gasosa, denominada biogás, composta principalmente por metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e vapor d'água (H<sub>2</sub>O); e uma mistura líquida, o digestato, que contém matéria inorgânica e resíduos orgânicos não convertidos.

O biogás deve ser purificado, isto é, tornar a fração de metano de sua composição maior que a inicial, para ser usado como um biocombustível e/ou em outras aplicações industriais (LINDFORS et al., 2022).

## 3.2 Fatores que influenciam a digestão anaeróbia

A eficiência do processo de (co)digestão anaeróbia, como qualquer processo biológico, depende de diversos fatores, como o potencial metabólico dos microrganismos presentes no meio, a biodegradabilidade dos substratos e as condições ambientais. Estes fatores determinam tanto a manutenção dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica quanto à conversão dos resíduos, a qual influencia diretamente a produção de biogás.

As espécies de microrganismos presentes no biodigestor variam conforme o tipo de resíduo, a fase da (co)digestão e as condições do meio. Isso ocorre porque os microrganismos exigem condições operacionais específicas para o seu desenvolvimento, incluindo o pH, a temperatura, a razão entre carbono e nitrogênio, o tempo de retenção hidráulica, o tamanho de partícula e as proporções dos substratos/resíduos, além do *design* do biorreator (KUO et al., 2017).

### 3.2.1 pH

O valor do pH é um importante indicador para a estabilidade e o desempenho do biorreator. O monitoramento do pH durante o processo de (co)digestão anaeróbia é essencial, pois o acúmulo de ácidos no biorreator pode ocorrer, o que, com o tempo, pode comprometer o funcionamento do sistema.

Os microrganismos envolvidos no processo de (co)digestão anaeróbia apresentam diferentes valores ideais de pH. Segundo Nayono (2009), a metanogênese ocorre de forma mais eficiente quando o pH é mantido próximo ao neutro. As bactérias anaeróbicas responsáveis pela produção de metano têm um desempenho otimizado quando o pH está entre 6,8 e 7,6, com a produção diminuindo caso o pH esteja fora desses valores. Para os microrganismos hidrolíticos e acidogênicos, o pH varia de 5,2 a 6,3 (YANG et al., 2015, LAY; LI; NOIKE, 1997).

### 3.2.2 Temperatura

A temperatura é um dos fatores que interfere na (co)digestão anaeróbia, já que os microrganismos envolvidos no processo são sensíveis a alterações bruscas e também liberam calor decorrente de suas atividades.

Os microrganismos podem ser classificados em quatro categorias principais, com base na temperatura ideal de crescimento: psicrófilos (< 15 °C), mesófilos (15 – 45 °C), termófilos (45 – 80 °C) e hipertermófilos (80 – 113 °C). No entanto, os

microrganismos utilizados na (co)digestão anaeróbia são mesófilos ou termófilos. Mata-Alvarez (2005) afirma que, para temperaturas termofílicas, o sistema oferece vantagens cinéticas, como maior produção de metano e remoção de patógenos. Contudo, esse regime torna o processo mais sensível a variações nos parâmetros e à presença de substâncias tóxicas, além de aumentar o consumo de energia (para aquecer o sistema). Segundo Kim et al. (2002), o uso de temperaturas elevadas é restrito, pois o biorreator tende a apresentar baixa estabilidade devido às altas concentrações de propionato. No entanto, o estudo concluiu que esse problema pode ser mitigado por meio do uso de consórcios microbianos específicos. Assim, entende-se que a escolha dos microrganismos mais adequados para o processo depende da faixa de temperatura em que se deseja operar.

### 3.2.3 Razão entre carbono e nitrogênio

Um fator muito importante para o processo de digestão anaeróbia é a razão entre carbono e nitrogênio (C/N). De acordo com Karlsson (2014), a proporção ideal de carbono e nitrogênio varia conforme o tipo de substrato e as condições do processo. No entanto, de maneira geral, para a produção eficiente de biogás, espera-se que a razão C/N esteja entre 20:1 e 30:1 no início do processo e entre 10:1 e 13:1 ao final. Quando a concentração de carbono excede os valores ideais ou quando os teores de nitrogênio são excessivamente elevados, resultando em liberação de amônia, a operação pode ser prejudicada pela inibição de microrganismos anaeróbios (KARLSSON, 2014).

Hartmann e Ahring (2006) afirmam que a biodegradabilidade e o rendimento na produção de biogás dependem da concentração de carboidratos, lipídios, proteínas, além de lignina, celulose e hemicelulose no substrato. O estudo também destaca que a razão C/N é determinada pela composição do resíduo orgânico. Se essa razão for muito alta (acima de 35), haverá falta de nitrogênio suficiente para gerar a massa bacteriana. Por outro lado, se for muito baixa (abaixo de 15), ocorrerá um aumento na concentração de amônia no reator, tornando o sistema tóxico para as bactérias.

Uma alternativa para contornar esse problema é realizar a codigestão anaeróbia, utilizando mais de um tipo de resíduo para alcançar a razão C/N ideal.

### 3.2.4 Tempo de retenção hidráulica

Segundo Zaher (2007), o tempo de retenção hidráulica (TRH) é uma medida utilizada para determinar o tempo necessário para que o substrato seja digerido. Para

os substratos secos, que apresentam uma porcentagem de sólidos superior a 20%, a média do TRH varia entre 14 e 30 dias. Já para os substratos molhados ou úmidos, com porcentagem de sólidos inferior a 20%, o TRH é cerca de 3 dias. Um TRH menor resulta em maior rendimento na produção por unidade de volume do reator, mas também em uma digestão mais reduzida do substrato, além de impactar a estabilidade do reator. O TRH também depende das características dos resíduos orgânicos e da temperatura do sistema.

### 3.2.5 Tamanho da partícula

Em relação à granulometria, é fundamental escolher partículas de tamanho adequado para otimizar a digestão anaeróbia. Quanto menores as partículas, melhor será a atividade metabólica dos microrganismos. No entanto, partículas extremamente pequenas, como as de pó, não são recomendadas, pois podem favorecer a formação de grumos ou tornar a mistura no digestor pastosa. A granulometria ideal para o processo varia entre 1 e 4 mm (MONTALVO et al., 2017).

## 3.3 Biogás

Sendo o produto de combinações de reações bioquímicas, também conhecido como digestão anaeróbia, o biogás é um gás com composição variável, constituído principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) de 50% a 70%, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de 30% a 50%. As proporções dos componentes estão diretamente relacionadas a natureza do resíduo que é alimentado no biorreator bem como o potencial hidrogeniônico (pH) do ambiente interno do equipamento (ANGELIDAKI et al., 2018).

De toda a composição do biogás, o interesse maior se dá no gás comburente metano, enquanto os demais componentes podem ser considerados poluentes. A capacidade calorífica do  $\text{CH}_4$  quando queimado, em sua forma pura, é descrita pelo Potencial Calorífico Inferior (PCI), sendo de 50,4 MJ/kg ou 36 MJ/m<sup>3</sup> de  $\text{CH}_4$  em condições normais de temperatura e pressão (CNTP). À medida que outros gases ocupam maiores porcentagens na composição, o poder calorífico do biogás é afetado negativamente. Em uma amostra hipotética de biogás, com porcentagens estequiométricas entre 60% e 65%, o poder calorífico do biogás é em torno de 20 a 25 MJ/m<sup>3</sup>. Dois outros componentes identificados em algumas amostras de biogás são o  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{NH}_3$ . Esses compostos, além de reduzir o desempenho energético do biogás, causam corrosão em peças metálicas devido à formação de dióxido de

enxofre (SO<sub>2</sub>), resultante da conversão do sulfeto de hidrogênio (ABATZOGLOU; BOIVIN, 2009).

### **3.4 Microalgas**

Atualmente, as microalgas representam uma alternativa promissora para a purificação do biogás, através da captura de CO<sub>2</sub>, além de se destacarem na geração de biocompostos (SHAREEFDEEN et al., 2023). Entre suas características desejáveis, as microalgas possuem algumas que despertam maiores interesses como, por exemplo, a biofixação de dióxido de carbono e o consumo de nutrientes indesejados no meio (TAGHAVIJELOUDAR et al., 2021). Além disso, elas produzem bioprodutos, como lipídios, carboidratos e proteínas, que são de interesse para diversos setores industriais (AZAM et al., 2022; SINGH et al., 2019). Em um curto período, o cultivo em massa dessas microalgas ganhou destaque como uma fonte geradora de bioprodutos de alto valor agregado e com um consumo energético inferior ao esperado comercialmente (SINGH et al., 2019). Nesse sentido, o desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias de cultivo, como o aumento da taxa de produção de biomassa em sistemas fechados, são essenciais para a continuidade desse processo (YAQOUBNEJAD et al., 2021; BANERJEE; RAMASWAMY, 2019; NWOBA et al., 2019).

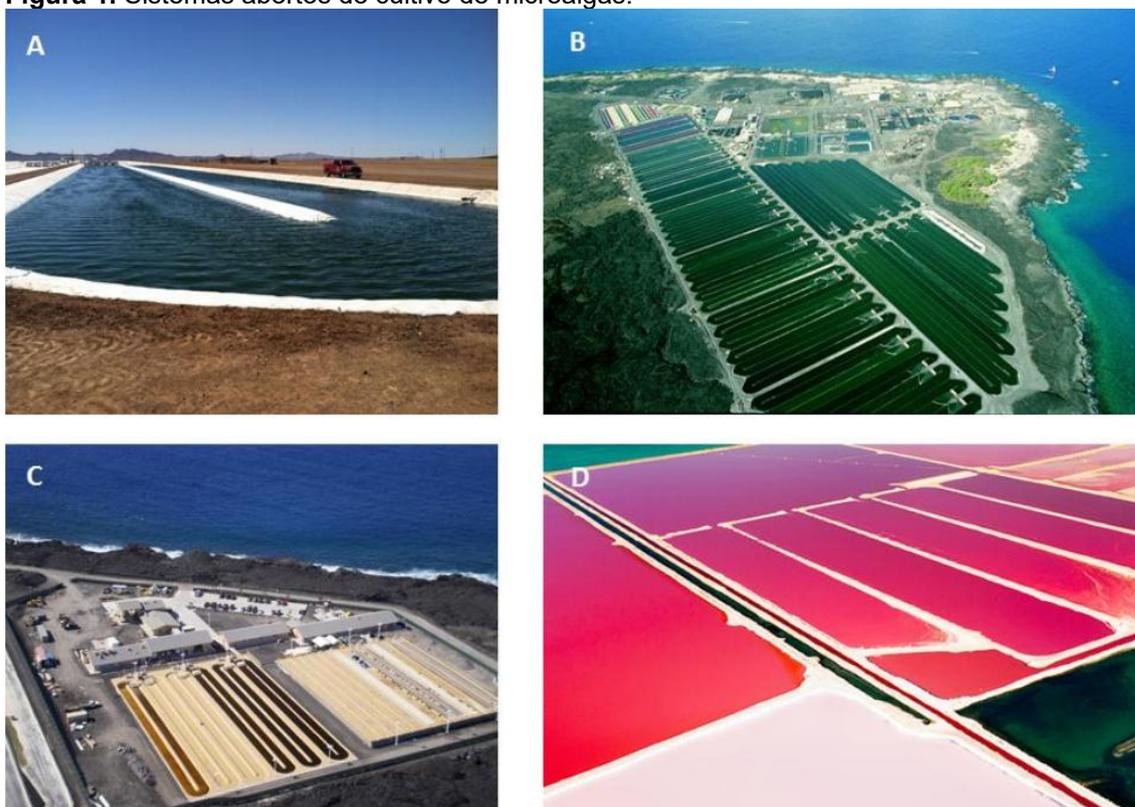
Três pré-requisitos iniciais, iluminação, umidade e nutrientes disponíveis para consumo são suficientes para o desenvolvimento de um grande grupo de microrganismos unicelulares que realizam a fotossíntese, as microalgas. Com clorofila e outros pigmentos fotossintéticos, as microalgas podem se desenvolver em ambientes fechados ou abertos, artificiais ou naturais, dependendo das condições específicas e das espécies (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2001; MULLER-FEUGA, 2000). Com uma aérea relativamente reduzida, as microalgas conseguem manter um crescimento e uma alta produtividade em diversos ambientes, especialmente quando comparadas a outros tipos de culturas. Majoritariamente aquáticas, as microalgas são fundamentais em muitas cadeias tróficas e têm sido amplamente estudadas na aquicultura, visando um melhor entendimento desse ecossistema e suas aplicações comerciais (CHISTI, 2007; DERNER, 2016).

