



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO TRATAMENTO DE BIOGÁS
UTILIZANDO MICROALGAS**

EDUARDO TORRES NÓBREGA GOMES

Foz do Iguaçu
2024

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO TRATAMENTO DE BIOGÁS UTILIZANDO
MICROALGAS**

Eduardo Torres Nóbrega Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química

Orientador: Profa. Dra. Andreia Cristina Furtado
Coorientador: Prof. Dr. Cesar Adolfo Rodriguez Sotomonte

Foz do Iguaçu
2024

EDUARDO TORRES NÓBREGA GOMES

**TÍTULO DO TRABALHO: ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO TRATAMENTO DE
BIOGÁS UTILIZANDO MICROALGAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química

Orientador: Profa. Dra. Andreia Cristina Furtado
UNILA

Coorientador: Prof. Dr Cesar Adolfo Rodriguez Sotomonte
UNILA

Prof. Dr Cleto Kaveski Peres
UNILA

Profa. Dra Márcia Regina Becker
UNILA

Foz do Iguaçu, 27 de setembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais são a Deus e a minha família, pelo apoio do começo ao fim desse desafio.

Em especial a minha mãe Edeliar Torres Saraiva, pela inspiração e por sempre ter dado o exemplo de esforço e dedicação.

A minha namorada Bianca Nauana Vaz, pelo apoio e compreensão em toda a caminhada.

A minha orientadora Prof. Dra. Andréia Cristina Furtado por toda a dedicação, auxílio e direcionamento ao longo de todo o trabalho.

A toda a equipe técnica da Universidade Federal da Integração Latino-americana, em especial ao técnico em química Eleandro Miguel da Silva que acompanhou e auxiliou no trabalho de construção e implementação.

Ao Instituto Federal do Paraná com sede em Foz do Iguaçu pelo fornecimento de insumos importantes a pesquisa.

Ao CIBiogás pelo apoio e fornecimento de insumos importantes a pesquisa.

Ao Itaipu Parquetec por dar oportunidade ao aprendizado de conhecimento prático importante para a realização do trabalho.

A todos os professores envolvidos no desenvolvimento e idealização do trabalho.

A todos os amigos e colegas que participaram da minha caminhada acadêmica.

A Universidade Federal da Integração Latino-Americana, aos professores do curso da engenharia química, aos funcionários administrativos e aos prestadores de serviços, pelo empenho e comprometimento que foram fundamentais para essa jornada de formação.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor: Eduardo Torres Nóbrega Gomes

Curso: Engenharia Química

	Tipo de Documento
<input checked="" type="checkbox"/> graduação	<input type="checkbox"/> artigo
<input type="checkbox"/> especialização	<input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso
<input type="checkbox"/> mestrado	<input type="checkbox"/> monografia
<input type="checkbox"/> doutorado	<input type="checkbox"/> dissertação
	<input type="checkbox"/> tese
	<input type="checkbox"/> CD/DVD – obras audiovisuais
	<input type="checkbox"/> _____

TÍTULO DO TRABALHO ACADÊMICO: ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO TRATAMENTO DE BIOGÁS UTILIZANDO MICROALGAS

Nome do orientador (a): Profa. Dra. Andreia Cristina Furtado

Data da Defesa: 27/09/2024

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, 27 de setembro de 2024.

Eduardo Torres Nóbrega Gomes

RESUMO

Há uma demanda crescente por metodologias de purificação de biogás em processos otimizados. Neste contexto, foi abordado o planejamento, projeto, construção e implementação de um sistema de absorção indireta utilizando um consórcio de microalgas para remover contaminantes do biogás como o CO₂, enriquecendo-o. Construído com materiais de baixo custo e técnicas simples, o sistema teve sua estanqueidade testada e foi constatada a ocorrência do processo devido ao crescimento da biomassa fotossintetizante e as quedas de pH após os processos, além de que a análise do gás efluente indicou razões de [CH₄]/[CO₂] superiores a razão da amostra in natura para todos os dias de processo, indicando a diminuição na concentração do CO₂ porém apresentando absorção de O₂.

Palavras-chave: microalgas; bactérias; biogás; enriquecimento; implantação

RESUMEN

Existe una demanda creciente por metodologías de purificación de biogás en procesos optimizados. En este contexto, se abordó la planificación, diseño, construcción e implementación de un sistema de absorción indirecta utilizando un consorcio de microalgas para eliminar contaminantes del biogás como el CO₂, enriqueciendo así el biogás. Construido con materiales de bajo costo y técnicas simples, se probó la estanqueidad del sistema y se verificó la ocurrencia del proceso debido al crecimiento de biomasa fotosintética y las caídas de pH después de los procesos. Además, el análisis del gas efluente indicó razones de [CH₄]/[CO₂] superiores a la razón de la muestra en estado bruto durante todos los días del proceso, lo que indica una disminución en la concentración de CO₂, aunque presentando absorción de O₂.

Palabras clave: microalgas; bacterias; biogás; enriquecimiento; implantación

ABSTRACT

There is a growing demand for optimized biogas purification methodologies. In this context, the planning, design, construction, and implementation of an indirect absorption system using a microalgae consortium to remove biogas contaminants such as CO₂, thus upgrading it, were discussed. Built with low-cost materials and simple techniques, the system's tightness was tested, and the occurrence of the process was verified due to the growth of photosynthetic biomass and the drops in pH after the processes. Additionally, the analysis of the effluent gas indicated [CH₄]/[CO₂] ratios higher than the ratio of the raw sample on all days of the process, indicating a decrease in CO₂ concentration, but showing O₂ absorption.