#### **3.3.1 Sistemas de Cultivos**

O cultivo de microalgas pode ser feito de dois modos distintos em relação ao sistema de armazenamento. Pode ser fechado ou aberto e ainda pode ser instalado dentro ou fora de outros ambientes, (*indoor* ou *outdoor*) (OZKAN et al., 2012; VASUMATHI et al., 2012). Cada sistema é projetado e construído para um tipo ou grupo de algas e para uma finalidade específica, o que de certo modo, gera diferentes modelos com diferentes eficiências.

Na maior parte dos casos usa-se sistemas abertos de cultivo, assegurando baixa manutenção quando comparado com os outros e fácil implementação, haja vista que em ambientes abertos, grandes áreas estão disponíveis além da radiação UV proveniente do sol ser abundante (CHISTI, 2007). Na Figura 1 a seguir, são apresentadas algumas imagens de sistemas abertos.

**Figura 1.** Sistemas abertos de cultivo de microalgas.



Fonte: A – Sapphire Energy, Novo México (EUA) (2014); B – Cyanotech, Havaí (EUA) (2018); C – Cellana, Havaí (EUA) (2013); D – BASF, Hutt Lagoon (AUS) (2016).

Diferente do sistema aberto para a atmosfera, isto é, não permitindo a troca térmica e gasosa com o ambiente, os sistemas fechados de cultivo, que também são conhecidos por fotobiorreatores (PBR, sigla em inglês), foram projetados visando uma eficiência maior, superando os pontos negativos do sistema aberto.

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 específicas visando a otimização das condições vitais das algas, evitando contaminações e podendo cultivar espécies específicas (BAHADAR; KHAN, 2013; SIERRA et al., 2008).

Não existe um sistema padronizado ou otimizado para o cultivo de microalgas, pois cada espécie exige condições específicas. Assim, um tipo de cultivo pode ser inadequado para algumas espécies de microalgas, mesmo dentro de um campo de eficiência aceitável. Além disso, fatores como a localização espacial do sistema, a infraestrutura local e o fornecimento de energia também devem ser considerados na escolha do tipo de sistema.

Estudado em escala reduzida (escala laboratorial), o aperfeiçoamento fotobiorreatores foi realizado para diferentes tipos de microalgas, o que, para fins comerciais, se mostrou eficaz, apesar do alto custo dos componentes de construção e da implementação do sistema (TREDICI et al., 2010; POSTEN, 2009). Algumas características fundamentais se consolidaram quando se trata da produção de microalgas, tais como:

- Monitoramento e controle do pH, CO<sub>2</sub> e fontes de energia para microalgas;
- Monitoramento e controle da radiação UV e cores específicas para cada espécie;
- Controle da agitação para manter a homogeneidade na câmara de cultivo, evitando problemas como bioincrustações;
- Monitoramento dos fatores inerentes a fotossíntese das algas, com intuito de evitar saturação energética e/ou insuficiência de nutrição;
- Monitoramento e controle da população de microalgas condicionada a determinados volumes;
- Monitoramento 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, incluindo as específicas, que para serem cultivadas, exigem controle e atenção elevados. Com os estudos em escala menor, se torna possível a

transição de escala com maior segurança, até mesmo para o caso comercial (TREDICI et al., 2010; TREDICI, 2004). No Quadro 1 são apresentadas as principais características dos sistemas aberto e fechado.

Dentro do campo dos fotobiorreatores, sistemas fechados, podemos encontrar algumas classificações de acordo com os formatos e sistemas de funcionamento, como por exemplo:

#### l) Fotobiorreator Tubular Vertical

Usualmente feito em tubos de material transparente e posicionados perpendicularmente ao solo (de forma vertical), os tubos são preenchidos com microalgas (FIGURA 2) onde através dela percorre uma mistura gasosa que foi injetada nas partes inferiores do tubo, e através do empuxo, as bolhas de gases sobem em direção a superfície livre. O fato de ser cilíndrico e transparente, faz com que a iluminação natural seja uma boa opção, uma vez que em quase todas as direções estará com boa parte da superfície iluminada (ZHANG et al., 2013).

**Figura 2.** Fotobiorreator tubular vertical.



Fonte: Huo et al. (2018).

**Quadro 1.** Características dos sistemas aberto e fechado.

<b>Característica</b>	<b>Sistema Aberto</b>	<b>Sistema Fechado</b>
Necessidade de espaço	alto	baixo
Risco de contaminação (bactérias, protozoários etc.)	alto	baixo
Risco de contaminação com outras microalgas	alto	baixo
Perda de água por evaporação	alto	baixo
Investimento	baixo	alto
Presença de CO <sub>2</sub> no sistema	baixo	alto (injeção)
Risco de perda de CO <sub>2</sub>	alto	baixo
Saída de O <sub>2</sub> da cultura	troca natural	desgaseificação
Flexibilidade de produção	baixo	alto
Possibilidade de padronização	baixo	alto
Controle do processo	baixo	alto
Dependência das condições climáticas (outdoor)	alto	baixo
Volume de cultivo	alto	baixo
Produtividade	baixo	alto
Relação Superfície/Volume	baixo	alto
Risco de fotoinibição	alto	baixo
Necessidade de técnicas de iluminação	baixo	alto

Fonte: adaptado de Prokop et al. (2015).

## II) Fotobiorreator Tubular Horizontal

Muito semelhante aos fotobiorreatores tubulares verticais, os modelos que são posicionados horizontalmente (FIGURA 3) levam certa vantagem na questão de produtividade. Tudo justificado ao fato da luz solar, entrar perpendicularmente em sua superfície, o que de certa forma, todos os comprimentos de ondas são absorvidos.

Neste tipo de fotobiorreator, há a necessidade da presença de um trocador de calor, uma vez que toda matéria presente dentro dos tubos se movimenta através da convecção térmica gerada por zonas mais aquecidas que outras. Desta forma se faz necessário a redução de temperatura para fins de otimização e preservação das microalgas (SAWDON; PENG, 2015).

## III) Fotobiorreator de Placa Plana

Conhecidos pelo seu formato retangular em sua grande maioria, possui elevada área superficial, sendo usado na maior parte dos casos com iluminação artificial (LEDs), no entanto não se descarta a possibilidade da iluminação natural solar (SINGH; SHARMA, 2012).

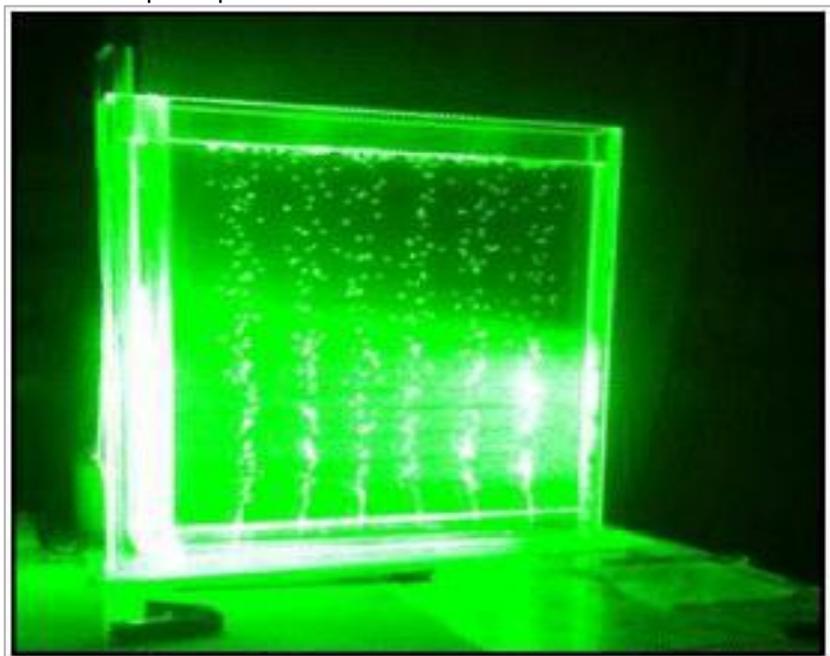
Ao longo do tempo, esse tipo de fotobiorreator sofreu inúmeras mudanças, todas elas visando a otimização no cultivo das microalgas. Uma delas, talvez a mais significativa tenha sido o uso de aeradores no fundo como dispersores dos gases utilizados. É desses gases quem vem a maior parte da energia para o sistema. (WANG; LAN; HORSMAN, 2012)

**Figura 3.** Fotobiorreator tubular horizontal.



Fonte: Slegers et al. (2013).

**Figura 4.** Fotobiorreator de placa plana.



Fonte: Yang et al. (2014).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Planejamento e Projeto

Para o projeto do biodigestor e do fotobiorreator foi utilizado o *software* Inventor da Autodesk®, o qual auxiliou na definição da geometria e dimensão ideal para a escala de bancada, bem como para a associação do sistema de produção (biodigestor) e purificação (fotobiorreator). Foi projetado um biodigestor encamisado com volume útil de 2L. Já para o fotobiorreator foi considerado um volume de 10L.

O biodigestor foi construído utilizando o PEAD (Polietileno de Alta Densidade). Esse composto polimérico apresenta uma estrutura molecular regular e estável, o que assegura produtos com melhores características em relação a outros polímeros do gênero, atendendo parâmetros de segurança de material e de projeto. O biodigestor terá compartimento para acondicionar o digestato produzido, além de um sistema de controle e monitoramento, tanto do substrato quanto da água que estará circulando ao redor do biodigestor com objetivo de manter a temperatura interna constante e estável, a fim de atingir a eficiência do processo de codigestão anaeróbia para produção de biogás.

No projeto do fotobiorreator diversos flanges de entrada/saída com sistema de engate rápido pneumático foram consideradas de forma a facilitar o acesso ao interior do equipamento, evitando vazamentos e permitindo que se retire pequenas amostras ou alimente material/insumos no meio de cultivo. Para a construção do equipamento foram utilizadas chapas planas de policarbonato de 5 mm.

O sistema de purificação do biogás foi realizado pela captura de CO<sub>2</sub> por microalgas, resultando em um biogás com maior concentração de metano. O biogás produzido foi alimentado na parte inferior do fotobiorreator e, por mecanismos de difusão e transporte, chegou ao topo onde foi coletado e analisado. Entradas auxiliares de alimentação e para sensoriamento foram colocadas em pontos estratégicos para causar o menor impacto possível no que diz respeito a fluidodinâmica do sistema. Sensores de temperatura e turbidez foram conectadas ao fotobiorreator, permitindo acompanhamento em tempo real da composição do biogás e de alguns parâmetros operacionais. Para aumentar a dispersão do biogás no meio de cultivo, favorecendo o aumento da área de contato das bolhas de gás com as microalgas presentes no fotobiorreator, foi instalado no fundo do equipamento um sistema de dispersão artificial de gases.

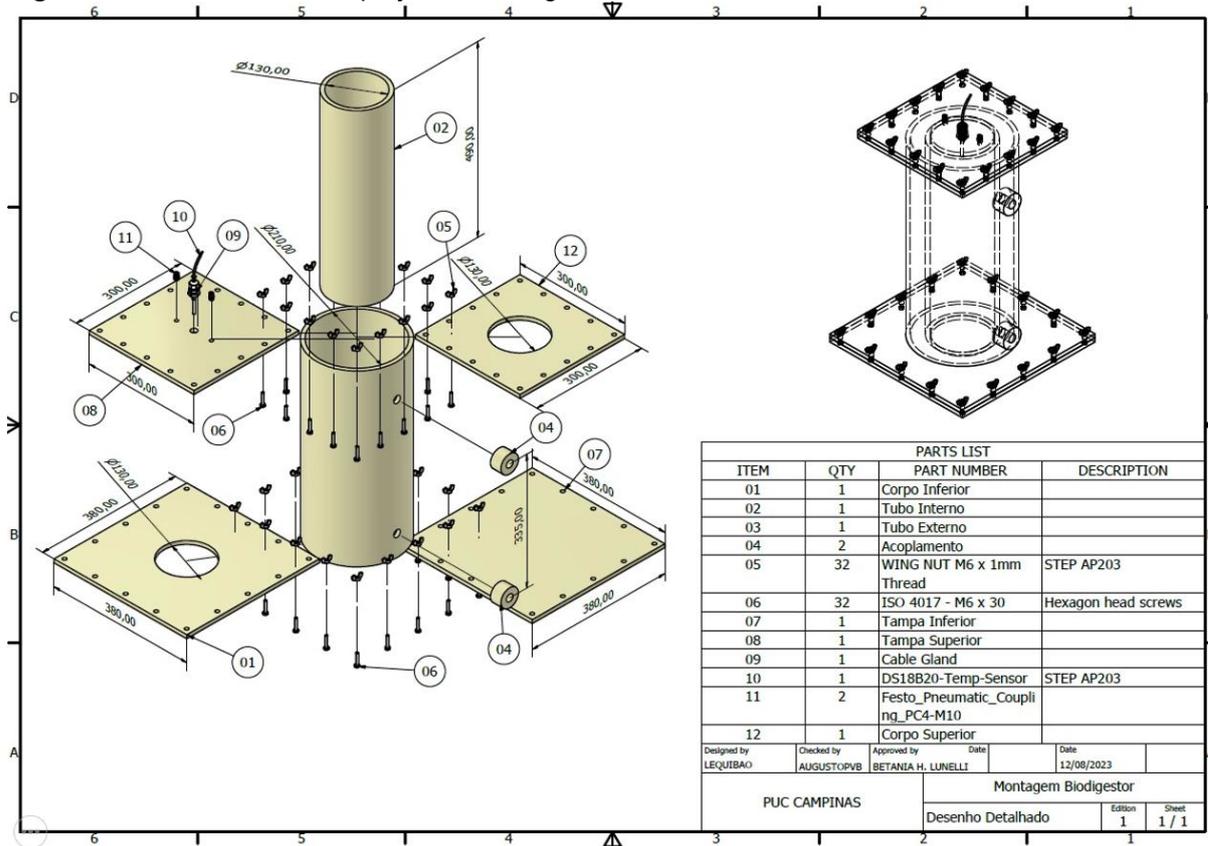
Com a finalização da construção da planta, foi realizada a produção de biogás através da codigestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, seguido da sua purificação.

Para avaliar a qualidade do produto e a quantidade de CO<sub>2</sub> fixada pelas microalgas, é necessário um controle contínuo do biogás alimentado e removido do fotobiorreator. A partir da composição do biogás foi avaliada a necessidade do uso de reciclo no processo.

Após o início de operação do sistema e de posse dos dados e análises feitas, foi realizada a otimização operacional do processo de produção e purificação.

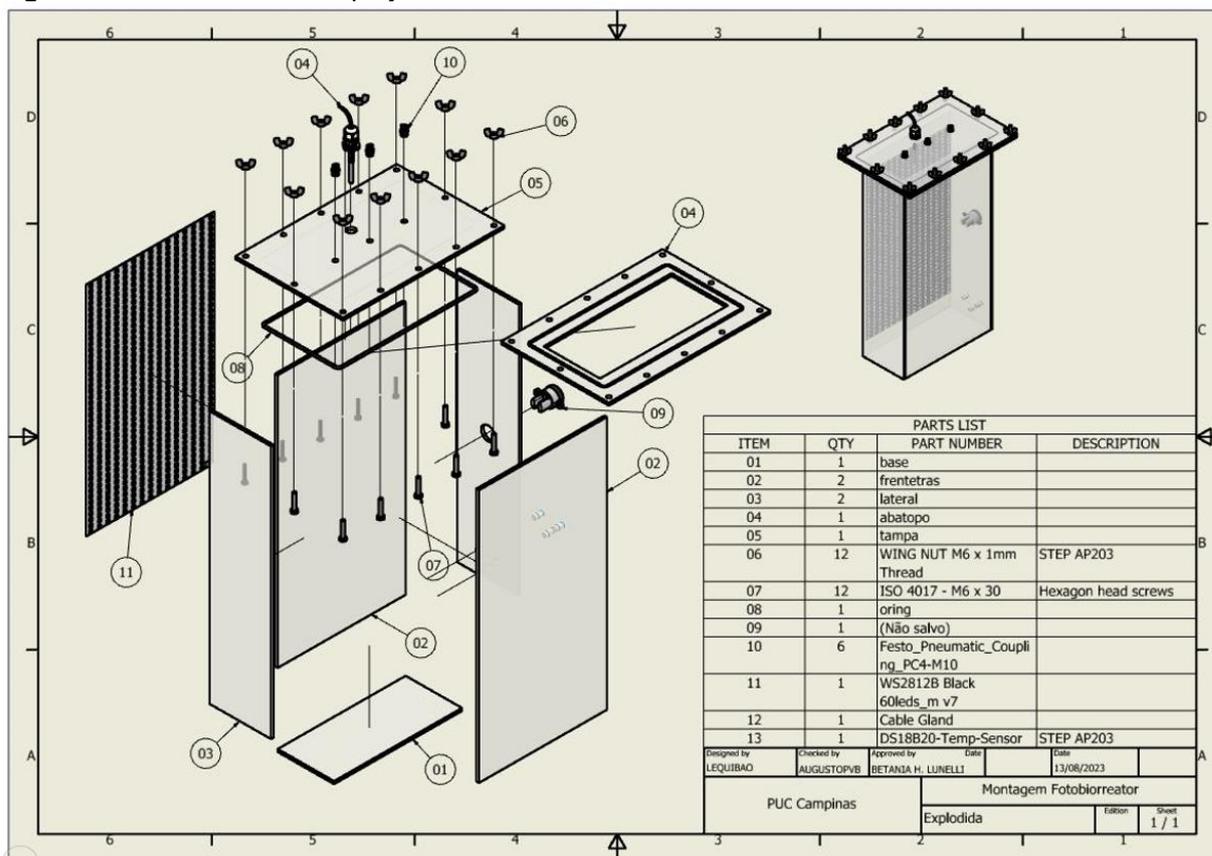
Nas Figuras 5 e 6 são mostrados os projetos do biodigestor e do fotobiorreator, respectivamente, desenvolvidos com o auxílio do *software* Inventor.

**Figura 5.** Vista isométrica do projeto do biodigestor.



Fonte: Autor (2024).

**Figura 6.** Vista isométrica do projeto do fotobiorreator.



Fonte: Autor (2024).

## 4.2 Construção dos Equipamentos

### 4.2.1 Biodigestor

Durante o planejamento e construção do biodigestor, a escala do equipamento foi definida a partir do espaço disponível no laboratório para sua instalação.

A escolha do material de construção passou por um critério de seleção definido pelo autor, onde houvesse a possibilidade de reciclagem do material quando o mesmo atingisse o final da vida útil, podendo desta forma ser reaproveitado em outros projetos e/ou fechando o ciclo de vida do produto. O PEAD (polietileno de alta densidade), que é um dos polímeros mais difundidos no mundo, foi escolhido pois apresenta uma estrutura molecular regular e estável, o que assegura produtos com melhores características em relação a outros polímeros do gênero.

O biodigestor possui formato cilíndrico, é mantido na posição vertical e soldado em duas flanges quadradas, que fazem o papel de base e tampa do equipamento simultaneamente. O cilindro e as flanges são mostrados nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

**Figura 7.** Cilindro de PEAD usado na construção da camisa do biodigestor.



Fonte: Autor (2024).

**Figura 8.** Flanges usadas como base e tampa do biodigestor.



Fonte: Autor (2024).

Os fechamentos, tanto inferior quanto o superior, onde foram colocados os coletores de gases, sensores e manômetro, foram usinados em plástico PP

(polipropileno) de 20 mm de espessura, em uma router CNC. Após a usinagem das duas tampas, a superior nas dimensões de 300 mm x 300 mm e a inferior 380 mm x 380 mm, foram realizados 32 furos com rosca milimétrica M8, 16 na tampa superior e 16 na tampa inferior. Todos foram roscados com parafusos banhados com revestimento galvanizado nas medidas de M8 x 60 mm. Os furos foram feitos em concordância com os furos do flange, de modo a serem do tipo “passante” e presos na face oposta por porcas do tipo borboletas rosqueáveis. Na parte inferior os parafusos foram passantes em furos do flange, e presos com arruelas e porcas do tipo “parlock” (não soltam com vibração e pressão excessiva).