Key words: microalgae; bacteria; biogas; upgrading; implantation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas da digestão anaeróbia.....	14
Figura 2 - Representação dos fluxos em paralelo e contracorrente em uma coluna de absorção.....	25
Figura 3 - Coluna de absorção por borbulhamento.....	26
Figura 4 - Coluna de absorção por spray.....	27
Figura 5 - Diferentes tipos de recheios.....	28
Figura 6 - Coluna empacotada.....	28
Figura 7 - Fluxograma do processo de absorção.....	29
Figura 8 - Crescimento da biomassa	32
Figura 9 - Etapas clara e escura da fotossíntese.....	33
Figura 10 -Taxa de fotossíntese de acordo com a intensidade luminosa.....	34
Figura 11 - Fluxograma do sistema de purificação de biogás.....	35
Figura 12 - Coluna de absorção.....	37
Figura 13 - Sistema de injeção de gás.....	38
Figura 14 - Sistema de análise da vazão de gás.....	38
Figura 15 - Coluna de absorção com reciclo estabelecido.....	40
Figura 16 - Tanque de armazenamento e câmara escura.....	41
Figura 17 - Sistema de adsorção para remoção de água.....	42
Figura 18 - Biotério do Instituto Federal do Paraná	43
Figura 19 - Biodigestor.....	44
Figura 20 - Ponto de coleta de biogás.....	44
Figura 21 - Sistema de tratamento de biogás construído.....	46
Figura 22 - Espécie do gênero <i>Mucidosphaerium</i>	50
Figura 23 - <i>Kirchneriella obesa</i>	51
Figura 24 - <i>Desmodesmus opoliensis</i>	5

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Faixa de composição do biogás.....	16
Quadro 2 - Principais impurezas do biogás, problemas e requisitos de qualidade para fins energéticos.	18
Quadro 3 - Técnicas utilizadas para a remoção de água e suas vantagens e desvantagens.	19

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores de pH inicial e final.....	48
Gráfico 2 - Valores registrados de temperatura.....	48
Gráfico 3 - Valores diários de massa seca.....	49
Gráfico 4 - Valores de densidade populacional de microalgas.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ILATIT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
GEE	Gases de efeito estufa.
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
PPM	Partes por milhão
PLA	Poli (ácido láctico)
PVC	Poli (cloreto de vinila)
PU	Poli (uretano)
ATP	Adenosina Trifosfato
NADPH2	Fosfato de Dinucleótido de Nicotinamida e Adenina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 JUSTIFICATIVA.....	14
3 OBJETIVOS	15
3.1 OBJETIVO GERAL	15
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 BIOGÁS	15
4.1.1 Digestão Anaeróbia.....	15
4.1.2 Composição do Biogás	16
4.1.3 Usos do Biogás.....	17
4.2 TRATAMENTO DO BIOGÁS.....	19
4.2.1 Remoção da Água	20
4.2.2 Remoção de CO ₂	21
4.2.3 Remoção de H ₂ S	22
4.3 PROCESSOS BIOLÓGICOS.....	24
4.3.1 Processos biológicos aplicados na purificação do biogás	25
4.4 ABSORÇÃO DE GÁS	25
4.4.1 Colunas de Absorção.....	27
4.4.2 Tratamento do biogás por absorção utilizando microalgas	30
4.5 CULTIVO DAS MICROALGAS	32
4.5.1 Sistema de Cultura	32
4.5.2 Modos de Crescimento	33
4.5.3 Regime de Cultura	33
4.5.4 Digestato.....	34
4.5.5 Metabolismo celular	34
5 METODOLOGIA.....	36
5.1 MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTO DE CONSTRUÇÃO	36
5.1.1 Coluna de Absorção.....	36
5.1.2 Sistema de Injeção de Gás.....	38
5.1.3 Bombeamento e Recirculação do Líquido	40
5.1.4 Coluna de Adsorção.....	42
5.2 METODOLOGIA E EXECUÇÃO	43

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Os gases de efeito estufa (GEE) são substâncias presentes na atmosfera que retêm parte do calor emitido pela superfície da Terra, impedindo que ele se disperse para o espaço. Esses gases são fundamentais para manter a temperatura do planeta em níveis adequados para a vida, pois sem eles a Terra seria um lugar extremamente frio (ANDERSON et al., 2016). No entanto, o excesso de GEEs, como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (NO_x), contribui para o aquecimento global, causando alterações climáticas significativas, como o aumento do nível do mar, a intensificação de eventos climáticos extremos e a redução da biodiversidade. Assim, o controle da emissão desses gases é um desafio global e uma questão crucial para a proteção do meio ambiente e para a manutenção das condições de vida na Terra (DE AZEVEDO et al., 2018).

Os combustíveis fósseis derivados de petróleo são amplamente utilizados atualmente para geração de energia e trabalho mecânico, e a queima desses compostos é potencial geradora de gases do efeito estufa como o dióxido de carbono. O uso de biocombustíveis é incentivado nesse aspecto, pois a biomassa utilizada para a produção dos biocombustíveis assimila esses gases fazendo com que o ciclo do carbono se renove (SUBRAMANIAM; MASRON, 2020).

Dentre os biocombustíveis mais proeminentes, destaca-se o biogás. Este é um gás proveniente da digestão anaeróbia de matéria orgânica. Sua composição é majoritariamente metano e dióxido de carbono, que pode variar em proporção de acordo com a biomassa utilizada (JOALE et al., 2020).

Devido ao gás metano ser inflamável e combustível, seu uso se faz importante para alimentar caldeiras em meio industrial, e para suplementar o gasto de energia elétrica, sendo usado em geradores de energia, além de poder ser utilizado para queima em fogões e fornos convencionais. Porém, a depender do substrato utilizado como matéria orgânica, o biogás pode apresentar diferentes tipos de contaminantes, e esses contaminantes podem interferir no uso final do gás.

Para o biogás, o CO₂ contido em sua mistura com concentrações de 15 a 30% se apresenta como um gás de efeito estufa, e como gás inerte que interfere na queima do combustível (ROSHA et al., 2018). O sulfeto de hidrogênio (H₂S), mesmo em pequenas concentrações, é tóxico e influencia na chuva ácida, além de promover a corrosão de materiais como tubulações (KHAN et al., 2021).

Por conta disso, a purificação do biogás é de suma importância para os mais variados usos como a geração de energia térmica, energia elétrica e abastecimento de veículos, os contaminantes presentes no biogás limitam sua utilização, danificando equipamentos e promovendo baixa eficiência na geração de energia e dificultando seu transporte, gerando altos volumes de compostos inertes.

O processo de purificação de gases por absorção vem sendo desenvolvido e altamente implantado devido a condições dos gases e exigências ambientais, além de condições de uso de gases em processos. É uma operação unitária importante para garantir a manutenção de equipamentos e no caso do biogás uma eficiência maior, resultante de um maior poder de queima e prevenção a toxicidade. O esgotamento desses compostos no biogás, além de beneficiar seu uso promove um aumento na sustentabilidade ambiental, favorecendo a saúde do meio ambiente.

Nesse contexto, o presente trabalho visa testar o processo de purificação do biogás utilizando microalgas, utilizando materiais mais simples e de baixo custo para a construção do sistema de absorção, além de avaliar qualitativamente o processo a partir de indicadores indiretos como o pH e o crescimento da biomassa.