Na parte superior, a tampa, com os sensores e mangueiras, passou por um novo processo de usinagem, desta vez interna, para a realização de um canal, que serviu de alojamento do anel do tipo *oring*, utilizado para melhorar a vedação, evitando vazamento de gás. No ato da montagem, utilizou-se silicone específico de sistemas de vácuo, para hidratar e manter a vedação sem cura, isto é, o silicone não seca. A fixação da tampa superior se deu por porcas do tipo borboleta, com a intenção de evitar o uso de chaves e melhorar o tempo de abertura, uma vez que para alimentar o biodigestor, a tampa superior deve ser removida.

O biodigestor construído, conta com um sistema de dois cilindros verticais concêntricos, o que gerou um espaço entre o cilindro de PEAD interno e o cilindro de PEAD externo. Este espaço será preenchido por água em determinada temperatura que será bombeada e aquecida externamente e controlado via microprocessador inteligente. A circulação de água faz-se necessária para o aumento da temperatura interna, onde ocorrerá a (co)digestão anaeróbia sendo ela um dos fatores a serem analisados no trabalho.

O volume de água que dinamicamente permanecerá dentro do equipamento é de 4 L. Na entrada e saída foram feitas roscas cônicas, de padrão NPT (National Pipe Thread), que segue as normas ANSI B1. 20.1 e NBR 12912, além de se adequar melhor a tubos e conexões dentro da norma NBR 5590 e seus diâmetros específicos. Após isso foram utilizados adaptadores do tipo “espigão” para converter a medida de  $\frac{3}{4}$ ” rosca para  $\frac{1}{2}$ ” mangueira, conforme mostrado na Figura 9, que será utilizada para conectar o sistema de bombeamento aquecido.

**Figura 9.** Adaptadores tipo espigão acoplados ao biodigestor.



Fonte: Autor (2024).

As associações de conexões de PVC com proteção térmica foram utilizadas e para acoplarem sensores de temperatura (FIGURA 10), tanto na entrada como na saída de água da camisa do biodigestor. O sistema será controlado por lógica de programação, utilizando o menor tempo de resposta possível tecnicamente para o controlador acionar o relê que manterá a água aquecida na temperatura correta para favorecer a reação de (co)digestão anaeróbia interna ao equipamento, já considerando o processo de transferência de calor através das paredes bem como perdas para o ambiente.

**Figura 10.** Sensor de temperatura acoplado ao biodigestor.



Fonte: Autor (2024).

#### 4.2.1.1 Sistema de hidroaquecimento

O sistema de aquecimento do biodigestor construído para este projeto é baseado no hidroaquecimento, uma técnica que consiste no aquecimento ou resfriamento do conteúdo interno do biodigestor por meio da transferência de energia através de um fluido que circula por uma camisa. Essa camisa é formada por um espaço vago entre dois cilindros de tamanhos diferentes e concêntricos, com entrada inferior e saída superior para o fluido.

No contexto deste projeto, duas justificativas para a escolha dessa técnica são evidentes. A primeira é a integração energética, que otimiza o aproveitamento de energia. A segunda é a facilidade de utilizar fontes renováveis e/ou sustentáveis para alimentar o sistema.

A integração energética oferece flexibilidade ao sistema de hidroaquecimento, tornando-o facilmente adaptável a uma infraestrutura urbana já existente. Isso significa que podemos aproveitar a energia do fluido que, normalmente, seria usado para outros fins ou até mesmo descartado. Para otimizar o sistema, é possível implementar um sistema de controle e automação que gerencie o fluxo, a vazão e as temperaturas, o que reduziria custos e melhoraria a eficiência energética. Caso não seja possível integrar o sistema de água aquecida a uma infraestrutura já existente, a economia e a sustentabilidade também justificam a escolha do hidroaquecimento. Durante o dia, podemos substituir o aquecimento elétrico pelo aquecimento heliotérmico, aproveitando fontes de energia mais limpas. Mais uma vez, um sistema de controle preciso garantiria o melhor desempenho do fluido circulante. A seguir, serão apresentados esquemas das duas possibilidades, tanto separadas quanto associadas em paralelo.

O sistema de hidroaquecimento conta com um tanque de armazenamento de água com capacidade para 40 litros, no entanto o volume total de água utilizado no sistema para a manutenção da temperatura é de aproximadamente 25 litros (~62,5% do total como margem de segurança) como mostrado na Figura 11.

**Figura 11.** Sistema de hidroaquecimento.



Fonte: Autor (2024).

Para aquecer o fluido, foi utilizada uma resistência elétrica do tipo imersiva, cujas características estão apresentadas no Quadro 2 a seguir.

**Quadro 2.** Características da resistência elétrica usada para o aquecimento do fluido.

Potência	1000 W
Tensão	220 V
Corrente	8,5 A
Frequência	60 Hz

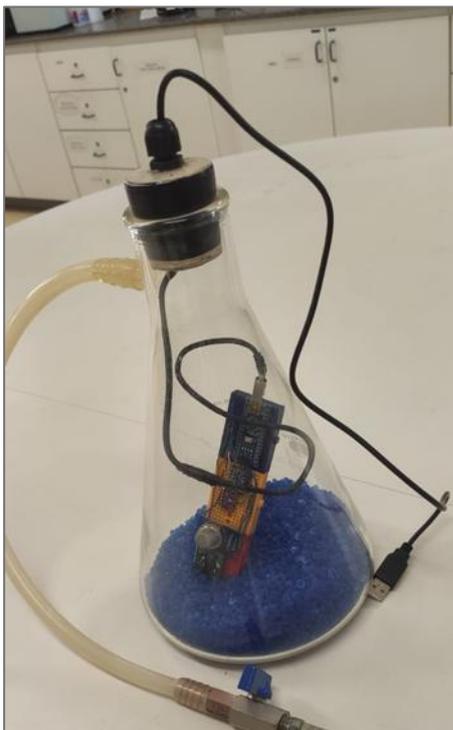
O aquecedor é acionado por um relê, que recebe o comando com base em uma lógica de manutenção da temperatura interna do biodigestor. Essa temperatura é a principal variável, garantindo que os ajustes e variações sejam realizados exclusivamente para atender à configuração interna do equipamento.

#### 4.2.2 Reservatório de expansão

Com o objetivo de obter um volume de controle preciso, permitindo calcular a quantidade de gás injetada e sua diluição, foi criado um sistema denominado reservatório de expansão. Para a construção deste equipamento, utilizou-se um *Kitassato* de 2 litros, com entrada lateral para sistemas de vácuo. Neste trabalho, essa entrada lateral será usada para a inserção do biogás no interior do recipiente.

O sistema conta com sensores de metano (CH<sub>4</sub>), modelo MQ-4, e de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), modelo MG-812, que estão acoplados a uma protoboard e posicionados sobre uma camada de sílica gel. Na Figura 12, é mostrado o equipamento, com os sensores internos, mangueiras de acoplamento e válvulas de esfera de ¼ de volta, que permitem o estancamento rápido da vazão gasosa. Quando o equipamento é fechado com a tampa e os registros impedem o fluxo, o sistema se torna hermético, aprisionando o gás em seu interior e garantindo que os sensores e a sílica gel, responsáveis pela absorção de umidade, aumentem a acurácia dos sensores.

**Figura 12.** Reservatório de expansão.



Fonte: Autor (2024).

#### 4.2.3 Fotobiorreator

Para a construção do fotobiorreator foi utilizado policarbonato. As paredes foram colocadas no esquadro, coladas e deixadas até o tempo limite para manuseio. Em seguida, iniciou-se o processo de furação e rosqueamento das placas laterais de policarbonato, utilizando broca de 3/8" no padrão de rosca BSP. Foram feitas entradas para o biogás, para o fornecimento de O<sub>2</sub> de alimentação backup externa e, também, para CO<sub>2</sub>, que serve como *backup* caso a concentração de biogás não seja suficiente. Esse sistema garante a manutenção das microalgas cultivadas no interior do fotobiorreator. Os furos e flanges foram fixados nas laterais do equipamento, conforme mostrado na Figura 13.

Foi feito um furo lateral de 25 mm de diâmetro para acoplar o sensor de turbidez, responsável por capturar dados sobre a turbidez do ambiente líquido, que, por correlação direta, está associado à população de microalgas presentes no sistema fechado.

Durante o cultivo das microalgas, o sistema permanecerá aberto, com alimentação e agitação por borbulhamento de ar atmosférico. Quando o processo de "*biopurificação*" for iniciado, uma tampa sensoriada será posicionada e fixada na parte

superior, tornando o sistema um reservatório hermético. Nesse estado, o biogás circulará com o auxílio de uma bomba peristáltica, sendo coletado na parte superior e injetado na inferior para o próximo ciclo de borbulhamento, conforme mostrado na Figura 14.

**Figura 13.** Alimentação “backup” fotobiorreator.



Fonte: Autor (2024).

O biogás será coletado pela saída tripla de ar posicionada na tampa, passará pela bomba peristáltica e seguirá pelo fluxo interno à mangueira de cor vermelha, que direciona para a parte inferior do equipamento. Por empuxo, as bolhas de biogás emergirão chegando à superfície, onde serão coletadas novamente. O processo se repetirá até que o sensor indique a concentração de metano esperada.

**Figura 14.** Fotobiorreator com tampa sensorizada.



Fonte: Autor (2024).

### **4.3 Desenvolvimento Experimental**

#### **4.3.1 (Co)digestão anaeróbia**

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Pesquisa da Faculdade de Química, da Escola Politécnica da PUC-Campinas. Para o processo de (co)digestão anaeróbia, foram utilizados como substratos dejetos suínos e alimentos não apropriados para consumo. O substrato alimentar foi composto por quatro tipos de vegetais, conforme detalhado na Tabela 1. A escolha desses alimentos e suas respectivas proporções foi para se alcançar uma razão entre carbono e nitrogênio de aproximadamente 25:1.

Os resíduos de alimentos foram triturados até obter uma amostra homogênea, com partículas de aproximadamente 4 mm. Em seguida, foram coletadas três amostras desses resíduos, pesando cerca de 5 g cada, que foram submetidas a um

processo de secagem. Inicialmente, as amostras foram secas 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.

Os resíduos de alimentos triturados e os dejetos suínos foram alimentados diretamente no biodigestor, utilizando uma proporção de 2:1 entre os dois substratos.

**Tabela 1.** Tipo e quantidade de resíduos.

Resíduo	Percentual na mistura (%)
Banana	35,0
Batata	45,0
Casca de laranja	10,0
Maçã	10,0

Fonte: Autor (2024).

Dejeto equino foi utilizado como inóculo. Ele foi diluído em água destilada numa 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 (FIGURA 15).

**Figura 15.** Dejeto equino em incubação à 37 °C e 70 rpm.



Fonte: Autor (2024).

Após o período de incubação do inóculo, este foi alimentado no biodigestor, seguido da adição do substrato. O equipamento foi fechado, a temperatura ajustada à 37 °C e o processo de (co)digestão anaeróbia iniciado. O biodigestor permaneceu em operação durante 4 meses, funcionando 7 dias por semana, 24 horas por dia.

Na Tabela 2, a seguir, são apresentados os valores dos parâmetros operacionais do biodigestor.

**Tabela 2.** Parâmetros operacionais do biodigestor.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Volume útil (L)	2
Temperatura interna (°C)	37
Porcentagem de matéria orgânica (%)	94,18
Massa de resíduo (kg)	4,7
pH	7

Fonte: Autor (2024).

#### 4.3.2 Cultivo de microalgas

A espécie escolhida para o experimento foi *Chlorella vulgaris*, devido a sua alta capacidade de absorção de CO<sub>2</sub>, característica importante para a purificação do biogás. A microalga foi adquirida comercialmente na forma liofilizada, ativada e cultivada utilizando meio de cultivo sintético *Algae Culture Broth*, marca Millipore. O cultivo foi realizado em frascos Erlenmeyer contendo 150 mL do meio sintético, com a concentração de 1,87 g de alga por litro de água. As soluções com o meio de cultura foram preparadas em duplicata e autoclavadas. Após a preparação do meio, a proporção da alga utilizada foi de 0,6% (m/V). O crescimento das microalgas ocorreu por um período de aproximadamente 30 dias, à temperatura ambiente e sob luminosidade por cerca de 12 horas diárias (FIGURA 16). Amostras foram coletadas semanalmente para avaliação do crescimento microalgal.

Após o período de crescimento, as soluções contendo a biomassa microalgal foram adicionadas ao fotobiorreator. Antes da adição da biomassa, foram inseridos 4 litros de meio de cultivo fresco e esterilizado.

O crescimento celular da microalga foi monitorado por densidade óptica, utilizando um espectrofotômetro UV/Vis, marca Shimadzu, modelo UV-1800, nos comprimentos de onda de 680 nm e 750 nm. As amostras foram coletadas a cada 7 dias e, em ambos os ensaios, as amostras foram diluídas na proporção de 1:10 antes de cada leitura no espectrofotômetro. A concentração (g/L) foi determinada utilizando a equação (1) a seguir (KUSMAYADI et al., 2022).

$$B_M = 0,4112 \times OD_{nm} \quad (1)$$

Onde  $B_M$  é a biomassa microalgal (g/L);  $OD_{nm}$  é a densidade óptica (nm) no comprimento de onda a ser usado na análise.

**Figura 16.** Cultivo de microalgas em Erlenmeyers.



Fonte: Autor (2024).

#### 4.3.3 Análise de biogás

As composições do biogás produzido a partir da (co)digestão anaeróbia e coletado no topo do fotobiorreator foram determinadas utilizando o kit de análise de biogás com biofoto, marca Alfakit (FIGURA 17), e com os sensores de metano, modelo MQ-4, e de dióxido de carbono, modelo MG-812. O biogás foi coletado tanto do biodigestor quanto do fotobiorreator, utilizando balões de Tedlar, modelo Instrutherm, adequados para a coleta de gás.

**Figura 17.** kit de análise de biogás com biofoto.



Fonte: Alfakit, 2024.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Sistema de controle e automação

Finalizada a construção dos equipamentos, conforme descrição apresentada na seção 4 – Materiais e Métodos, um sistema de controle e automação (FIGURA 18) foi integrado ao biodigestor e ao fotobiorreator. Este sistema visa minimizar a intervenção humana, reduzindo assim possíveis erros e viabilizando o armazenamento dos dados coletados durante a operação, particularmente no que concerne às temperaturas e quantidades de acionamentos dos relês.

**Figura 18.** Sistema de controle e automação de relês e monitoramento de temperatura em tempo real.



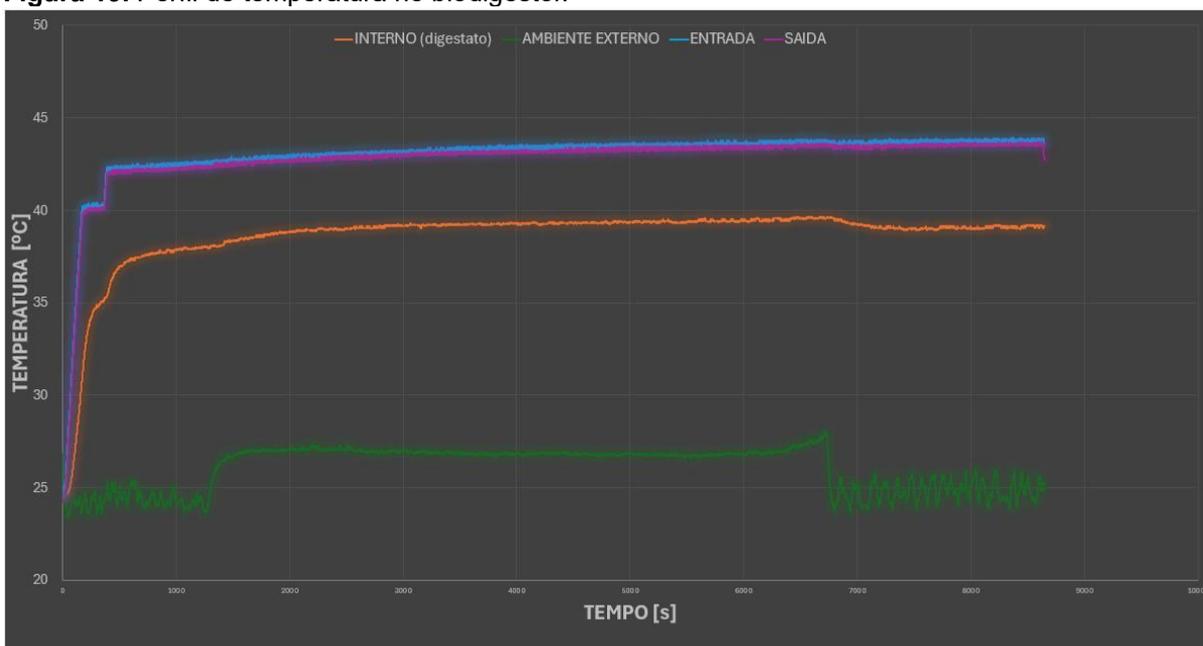
Fonte: Autor (2024).

Depois de acoplado o sistema de controle e automação ao biodigestor, foi realizada uma avaliação do perfil de temperatura na parte interna e externa do biodigestor, utilizando o sistema de hidroaquecimento. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 19.

Conforme ilustrado na Figura 19, as curvas das temperaturas de entrada e saída são muito semelhantes, garantindo que as temperaturas de entrada e saída se mantenham muito próximas. Essa característica reforça a qualidade do projeto, pois a troca térmica ocorre predominantemente com as paredes da camisa, transferindo-se conseqüentemente para a reação interna. Além disso, podemos considerar a temperatura como constante ao longo da camisa no sentido vertical, o que assegura maior homogeneidade.

A proximidade entre as temperaturas de entrada e saída se deve também ao fato de que a bomba utilizada no processo de circulação de fluido opera com uma vazão que pode alcançar até 800 litros por hora. Isso promove indiretamente a agitação do fluido, facilitando a troca térmica quando retorna ao reservatório de aquecimento, onde se encontra imersa a resistência elétrica.

**Figura 19.** Perfil de temperatura no biodigestor.



Fonte: Autor (2024).

Existe uma diferença de aproximadamente 5 °C entre a temperatura do fluido transferidor de energia e o interior da camisa onde se localiza o meio reacional. Essa diferença é importante porque possibilita a constância térmica da reação do material contido no interior do biodigestor, permitindo um tempo maior para intervenção de segurança em casos de surtos termais externos. Embora a relação entre a temperatura interna do biodigestor e sistema de aquecimento não seja linear, o delta de temperatura facilita o controle da temperatura interna, possibilitando um ajuste gradativo.

O meio externo sofreu diferentes tipos de perturbações durante os testes e, mesmo diante da instabilidade, o sistema de hidroaquecimento assegurou sua constância, garantindo de certo modo a manutenção térmica interior do biodigestor para que a reação de codigestão anaeróbia não fosse afetada.

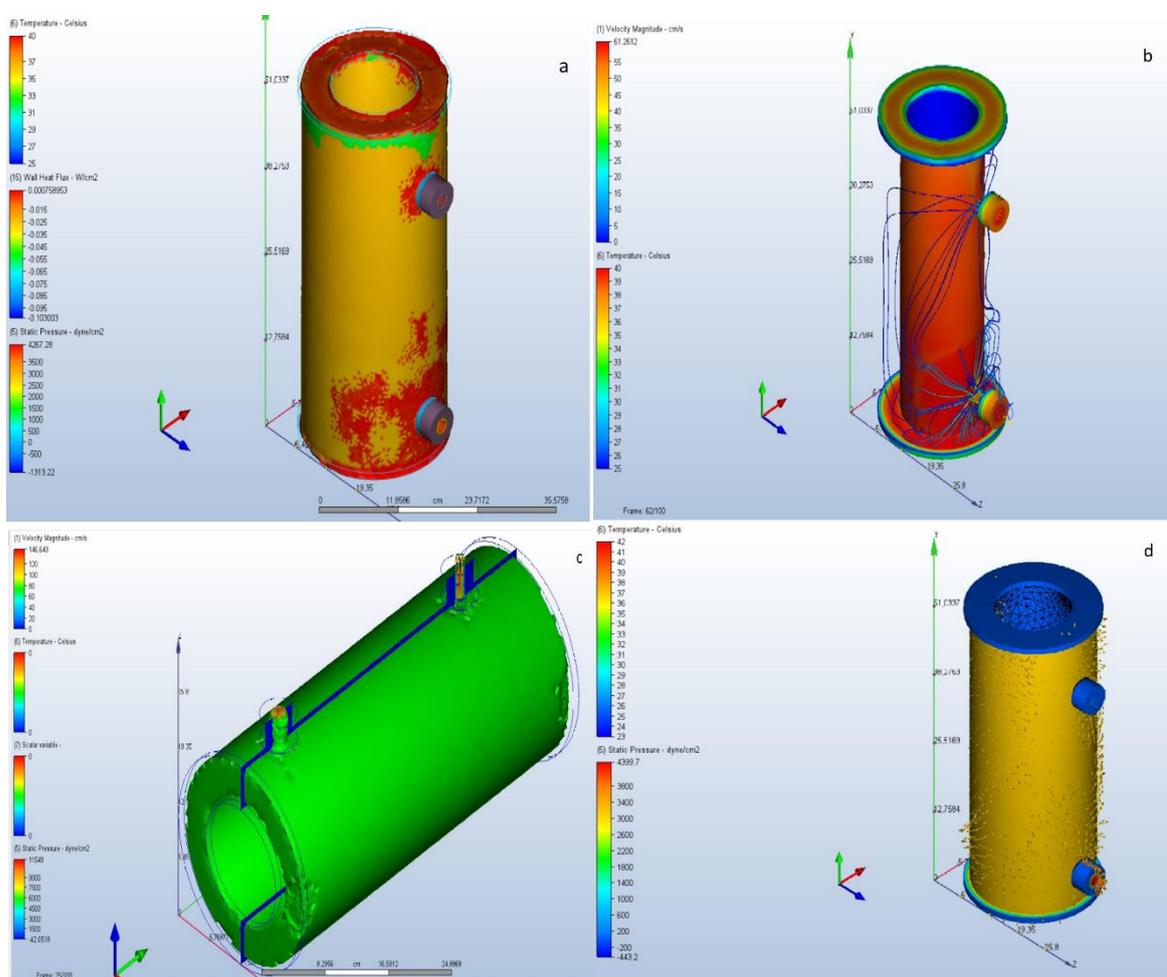
A curva que melhor se ajusta à subida da temperatura, tanto de entrada quanto a interna do equipamento possui ajuste logarítmico.