2 JUSTIFICATIVA

A retirada dos contaminantes é muito importante no ciclo de vida do biogás pois prolonga sua possibilidade de uso, sem causar mais danos ao meio ambiente pela presença do dióxido de carbono, e sem o risco de corrosão e danos em equipamentos que podem ocorrer devido à presença de sulfeto de hidrogênio e água.

O metano é 80 vezes mais prejudicial para o aquecimento global do que o dióxido de carbono liberado em sua queima (UNEP, 2023). A transformação de biogás em biometano aumenta a oferta de gás natural e reduz a pegada de carbono retirando poluentes da atmosfera e complementando a matriz energética local (CAILLOT et al., 2016).

Nesse contexto, o presente trabalho tem por justificativa a construção de um protótipo para viabilizar o uso e incentivo à produção de biogás de forma limpa e renovável, purificando o gás para que menos danos possam ser causados ao meio ambiente e aos equipamentos destinados à sua queima em propriedades rurais e potenciais geradores de matéria orgânica que podem fazer uso da biodigestão para geração deste

tipo de energia além de servir como auxiliador no ensino prático para diversas áreas da engenharia química. O processo de absorção de componentes é interessante para a problemática por conta da possibilidade de solubilização dos contaminantes em água e remoção destes contaminantes do meio aquoso através de biofiltros. Nesse processo, a biomassa decompositora pode fazer com que não seja necessária a reposição do solvente, renovando-o para um novo processo.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Implementação de um sistema de absorção para o tratamento e purificação de biogás, construído com materiais acessíveis e de baixo custo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar as variáveis que influenciam o processo de absorção;
- Analisar a viabilidade de construção do protótipo para absorção de gás;
- Avaliar o processo de remoção de contaminantes por meio de análises da composição do biogás de entrada e de saída e de testes indiretos de pH e massa seca, condicionando as espécies de microalgas presentes no fotobiorreator.

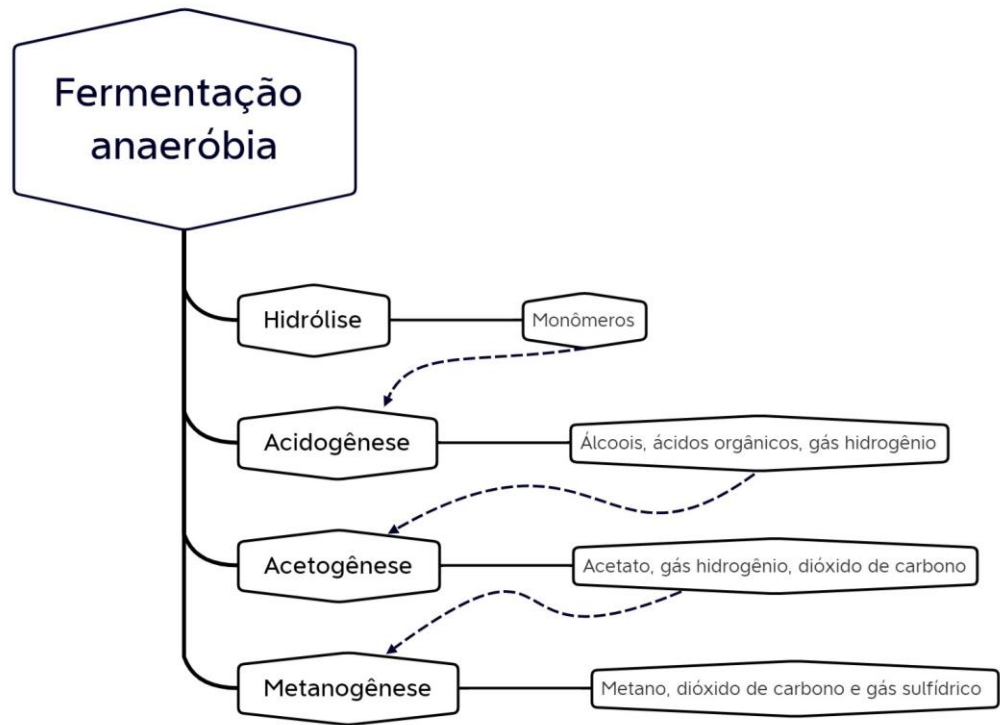
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 BIOGÁS

4.1.1 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo fermentativo que ocorre na ausência de oxigênio, em que os produtos são gerados por reações metabólicas de microrganismos (DOBRE et al., 2014). As etapas da formação do biogás podem ser vistas na Figura 1.

Figura 1 - Etapas da digestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de DOBRE et al. (2014)

A primeira etapa da digestão é a hidrólise, onde bactérias fermentativas hidrolíticas secretam enzimas que hidrolisam a matéria orgânica, transformando os carboidratos, proteínas e lipídeos em monômeros, estruturas mais simples como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. A fermentação ocorre no interior das bactérias acidogênicas que excretam compostos como álcoois, ácidos orgânicos, e gás hidrogênio. A partir desses produtos, as bactérias acetogênicas produzem acetato, gás hidrogênio e dióxido de carbono, que são utilizados pelas arqueas metanogênicas para produzirem o metano, o dióxido de carbono e o sulfeto de hidrogênio. A metanogênese é a fase mais sensível a alterações no pH e na temperatura.

A sulfatogênese também ocorre simultaneamente e é uma reação indesejada pois pode converter ácidos orgânicos voláteis e aromáticos, hidrogênio, metanol, etanol, açúcares, aminoácidos e vários compostos fenólicos em H₂S que é corrosivo, tem mal odor e é tóxico (ALMEIDA et al., 2022).

4.1.2 Composição do Biogás

O biogás oriundo da digestão anaeróbia tende a ser composto de variadas moléculas. O teor de metano é o parâmetro principal na determinação da capacidade calorífica do biogás, que pode variar de $15\text{MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ a $30\text{MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ (ABATZOGLOU; BOIVIN, 2009).

Entre os principais contaminantes estão o sulfeto de hidrogênio (H_2S), o dióxido de carbono (CO_2) e amônia (NH_3). As concentrações desses gases podem sofrer alterações devido às condições de operação e o substrato utilizado. No Quadro 1 é apresentado a composição típica do biogás.

Quadro 1 - Faixa de composição do biogás.

Elementos	JOALE et al.(2020)	ZANK et al.(2020)	FIGUEIREDO et al.(2019)
$\text{CH}_4(\text{v/v}) \%$	55 – 70	50 – 75	40 – 90
$\text{CO}_2(\text{v/v}) \%$	35 – 45	25 – 40	10 – 50
$\text{H}_2\text{S}(\text{v/v}) \%$	0 – 1	0,1 – 0,5	0 – 3
$\text{NH}_3(\text{v/v}) \%$	0 – 1	0,1 – 0,5	0,5 - 1
$\text{H}_2\text{O}(\text{v/v}) \%$	0 – 10	Variável	-
$\text{N}_2(\text{v/v}) \%$	0 – 3	0,5 – 2,5	0 – 2,5
$\text{O}_2(\text{v/v}) \%$	0 – 2	0.1 – 1	0 – 1
$\text{H}_2(\text{v/v}) \%$	0 – 1	1 – 3	0 – 3

4.1.3 Usos do Biogás

O biogás pode ser usado de muitas formas para gerar energia, dependendo da concentração de seus componentes. O CH_4 é o componente com maior valor agregado por conta do seu potencial para gerar energia, quanto maior a concentração de metano, maior o valor agregado do biogás. Em concentrações de metano superiores a 95%, o gás é chamado de biometano (MACHADO, 2023).

Na forma natural o biogás tem poucos usos, para que haja um maior aproveitamento é recomendado que ele seja separado em componentes com cada componente tendo uma determinada função. Para o seu uso em motores de acionamento direto, cogeração de energia (turbinas e motores) além de combustão em caldeira, é necessário que a água contida no gás seja removida, visto que ela pode absorver o calor liberado na queima do biogás, interferindo no processo de geração de energia.

O uso do biogás nesses equipamentos também pode ser prejudicado pelo sulfeto de hidrogênio, pela oxidação desse gás em dióxido de enxofre que é altamente corrosivo. Essa oxidação também pode causar acidificação dos óleos de motores, que pode aumentar o desgaste, além de inativar os catalisadores de oxidação presentes nos motores, dificultando a oxidação do metano. Em sistemas de cogeração e motores de acionamento direto a concentração desse composto deve ser menor que 200 ppm (MACHADO, 2023).

O biogás também pode ser utilizado como combustível veicular, como Gás Natural Veicular (GNV) ou Gás Natural Comprimido (GNC) ou Gás Natural Liquefeito (GNL). Para esse uso o biogás precisa ser purificado a biometano (concentração de metano superior a 95%), então além da retirada de água e sulfeto de hidrogênio, é necessária a retirada do dióxido de carbono (MACHADO, 2023). Outra aplicação para o biogás, que requer purificação do gás, é a sua utilização como fonte para a geração de hidrogênio (MACHADO, 2023).

Os principais contaminantes, seus problemas e requisito estabelecido para uso otimizado para aproveitamento energético podem ser vistos a seguir no Quadro 2.

Quadro 2 - Principais impurezas do biogás, problemas e requisitos de qualidade para fins energéticos.

Contaminante	Problemas	Requisitos de aproveitamento energético
Água	-Corrosão de compressores, tanques de combustíveis e motores pela formação de ácidos com H ₂ S, NH ₃ e CO ₂ . -Acúmulo de água nos dutos. -Condensação ou congelamento por pressão.	Remoção para desempenho em motores de combustão interna, microturbinas, células de combustível de carbonato fundido; conversão à biometano.
Material particulado	-Entupimento pela acumulação em compressores, tanques de combustíveis e motores.	
Oxigênio	-Perigo de misturas	

	explosivas pela elevada concentração de O ₂ no biogás	
Amônia	-Corrosão pela dissolução em água	
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	-Corrosão de compressores, tanques de combustíveis e motores -Concentrações tóxicas no biogás (> 5 cm ³ m ⁻³) -Formação de SO _x pela combustão	< 250 ppm para aquecimento em caldeiras 545 ppm-1.742 ppm para motores de combustão interna 2.800 ppm para geradores 10.000 ppm para turbinas e microturbinas 2 ppb-15 ppb para injeção na rede de biogás 5 ppb para combustível veicular 1 ppb-5 ppb para células de combustível
Dióxido de carbono (CO ₂)	-Baixo valor energético	< 2% na conversão a biometano
Siloxanos	-Formação de SiO ₂ e quartzo microcristalino pela combustão -Deposição em velas de ignição, válvulas e cilindro	9 ppm-44 ppm para motores de combustão interna 0,42 ppm para geradores 0,05 ppm-0,08 ppm para turbinas e microturbinas < 100 ppb para células de combustível
Halogênios (Não gerados por resíduos agrícolas)	-Corrosão em motores de combustão	< 1 ppm para células de combustível

Fonte: Adaptado de (RYCKEBOSCH et al., 2011; SUN et al., 2015)

4.2 TRATAMENTO DO BIOGÁS

Para os mais diferentes usos do biogás é visto que um tratamento deve ser aplicado para que seus contaminantes sejam removidos, esses contaminantes deverão

passar por processos de remoção e filtração para que o biogás se torne mais puro em metano e tenham os efeitos negativos dos contaminantes minimizados.

4.2.1 Remoção da Água

O biogás normalmente apresenta umidade elevada, com uma porcentagem de até 6% de água (PIGOSSO et al.,2022). A água precisa ser removida para a minimização de problemas relacionados a corrosão de tubulações e compressores. A remoção da água normalmente é a primeira etapa de tratamento do biogás.

Dentre os métodos mais utilizados, é possível citar a condensação e a secagem química. As principais técnicas englobando a condensação são as que utilizam separadores ciclone, desembacadores com tela de malha fina com porosidade de 0,5 μ m a 2 μ m, com tubulação preparada com purgador para separação e eliminação do vapor condensado. O resfriamento das tubulações otimiza o processo de condensação, porém em virtude do custo elevado de implantação e operação nem sempre é uma opção viável (NOVAK et al.,2016; RYCKEBOSCH et al., 2011).

A secagem química é outra técnica utilizada e abrange o uso de reatores cilíndricos recheados com absorventes como trietileno glicol ou sais higroscópicos, ou adsorventes como zeólitas, gel de sílica ou óxido de alumínio (NOVAK et al.,2016; RYCKEBOSCH et al., 2011). A secagem química é a técnica mais utilizada, porém quando o adsorvente é saturado, ele necessita ser regenerado ou substituído para que a eficiência do processo se mantenha. As vantagens e desvantagens dos processos podem ser vistas no Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 - Técnicas utilizadas para a remoção de água e suas vantagens e desvantagens.