## 5.2 Simulação da distribuição de temperatura no biodigestor

Com o auxílio do *software* Autodesk CFD SIMULATION foi possível realizar simulações de temperatura, fluxo de calor, pressão e velocidade do fluido aquecedor interno, além de uma pré-avaliação de estresse dos materiais da parede. Na Figura 20, são mostrados os resultados obtidos nas simulações com as respectivas escalas.

Na Figura 20a é apresentada uma composição cromática baseada nas escalas de fluxo de calor através da parede, pressão estática interna e temperatura. Já na figura 20b, são mostradas algumas moléculas de água com marcadores, permitindo avaliar o percurso hidrodinâmico dentro da camisa do biorreator, bem como a distribuição da temperatura promovida pelo fluido. As Figuras 20c e 20d, referem-se às zonas estáticas de pressão no interior da camisa de aquecimento do equipamento e à disposição vetorial do fluido durante a circulação.

**Figura 20.** Distribuição de temperatura, fluxo de calor e padrões de pressão no biodigestor simulados com o software CFD.



Fonte: Autor (2024).

### 5.3 Produção e purificação do biogás

Ao longo do processo de (co)digestão foram coletadas amostras e quantificado a composição do biogás, utilizando os sensores de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Os resultados obtidos após 60 dias (primeira coleta) e 120 dias de processo (segunda coleta) são

apresentados na Tabela 3 e nas Figuras 21 e 22. As análises foram executadas em triplicata a partir de uma única coleta. Cada amostra teve um volume de 20 mL.

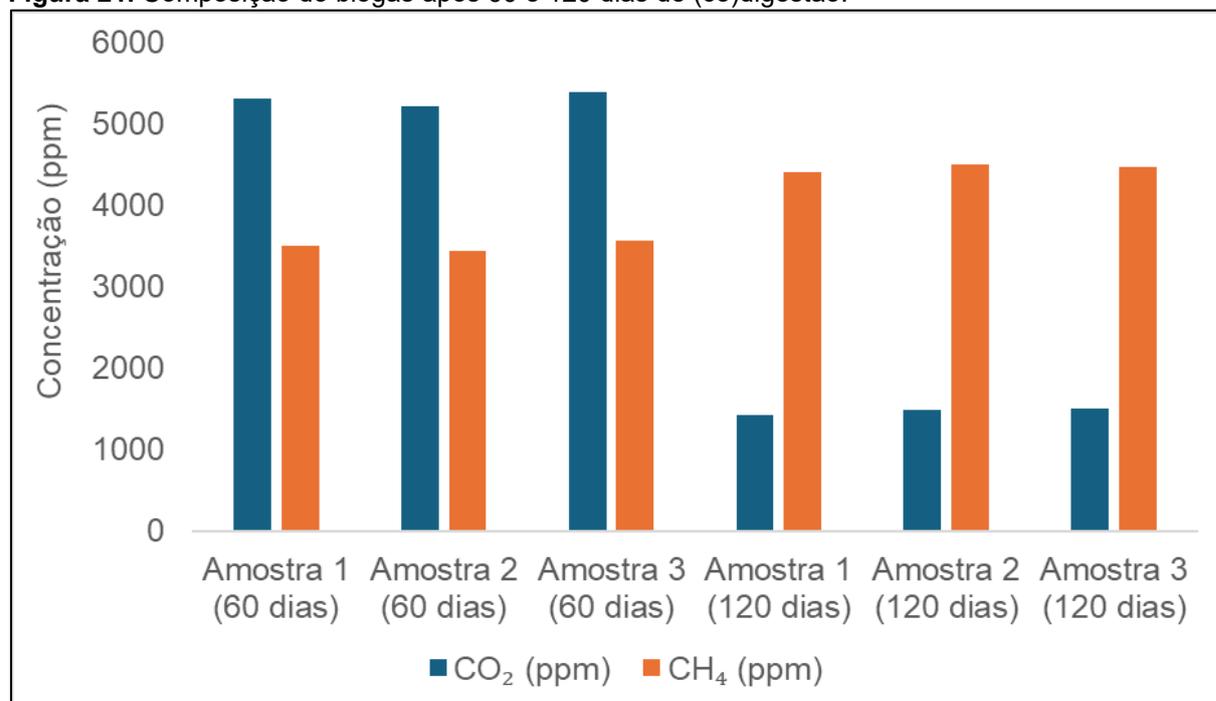
O biogás gerado no processo de (co)digestão anaeróbia apresentou uma concentração média de 39,78% de CH<sub>4</sub> e 60,22% de CO<sub>2</sub> após 60 dias de reação, e de 75,17% de CH<sub>4</sub> e 24,82% de CO<sub>2</sub> após 120 dias. Esses resultados demonstram a capacidade de geração de biogás a partir do processo de (co)digestão anaeróbia utilizando o biodigestor construído, além de evidenciar a necessidade e a viabilidade da purificação do biogás para torná-lo mais eficiente para uso.

**Tabela 3.** Composição do biogás após 60 e 120 dias de (co)digestão.

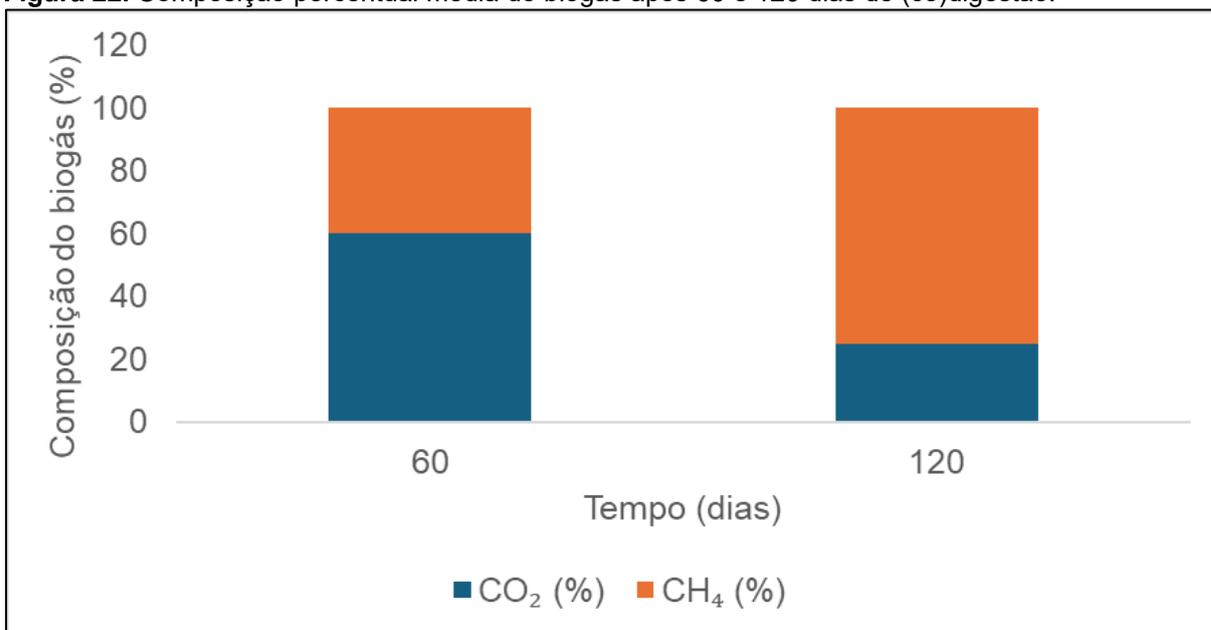
Amostra	Período (dias)	CO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (%)
1	60	5313	60,22	3510	39,78
2	60	5226	60,25	3447	39,75
3	60	5390	60,20	3564	39,80
1	120	1424	24,38	4417	75,62
2	120	1490	24,87	4502	75,13
3	120	1512	25,22	4483	74,75

Fonte: Autor (2025).

**Figura 21.** Composição do biogás após 60 e 120 dias de (co)digestão.



Fonte: Autor (2025).

**Figura 22.** Composição percentual média do biogás após 60 e 120 dias de (co)digestão.

Fonte: Autor (2025).

Amostras do biogás coletadas após 120 dias de processo também foram analisadas utilizando o kit de análise de biogás com biofoto, marca Alfakit. As análises foram realizadas em triplicata. Além da quantidade de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, também foi avaliada a quantidade de NH<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>S presentes no biogás. Na Tabela 4 são apresentadas as composições médias do biogás, resultantes de uma coleta, e análise em triplicata. Os valores exatos de porcentagem tanto do dióxido de carbono quanto do metano, se dão por conta da resolução do equipamento de análise (*Alfa Kit*), e foram 25% e 75% respectivamente, no entanto, com a finalidade de fechar o balanço de massa, segue na tabela os valores em porcentagem corrigidos.

**Tabela 4.** Composição média do biogás.

Componente	Quantidade
CH <sub>4</sub> (%)	75,16
CO <sub>2</sub> (%)	24,82
NH <sub>3</sub> (ppmV)	8,0
H <sub>2</sub> S (ppmV)	4,94

Fonte: Autor (2025).

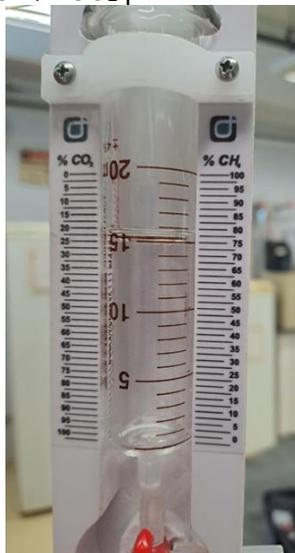
Nas Figuras 23 e 24 são mostrados os resultados obtidos com a análise realizada no biofoto e no kit. Ressaltando a resolução do Kit, a qual é passível de erro por paralaxe durante a análise visual.

**Figura 23.** Biofoto usado para quantificar  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2\text{S}$  presentes no biogás.



Fonte: Autor (2025).