Processo	Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Adsorção	Sílica gel Peneira molecular Alumina	Os materiais adsorventes podem ser regenerados. Estes podem ser destinados a qualquer uso do biogás e com baixos custos	As colunas de adsorção devem ser operadas em pressão de 6 bar - 10 bar. Partículas e óleo devem ser removidos

		operacionais.	previamente.
Absorção	Etileno glicol Selexol Sais higroscópicos	Os materiais podem ser regenerados. Remoção simultânea de partículas e hidrocarbonetos Não são compostos tóxicos. Eficiência de remoção alta.	Necessidade de temperaturas e pressões altas para regeneração da solução absorvedora Precisa tratar volumes de gás elevado(>500 m ³ h ⁻¹) para ser econômico
Refrigeração	Arrefecimento a 2°C	Técnica mais eficiente na remoção da umidade do biogás	Elevado consumo de energia para manter a refrigeração do sistema
Condensação	Desembaçadores separadores de ciclone. Sistemas de troca de calor na tubulação. Tubulação com sistema de purga do vapor de água.	Podem ser aplicadas como pré-tratamento bem todos os sistemas de geração de biogás. Redução de vapor de água em até 0,15% do volume inicial Elimina partículas de hidrocarbonetos e óleo, tecnologia simples	As tubulações devem ser longas e instaladas com inclinação para permitir purga do vapor de água. Tubulações devem ser resistentes ao congelamento

Fonte: (RYCKEBOSCH et al. 2011)

4.2.2 Remoção de CO₂

Para a remoção do CO_2 , os processos de absorção, separação por membranas, processos biológicos e criogenia podem ser empregados.

A absorção de CO_2 é uma técnica muito utilizada para remoção desse contaminante no biogás, sendo mais efetiva a altas pressões entre 1000kPa e 2000kPa, removendo de forma eficiente e barata até 95% do CO_2 (RYCKEBOSCH et al., 2011). Alguns reagentes orgânicos, comparados com a água têm mais eficiência de remoção de CO_2 , como o polietileno glicol e o tetraetileno glicol dimetil éter (RYCKEBOSCH et al., 2011).

A separação por membranas também pode ser utilizada selecionando uma membrana específica, porém o processo se torna muito oneroso. Os materiais mais utilizados para o preparo de membranas para separar CO_2 e CH_4 são materiais poliméricos ou inorgânicos (BASU et al., 2010) nos quais a poli imida e o acetato de celulose são os mais usados, com membranas feitas com material inorgânico, sendo de 5 a 10 vezes mais seletivo (BUDZIANOWSKI, 2016).

Os processos biológicos são uma via interessante para a remoção de CO_2 principalmente por via fotossintética utilizando microalgas, por conta do fornecimento de digestato proveniente do biodigestor, e da facilidade de implantação em pequena escala. Um biofiltro pode propiciar maior rendimento devido ao crescimento celular das microalgas dependerem do fornecimento de CO_2 (PIGOSSO et al., 2022).

Um biofiltro é um biorreator inoculado com biomassa decompositora, que em contato com microrganismos tem a capacidade de filtrar componentes e decompô-los da corrente material em contato. Se o biofiltro contar com biomassa fotossintetizante, ele pode ser construído como um fotobiorreator para a melhor captação da luz (PIGOSSO et al., 2022).

A separação do CO_2 por criogenia depende que o biogás seja seco e comprimido à pressão de 8000 kPa sob resfriamento, promovendo a remoção do CO_2 por condensação e resultando em metano com pureza superior a 97% (PIGOSSO et al., 2022). Mesmo sendo uma técnica promissora, os custos associados ao investimento inicial e ao consumo de energia são bastante elevados (BUDZIANOWSKI, 2016; SCHOLZ et al., 2013).

4.2.3 Remoção de H_2S

A remoção do sulfeto de hidrogênio do biogás é essencial, e pode ser realizada em duas etapas, a etapa primária onde o teor de H_2S presente no biogás é reduzido para valores menores que 500ppm podendo chegar a 100ppm, e etapa secundária onde ele será reduzido a 0,005ppm para ser utilizado nas redes de gás (PIGOSSO et al.,

2022). A remoção pode acontecer de duas maneiras, dentro do biodigestor enquanto a biodigestão ocorre, ou após ao processo da biodigestão.

4.2.3.1 *Remoção Dentro do Biodigestor*

No biodigestor, os processos para a remoção do H_2S são por dosagem de oxigênio e adição de cloreto de ferro. A adição de oxigênio no biodigestor em dosagem correta aumenta a taxa de conversão de sulfeto de hidrogênio em enxofre elementar auxiliando no processo de oxidação biológica do enxofre pela ação de bactérias aeróbias que decompõem o gás formado ainda dentro do biodigestor. A dosagem correta é necessária para que sulfatos não sejam formados e para que as arqueas metanogênicas não sejam inibidas pela adição de oxigênio. A dosagem precisa ser controlada também para que o biogás formado não se torne explosivo e para que o produto seja o de interesse (PIGOSSO et al., 2022).

Apesar de se tratar de um processo barato e de fácil operação, apresenta desvantagens quanto a possibilidade de um gás contaminado ao final do processo, além da deposição de enxofre, que precisa ser removido com o lodo do biodigestor constantemente (PIGOSSO et al., 2022).

Com a adição de cloreto de ferro ($FeCl_2$) no biodigestor, o sulfeto de ferro (FeS) é formado por reação de precipitação. O processo é eficiente na remoção de sulfeto de hidrogênio, a purificação alcança níveis menores que 100 ppm porém não alcança níveis suficientes para utilização do biogás em gasodutos ou células combustíveis, sendo seu uso recomendado para caldeiras, motores ou turbinas. O pH influencia no processo, sendo pHs básicos recomendados, porém a falta de seletividade inibe a precipitação do enxofre como sulfeto férrico (PIGOSSO et al., 2022; DEVAL e DELAUNE, 2002) necessitando de uma quantidade expressiva de reagentes, aumentando o custo e a operação, pois o sedimento formado tem que ser removido constantemente.

4.2.3.2 *Remoção Fora do Biodigestor*

Dentre os processos que podem ser aplicados após o biodigestor, destacam-se os processos de adsorção, de absorção, de separação por membranas, e os processos biológicos.

Para os processos de adsorção, materiais adsorventes são empregados em reatores tubulares em série com o biodigestor, e os materiais mais utilizados como adsorventes são zeólitas sintéticas, carvão ativado, sílica gel ou alumina. Esses adsorventes

podem H₂S, N₂, NH₃, H₂O dentre outros componentes (PIGOSSO et al., 2022; RYCKE-BOSCH et al., 2011).