**Figura 24.** Kit usado para quantificar  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  presentes no biogás.

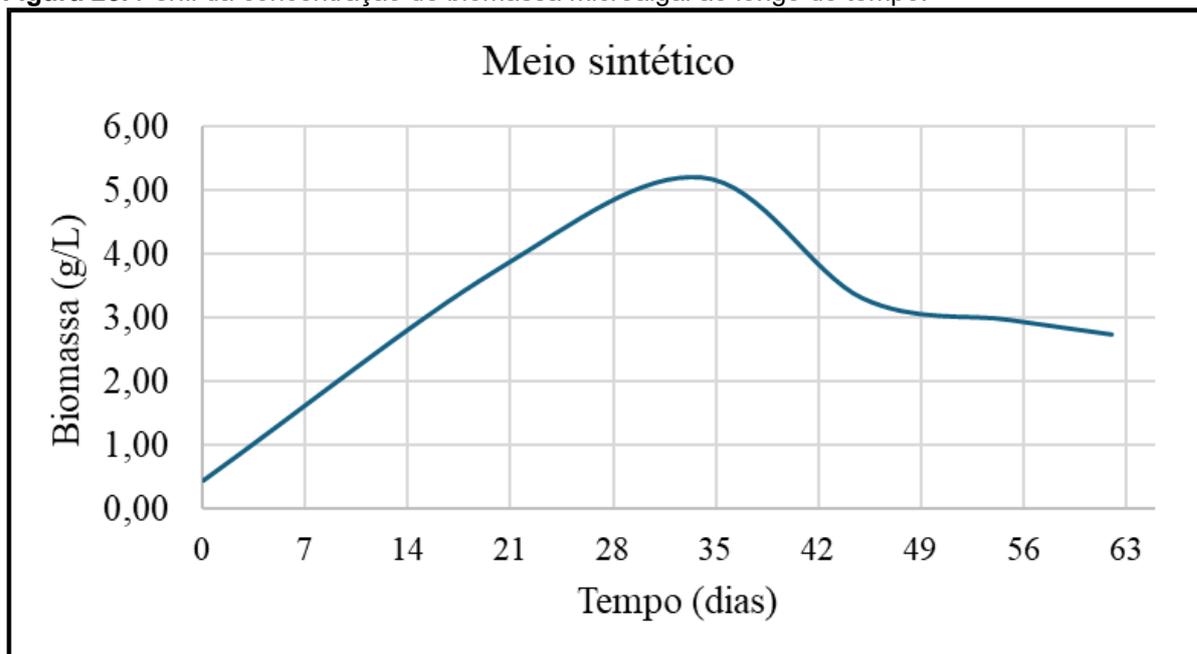


Fonte: Autor (2025).

Na Figura 25 é possível visualizar o perfil de concentração de biomassa microalgal de *Chlorella vulgaris* ao longo de 60 dias de crescimento. Inicialmente, nota-se um crescimento exponencial até aproximadamente o 28º dia, quando se atinge o pico de produção de biomassa (próximo a 5,0–5,5 g/L). Esse aumento sugere que, nesse período, as condições de cultivo, principalmente a disponibilidade de

nutrientes, pH e temperatura estavam ideais para a multiplicação celular. A partir desse ponto, observa-se uma queda progressiva na concentração de biomassa, chegando a valores em torno de 3,0 g/L ao final do período avaliado (60 dias). Essa redução pode estar associada ao esgotamento de nutrientes no meio, uma vez que o processo foi realizado em batelada.

**Figura 25.** Perfil da concentração de biomassa microalgal ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2024).

Na Tabela 5 é apresentada a composição do biogás obtido após o processo de purificação no fotobiorreator. O biogás coletado do biodigestor foi alimentado na parte inferior do fotobiorreator e, após 30 minutos de recirculação dentro do equipamento, foi coletado no topo. Foram injetados 20 mL de biogás no analisador de gases ( $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ ), e os dados foram registrados após 2 minutos, tempo necessário para a estabilização dos sensores.

Os resultados obtidos a partir do biofoto estão apresentados na Tabela 6. Contudo, o kit de análise de biogás não permitiu identificar diferenças significativas na composição do biogás após o processo de purificação. Este resultado pode ser atribuído à resolução do kit, que é de 2,5%, e ao fato de que o percentual de purificação, após 30 minutos, não tenha alcançado essa margem de variação. Assim, é necessário um tempo maior de purificação para obter uma variação mais significativa na composição do biogás purificado em comparação com o biogás bruto.

Ao comparar a Tabela 6, após a purificação, com a Tabela 4, antes da purificação, observa-se um aumento de 32,25% de  $\text{NH}_3$  e 10,37% de  $\text{H}_2\text{S}$ . Esses aumentos podem estar associados à passagem do biogás pelo meio de cultivo de microalgas, o qual é rico em substâncias e nutrientes específicos para o desenvolvimento delas. Devido ao fenômeno de "arrasto" gasoso, os componentes reagem e são coletados juntamente com o biogás na parte superior. Assim, em trabalhos futuros, pode ser relevante incluir uma etapa de remoção de  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2\text{S}$  do biogás antes de alimentá-lo no fotobiorreator.

**Tabela 5.** Composição do biogás após 30 minutos de purificação.

Amostra	1	2	3
$\text{CO}_2$ (ppm)	1067	1134	1048
$\text{CO}_2$ (%)	22,81	23,79	22,85
$\text{CH}_4$ (ppm)	3610	3610	3539
$\text{CH}_4$ (%)	77,19	76,21	77,15

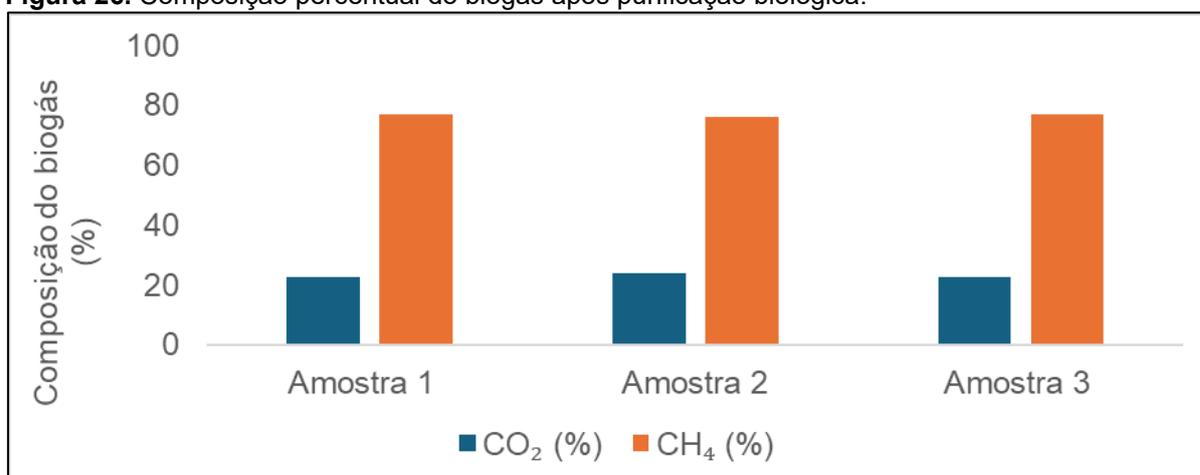
Fonte: Autor (2025).

**Tabela 6.** Composição média do biogás após purificação.

Componente	Quantidade
$\text{NH}_3$ (ppmV)	10,58
$\text{H}_2\text{S}$ (ppmV)	5,77

Fonte: Autor (2025).

**Figura 26.** Composição percentual do biogás após purificação biológica.



Fonte: Autor (2025).

## 6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram a viabilidade do processo de (co)digestão anaeróbia para a produção de biogás, utilizando resíduos de alimentos e dejetos suínos. Após 120 dias de reação, o biogás gerado apresentou uma concentração de 75,17% de CH<sub>4</sub> e 24,82% de CO<sub>2</sub>, evidenciando a eficácia do biodigestor construído. Além disso, foi possível verificar a importância da purificação do biogás, uma vez que a análise dos dados mostrou um aumento de 1,67% na concentração de CH<sub>4</sub> após 30 minutos de purificação utilizando microalgas *Chlorella vulgaris*.

Os objetivos do trabalho foram alcançados com sucesso, desde o projeto, a construção até a operação do sistema integrado biodigestor e fotobiorreator. O controle das condições para o crescimento das microalgas (iluminação, periodicidade, turbidez e adição de CO<sub>2</sub>) demonstrou-se eficaz tanto no crescimento quanto na captura de CO<sub>2</sub>, favorecendo assim a purificação do biogás, elevando a concentração de metano para aproximadamente 77%, uma concentração adequada para aplicações energéticas (ANGELIDAKI et al., 2018). No entanto, os resultados indicam que, para uma purificação mais eficiente, seria necessário um tempo de retenção hidráulica maior do biogás no fotobiorreator, visando alcançar concentrações de CH<sub>4</sub> superiores a 80%, conforme exigido para a injeção do biogás em redes de gás natural (ANP, 2022).

Dessa forma, o trabalho realizado abre caminho para futuros estudos que visem otimizar o processo de fixação de CO<sub>2</sub> por microalgas, com o objetivo de aumentar a eficiência na obtenção do biogás purificado, tornando-o mais apropriado para uso.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõem-se:

- realizar uma análise quantitativa do biogás utilizando cromatografia a gás com detecção por condutividade térmica (TCD), a fim de validar os resultados obtidos com os sensores e determinar as propriedades físico-químicas do biogás. Isso permitirá calcular o seu potencial calorífico e o índice de *Wobbe*;
- aumentar o tempo de circulação e purificação do biogás no fotobiorreator;
- avaliar a eficiência de purificação do biogás utilizando mais de uma cultura de microalgas;
- avaliar a (co)digestão usando apenas resíduos agroindustriais;

- realizar uma análise técnico-econômica para avaliar a viabilidade do sistema de (co)digestão anaeróbia e purificação de biogás, permitindo a otimização dos custos operacionais, a identificação de desafios na implementação em larga escala e a maximização dos benefícios ambientais e energéticos;
- realizar uma otimização do *design* mecânico e regime operacional do fotobiorreator com o objetivo de aumentar a eficiência da purificação biológica de biogás;
- realizar a modelagem e simulação da produção e purificação biológica do biogás.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABATZOGLOU, N.; BOIVIN, S. A review of biogas purification processes. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 3, n. 1, p. 42–71, 2009.
- ABBASI, T.; TAUSEEF, S.; ABBASI, S.A. Biogas energy. Briefs in Environmental Science. New York: Springer Science and Business Media, 2011.
- ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, v. 36, n. 2, p. 452–466, 2018.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2022). Resolução ANP Nº 906, de 18 de novembro de 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano> Acesso em: 19 fev. 2025.
- ARAUJO, A. P. C. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. Monografia. Universidade Federal de Uberlândia, Belo Horizonte, MG, 2017.
- ARUN, S.; SINHAROY, A.; PAKSHIRAJAN, K.; LENS, P. N. Algae based microbial fuel cells for wastewater treatment and recovery of value-added products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 132, 110041, 2020.
- AZAM, R.; KOTHARI, R.; SINGH, H. M.; AHMAD, S.; SARI, A.; TYAGI, V. V. Cultivation of two *Chlorella* species in Open sewage contaminated channel wastewater for biomass and biochemical profiles: Comparative lab-scale approach. *Journal of Biotechnology*, v. 344, p. 24–31, 2022.
- BAHADAR, A.; KHAN, M. B. Progress in energy from microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 27: 128–148, 2013.
- BANERJEE, S.; RAMASWAMY, S. Comparison of productivity and economic analysis of microalgae cultivation in open raceways and flat panel photobioreactor. *Bioresource Technology Reports*, v. 8, 100328, 2019.
- CHERNICHARO, C. A. Anaerobic reactors. Biological Wastewater Treatment Series. London: IWA publishing, 2007.
- CHEW, K. R.; LEONG, H. Y.; KHOO, K. S.; VO, D. V. N.; ANJUM, H.; CHANG, C.K.; SHOW, P. L. Effects of anaerobic digestion of food waste on biogas production and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 19, n. 4, 2021.
- CHISTI, Y. Airlift Bioreactor (Applied Biotechnology advances). [S.1.]: Springer, 1989.
- CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, v. 25, n. 3, p. 294–306, 2007.
- CYSNEIROS, D.; BANKS, C.J.; HEAVEN, S.; KARATZAS, K.A.G. The effect of pH control and hydraulic flush on hydrolysis and volatile fatty acids (VFA) production and profile in anaerobic leach bed reactors digesting a high solids content substrate. *Bioresource Technology*, v. 123, p. 263-271, 2012.
- EPA – Environmental Protection Agency (2021). Global Greenhouse Gas Emissions Data. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data> Acesso em: 12 ago. 2023.