Os reatores que realizam a adsorção são instalados em série com a saída do biodigestor, e operam em etapas distintas com a pressurização do gás para a passagem no adsorvente (adsorção). A dessorção ocorre pela despressurização do leito, promovendo a regeneração do adsorvente. Apesar deste método ser eficiente é recomendado que outros sejam usados para a remoção do sulfeto de hidrogênio, pois a adsorção pode ser irreversível e o adsorvente pode não ser recuperado (RYCKEBOSCH et al., 2011).

A presença de água pode também saturar o adsorvente rapidamente fazendo com que a eficiência do processo seja diminuída, exaltando-se assim a prévia remoção da água antes da adsorção. Durante a adsorção, outros gases como o oxigênio e o nitrogênio podem ser também adsorvidos (RYCKEBOSCH et al., 2011).

Para a separação por membranas ou permeação de gases, uma membrana é utilizada para separar os contaminantes do metano por difusão. O tipo de contaminante a ser separado está relacionado à membrana utilizada, ao tipo de estrutura, a permeabilidade da membrana e seu tempo de vida.

O método de separação por membranas tem um alto rendimento se associado a altas pressões (96%) ou absorção líquido – biogás (98%) (RYCKEBOSCH et al., 2011). O custo de implantação é a maior desvantagem das membranas, tem um custo muito alto de implantação e manutenção sendo empregado apenas para biometano com alto nível de pureza.

4.3 PROCESSOS BIOLÓGICOS

Os biofiltros utilizando microalgas vêm sendo utilizados na remoção tanto de H₂S quanto CO₂ do biogás como fotobiorreatores para melhora da captação de luz (BAHL et al., 2014; POSADAS et al., 2015; POSADAS et al., 2016; CASTRO et al., 2022a; CASTRO et al., 2022b).

Eles são construídos com materiais resistentes a corrosão, recheados com materiais com alta área superficial para fixação de microrganismos (biofilmes) que permitem a passagem do biogás.

Na prática os gases podem ser borbulhados em um fotobiorreator inoculado com microalgas, digestato ativado, e com fornecimento de luz para que seus contaminantes sejam absorvidos e utilizados nas reações de multiplicação celular.

4.3.1 Processos biológicos aplicados na purificação do biogás

Processos biológicos podem ser aplicados para a remoção do sulfeto de hidrogênio mediado por bactérias capazes de oxidá-lo a enxofre elementar e/ou sulfatos, na presença de oxigênio ou nitrato. É possível citar *Thiobacillus* sp., *Thermothrix* sp. e *Thiothrix* sp como bactérias oxidantes de enxofre (PIGOSSO et al., 2022). A multiplicação celular destes organismos também depende de carbono, utilizando o carbono disponível do ambiente como dióxido de carbono para seu crescimento (SOREANU et al., 2006).

Uma solução contendo nitratos e fósforo é bombeada no reator para manter as reações metabólicas das bactérias, e o enxofre removido pela filtração junto com os nutrientes presentes no efluente líquido, que podem ser descartados sem tratamento ou utilizado como fertilizante líquido (PIGOSSO et al., 2022).

Os biofiltros podem apresentar até 100% de rendimento na remoção do H₂S. Uma de suas desvantagens é manter a solução de nitrogênio e fósforo na concentração adequada. Porém, o digestato do biodigestor pode ser utilizado para tal fim agregando sustentabilidade ao processo (PIROLLI et al., 2016).

O digestato serve também como ótimo inoculante de bactérias no biofiltro, promovendo a formação e crescimento mais eficiente de biofilmes. Os biofiltros são mais eficientes para baixas vazões, por conta da cinética lenta de oxidação do sulfeto de hidrogênio, sendo maiores vazões possíveis, porém com um maior custo.

Lagoas de alta taxa de produção de microalgas são utilizadas, além de fotobiorreatores, utilizando digestato de biodigestores com bons resultados de tratamento (BAHL et al., 2014; POSADAS et al., 2015; POSADAS et al., 2016; CASTRO et al., 2022a; CASTRO et al., 2022b).

As microalgas utilizam o dióxido de carbono como fonte de carbono para a fotossíntese contribuindo para o seu crescimento celular e ao mesmo tempo esgotando esse componente no meio reacional e gerando oxigênio, e o oxigênio gerado serve como aceptor de elétrons na reação de oxidação do sulfeto de hidrogênio, promovendo o seu esgotamento (PIGOSSO et al., 2022).

Por biorremediação, o dióxido de carbono é esgotado do biogás chegando a eficiências de 100%, tanto para o CO₂ quanto para o H₂S. O CO₂ propicia crescimento celular que aumenta a taxa de reação e sua conversão em biomassa, enquanto o oxigênio é gerado e auxilia no processo de oxidação do H₂S (PIGOSSO et al., 2022).

4.4 ABSORÇÃO DE GÁS

A técnica de absorção de gases é empregada com a finalidade de reduzir a poluição atmosférica, removendo gases tóxicos presentes na atmosfera, tais como dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono. Esse processo é realizado por meio de uma reação química de absorção, que é amplamente utilizada em setores industriais que emitem grandes quantidades desses gases nocivos, como as indústrias químicas e de energia. A adoção dessa técnica visa minimizar os efeitos prejudiciais desses gases na qualidade do ar e na saúde humana, tornando-se assim uma medida crucial para a proteção ambiental.

O processo de absorção gasosa visa separar e absorver componentes solúveis de uma mistura gasosa em um solvente específico para isolamento e tratamento destes contaminantes, esse tipo de transporte de substâncias da fase gasosa para a fase líquida se mostra altamente dependente da concentração deste contaminante na corrente gasosa e na corrente líquida (WELTY et al., 2008).

O processo de absorção pode ser classificado como absorção física ou absorção química. Na absorção física as moléculas são absorvidas por solubilidade e pressão enquanto na absorção química um reagente é adicionado ao líquido absorvente para que uma reação química aconteça. As vantagens desse processo são uma melhor absorção de um componente em específico se a reação for seletiva para ele, o uso de baixas pressões, a possibilidade de recuperação do soluto absorvido se a reação for reversível, e para solutos insolúveis no líquido absorvente, a possibilidade de convertê-lo em um composto mais solúvel (LEITE et al., 2005).

Para processos de tratamento utilizando absorção, água, reagentes ou solventes orgânicos são utilizados, e os contaminantes do biogás com maior solubilidade no solvente utilizado são dissolvidos e transportados pelo solvente. A absorção física, na qual o contaminante é dissolvido por solubilidade, é mais efetiva se realizada sob altas pressões (1000kPa – 2000kPa). Ela é realizada em etapas, com pressurização, absorção, despressurização e dessorção. Quando o sistema é despressurizado o contaminante presente no solvente será separado após o processo.

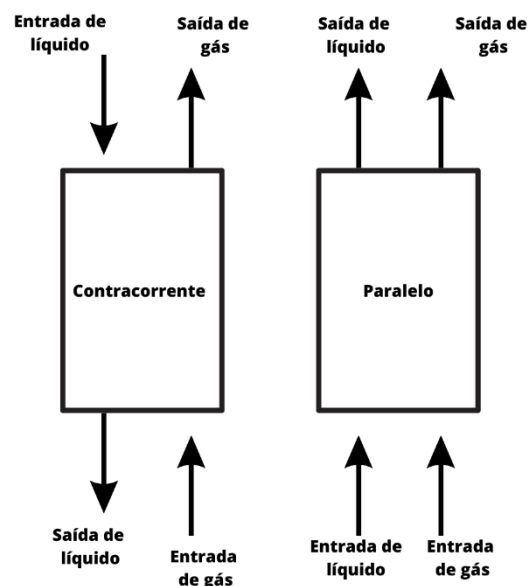
Os solventes químicos mais utilizados nos processos de absorção são soluções aquosas de aminas, soluções de sais alcalinos ou soluções contendo ferro (ZHAO et al., 2010). A absorção química envolvendo reações químicas para a dissolução do contaminante é realizada a baixas pressões (50mbar-150mbar) e a solução é regenerada por aquecimento a temperaturas de 106°C a 160°C (PIGOSSO et al., 2022). As taxas de remoção são altas, gerando um biogás com alta pureza ao final do processo, com taxas de

remoção de sulfeto de hidrogênio maiores que 97%.

As desvantagens do processo são os custos com agentes oxidantes químicos, a demanda energética para o bombeamento da solução absorvente e a geração de um efluente absorvido sem tratamento.

Os reatores de absorção são tubulares e verticais, e o gás pode ser bombeado em contracorrente ou paralelamente com o líquido absorvente, sendo em paralelo, o gás e o líquido sendo bombeados para a parte inferior do reator, e em contracorrente o gás sendo bombeado pela parte inferior, e o líquido pela parte superior. Uma representação dos tipos de fluxo, paralelo e contracorrente podem ser vistos na Figura 2 a seguir:

Figura 2 - Representação dos fluxos em paralelo e contracorrente em uma coluna de absorção.



Fonte: Adaptado de WELTY et al., 2008

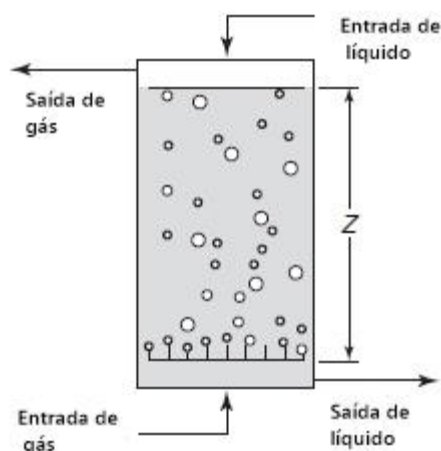
4.4.1 Colunas de Absorção

As colunas de absorção, também chamadas torres de borbulhamento, consistem em câmaras onde o gás é disperso em um líquido em forma de bolhas. A transferência de massa ocorre tanto durante a formação das bolhas quanto no seu percurso em contato com a fase líquida. As bolhas criam um ambiente de mistura na fase líquida o que reduz a resistência à transferência de massa. Elas são mais usadas quando a fase líquida controla a transferência de massa, isto é, quando os solutos são relativamente insolúveis (WELTY et al., 2008).

É possível ver a seguir na Figura 3 uma coluna de absorção por

borbulhamento:

Figura 3 - Coluna de absorção por borbulhamento.



Fonte: Adaptado de WELTY et al., 2008

A entrada de gás é feita na parte inferior, permeando um material poroso para a criação de pequenas bolhas, enquanto o líquido é alimentado na parte superior e coletado já com o soluto absorvido na parte inferior da coluna. O gás tratado é coletado na parte superior a coluna. A área e o tempo de contato são parâmetros muito importantes para o processo (WELTY et al., 2008). Na coluna de borbulhamento, uma pedra difusora porosa é acoplada ao fluxo inferior de gás para que haja uma melhor dispersão do gás no líquido, formando pequenas bolhas o que auxilia na transferência de massa.

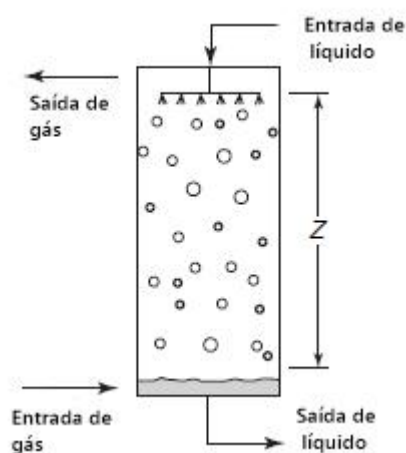
Analisando a utilização de uma coluna de borbulhamento comparativamente com uma coluna empacotada com *Glass Raschig Rings* de 4mm, Bahr et al. (2014) constataram uma semelhança entre elas, exaltando a utilização da coluna de borbulhamento por sua construção mais simples. Na coluna de absorção um fluxo de gás em contracorrente é injetado com o líquido, no caso a água que é o líquido absorvente usado, e quanto maiores as vazões utilizadas na coluna em relação ao gás (razão líquido/gás), melhor é a transferência de massa do gás para o líquido otimizando o processo.

Entretanto, a concentração de oxigênio no biogás purificado também pode aumentar, caso não haja um certo nível de controle, pois o aumento da quantidade de líquido absorvente promove melhoria na transferência de massa e a produção de gás oxigênio pela fotossíntese das microalgas promove aumento no gradiente de concentração de oxigênio, favorecendo a transferência de massa para o biogás (BAHR et al., 2014; POSADAS et al., 2016).

As torres de spray também são utilizadas, e são o oposto da coluna de

borbulhamento. Nas torres de spray o líquido é disperso na parte superior da coluna através de sprays ou atomizadores para que gotículas sejam formadas, enquanto o gás é bombeado na parte inferior da coluna para que a absorção ocorra. Os sprays são dimensionados para que a área de contato aumente, dividindo o fluido em gotículas que conseguem cobrir uma área maior na coluna (WELTY et al., 2008). Uma coluna de spray pode ser vista na Figura 4 abaixo. Colunas de spray são mais utilizadas quando o gás é bastante solúvel no líquido absorvente e a maior resistência a transferência de massa vem da fase gasosa.