- EVANGELISTI, S. et al. Life cycle assessment of energy from waste via anaerobic digestion: A UK case study. *Waste Management*, v. 34, n. 1, p. 226–237, 2014.
- FERNANDEZ, F. G.; FERNANDEZ SEVILLA, J. M.; MOLINA GRIMA, E. Photobioreactors for the production of microalgae. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 12, n. 2, p. 131–151, 2013.
- GAO, A. et al. Comparison between the Technologies for Food Waste Treatment. *Energy Procedia*, v. 105, p. 3915–3921, 2017.
- GERARDI, M. H. The microbiology of anaerobic digesters. Wastewater Microbiology Series. New Jersey: Wiley-Interscience, 2003.
- GHOFRANI-ISFAHANI, P.; BANIAMERIAN, H.; TSAPEKOS, P.; ALVARADO-MORALES, M.; KASAMA, T.; SHAHROKHI, M.; VOSSOUGH, M.; ANGELIDAKI, I. Effect of metal oxide based TiO<sub>2</sub> nanoparticles on anaerobic digestion process of lignocellulosic substrate. *Energy*, v. 191, 2020.
- GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. *Química Nova*, v. 32(3), p. 582-587, 2009.
- HARTMANN, H.; AHRING, B.K. Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: an overview. *Water Science & Technology*, v. 53(8), p. 7–22, 2006.
- HUO, S. et al. Biomass accumulation of *Chlorella Zofingiensis* G1 cultures grown outdoors in photobioreactors. *Frontiers in Energy Research*, v. 6, 2018.
- KARLSSON, T. et al. Manual Básico do Biogás. Univates. Lajeado: Editora da Univate, Brazil, 2014.
- KIM, M.; AHN, Y.H.; SPEECE, R.E. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. Thermophilic. *Water Research*, v. 36(17), p. 4369-4385, 2002.
- KRISHNA, D.; KALAMDHAD, A. S. Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 2, p. 1821-1830, 2014.
- KUSMAYADI, A.; LU, P. H.; HUANG, C. Y.; LEONG, Y. K.; YEN, H. W.; CHANG, J. S. Integrating anaerobic digestion and microalgae cultivation for dairy wastewater treatment and potential biochemicals production from the harvested microalgal biomass. *Chemosphere*, v. 291, p. 133057, 2022.
- LAI, J.J.; LI, Y.Y.; NOIKE, T. Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water Research*, v. 31(6), p. 1518-1524, 1997.
- LI, J.; LI, X.; YANG, Z.; TANG, T. T. Effects of cellulose on polycyclic aromatic hydrocarbons removal and microbial community structure variation during anaerobic digestion of sewage sludge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 55, n.9, p. 1104–1110, 2020.
- LINDFORS, A.; HAGMAN, L.; EKLUND, M. The Nordic biogas model: Conceptualization, societal effects, and policy recommendations. *City and Environment Interactions*, v. 15, p. 100083, 2022.
- MANN, D.G.; JAHNS, H. M. *Algae an Introduction to Phycology*. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 0-521-30419-9. 1995.

- MATA-ALVAREZ, J. Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. Amsterdam, 2005.
- MONTALVO, S.; CAHN, I.; BORJA, R.; HUILINIR, C.; GUERRERO, L. Use of solid residue from thermal power plant (fly ash) for enhancing sewage sludge anaerobic digestion: Influence of fly ash particle size. *Bioresource Technology*, v. 244 (1), p. 416– 422, 2017.
- MULLER-FEUGA, A. The role of microalgae in aquaculture: situation and trends. *Journal of Applied Phycology*, v. 12. 527–534, 2000.
- NAGARAJAN, D.; VARJANI, S.; LEE, J.; CHANG, S. Sustainable aquaculture and animal feed from microalgae-Nutritive value and techno-functional components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 150, 111549, 2021.
- NWOBA, E. G.; PARLEVLIT, D. A.; LAIRD, D. W.; ALAMEH, K.; MOHEIMANI, N. R. Light management technologies for increasing algal photobioreactor efficiency. *Algal Research*, v. 39, 101433, 2019.
- ONYEAKA, H.; MIRI, T.; OBIKEKE, K.; HART, A.; ANUMUDU, C.; AL-SHARIFY, Z. T. Minimizing carbon footprint via microalgae as a biological capture. *Carbon Capture Science & Technology*, v. 1, 100007, 2021.
- OZKAN, A. et al. Reduction of water and energy requirement of algae cultivation using an algae biofilm photobioreactor. *Bioresource Technology*, v. 114, p. 542–548, 2012.
- PHAM, T. N.; NAM, W.J.; JEON, Y. J.; YOON, H. H. Volatile fatty acids production from marine macroalgae by anaerobic fermentation. *Bioresource Technology*, v. 124, p. 500-503, 2012.
- POSTEN, C. Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Sciences*, v. 9, p.165–177. 2009.
- PROKOP, A.; BAJPAI, R. K.; ZAPPI, M. E. (ed). *Algal biorefineries, volume 2: Products and Refinery Design*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 150-151 p. 2015.
- RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. *Biologia Vegetal*, 6. Ed., Guanabara-Koogan, 2001.
- SAWDON, A.; Peng, C. A. Internal deoxygenation of tubular photobioreactor for mass production of microalgae by perfluorocarbon emulsions. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 90, n. 8, p. 1426–1432, 2015.
- SEEG (2022). Conheça as emissões de gases de efeito estufa do Brasil. Disponível em: <http://seeg.eco.br> Acesso em: 04 dez. 2023.
- SHAREEFDEEN, Z.; ELKAMEL, A.; BABAR, Z. Recent Developments on the Performance of Algal Bioreactors for CO<sub>2</sub> Removal: Focusing on the Light Intensity and Photoperiods. *BioTech 2023*, v. 12, p. 10-12, 2023.
- SIERRA, E. et al. Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, v.138, p.136-147, 2008.
- SINGH. R. N.; SHARMA, S. Development of suitable photobioreactor for algae production – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 4, p. 2347–2353, 2012.

- SINGH, H. M.; KOTHARI, R.; GUPTA, R.; TYAGI, V. V. Bio-fixation of flue gas from thermal power plants with algal biomass: Overview and research perspectives. *Journal of Environmental Management*, v. 245, p.519–539, 2019.
- SLEGGERS, P. M.; VAN BEVEREN, P. J. M.; WIJFFELS, R. H.; VAN STRATEN, G.; VAN BOXTEL, A. J. B. Scenario analysis of large scale algae production in tubular photobioreactors. *Applied Energy*, v. 105, p. 395–406, 2013.
- STYLES, D. et al. Climate mitigation efficacy of anaerobic digestion in a decarbonising economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 338, p. 130441, 2022.
- TAGHAVIJELOUDAR, M.; KEBRIA, D. Y.; YAQOUBNEJAD, P. Simultaneous harvesting and extracellular polymeric substances extrusion of microalgae using surfactant: Promoting surfactant-assisted flocculation through pH adjustment. *Bioresource and Technology*, v. 319, 124224, 2021.
- TREDICI, M. R. Mass production of microalgae: photobioreactors. In: Handbook of Microalgal Cultures. *Biotechnology and Applied Phycology* (ed. A. Richmond), p. 178– 214. Blackwell, Oxford. 2004.
- TREDICI, M. R. Microalgae cultures: limitation and potential. In: The 1st European Algae Biomass Association Conference & General Assembly, 3–4 June 2009, Florence, Italy. 2009.
- TREDICI, M. R.; CHINI ZITTELLI, G.; RODOLFI, L. Photobioreactors. In: Encyclopedia of Industrial Biotechnology: Bioprocess, Bioseparation, and Cell Technology. Vol 6 (eds M.C. Flickinger & S. Anderson), pp. 3821–3838. John Wiley; Sons, Hoboken. 2010.
- VASUMATHI, K. K.; PREMALATHA, M.; SUBRAMANIAN, P. Parameters influencing the design of photobioreactors for the growth of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, p. 5443-5450, 2012.
- WANG, B.; LAN, C. Q.; HORSMAN, M. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology Advances*, v. 30, n. 4. p. 904–912, 2012.
- WARD, A. J.; HOBBS, P. J.; HOLLIMAN, P. J.; JONES, D. L. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 7928-7940, 2008.
- XUE, L. et al. Missing Food, Missing Data? A Critical Review of Global Food Losses and Food Waste Data. *Environmental Science & Technology*, v. 51, n. 12, p. 6618–6633, 2017.
- YANG, Z.; DEL NINNO, M.; WEN, Z.; HU, H. An experimental investigation on the multiphase flows and turbulent mixing in a flat-panel photobioreactor for algae cultivation. *Journal of Applied Phycology*, v. 26, n. 5, p. 2097–2107, 2014.
- YANG, L. et al. Enhancing biogas generation performance from food wastes by high-solids thermophilic anaerobic digestion: Effect of pH adjustment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 105, p. 153-159, 2015.
- YAQOUBNEJAD, P.; RAD, H. A.; TAGHAVIJELOUDAR, M. Development a novel hexagonal airlift flat plate photobioreactor for the improvement of microalgae growth that simultaneously enhance CO<sub>2</sub> bio-fixation and wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, v. 298, 113482, 2021.

ZAHER, U. et al. Producing energy and fertilizer from organic municipal solid waste. Department of Biological Systems Engineering, Washington State University, 2007. Disponível em: <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/0707024.pdf> Acesso em 25 out. 2024.

ZHANG, Q.; WU, X.; XUE, S.; LIANG, K.; CONG, W. Study of hydrodynamic characteristics in tubular photobioreactors. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 36, n. 2, p. 143–150, 2013.