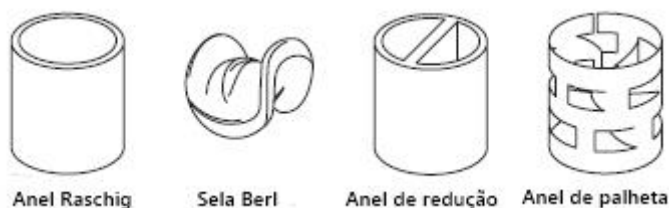
Figura 4 - Coluna de absorção por spray.



Fonte: Adaptado de WELTY et al., 2008

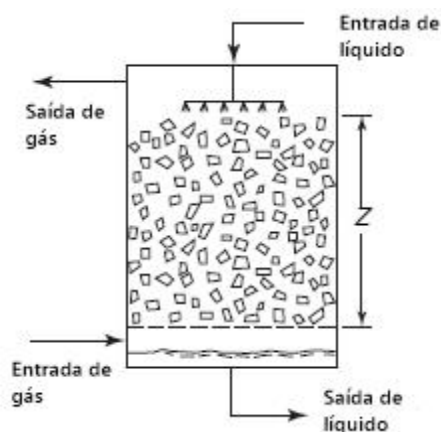
As colunas empacotadas são utilizadas quando ambas as resistências a transferência de massa são elevadas. Semelhante a coluna de spray, um spray é utilizado para dispersão da fase líquida, porém a coluna é recheada, para que o fluxo favoreça um maior contato entre as fases (WELTY et al., 2008). Na Figura 5 é possível ver diferentes tipos de recheios empregados em colunas de absorção, e na Figura 6 é apresentada a imagem de uma coluna empacotada.

Figura 5 - Diferentes tipos de recheios.



Fonte: Adaptado de WELTY et al., 2008

Figura 6 - Coluna empacotada.



Fonte: Adaptado de WELTY et al., 2008

O fluido entra na coluna por sprays enquanto o gás é bombeado para a parte inferior da coluna, os fluxos líquido e gasoso percorrem o empacotamento e a transferência de massa ocorre no percurso (WELTY et al., 2008).

4.4.2 Tratamento do biogás por absorção utilizando microalgas

Esse tema tem sido estudado nos últimos anos por diversos pesquisadores, com foco no rendimento do tratamento e teste de diferentes tipos de algas, variação em equipamentos e parâmetros pertinentes ao processo como pH e luminosidade, além da comparação com outros processos de separação (BAHR et al., 2014; POSADAS et al., 2015; POSADAS et al., 2016; CASTRO et al., 2020; CASTRO et al., 2022a; CASTRO et al., 2022b). Nesses trabalhos, as microalgas foram utilizadas para o tratamento de biogás em uma coluna de absorção aliada a outros processos, para o estudo do crescimento das algas e do rendimento da absorção, além da análise de processos para mitigar a contaminação do gás purificado. Diferentes abordagens foram analisadas em relação às variáveis do processo, dentre elas a utilização de diferentes digestatos como matéria orgânica para cultivo das microalgas além de técnicas para o cultivo das microalgas como decantadores para coleta, além de controle do pH para melhorar a solubilidade dos gases

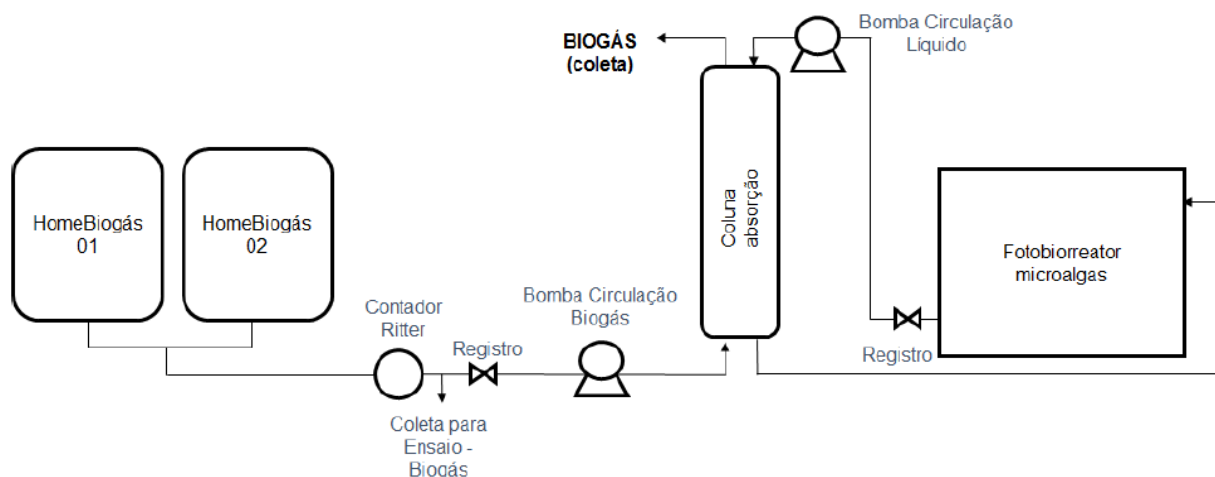
4.4.2.1 – Tratamento para Remoção do CO_2

O carbono inorgânico representado pelo CO_2 é assimilado pela biomassa juntamente com água e calor (fotossíntese), sendo produzidos glicose e oxigênio. A glicose será utilizada para a geração de energia para as microalgas e será o composto necessário para o crescimento populacional. O aumento da população das algas aumenta a taxa

fotossintética o que contribui com o rendimento do processo

O processo ocorre a partir da absorção dos contaminantes do biogás em água e posteriormente a água será tratada a partir das reações bioquímicas realizadas pelas microalgas e as bactérias presentes no meio de cultivo do fotobiorreator. Um fluxograma do processo pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma do processo de absorção.



Fonte: CASTRO et al, 2022b

O tratamento acontece com o fornecimento de biogás, que é bombeado para a parte inferior da coluna de absorção. Concomitantemente a água presente no fotobiorreator de microalgas é bombeada para a parte superior da coluna para entrar em contato com o biogás em contracorrente, o biogás é coletado na parte superior já descontaminado e a água com os contaminantes absorvidos retorna ao fotobiorreator para o tratamento.

A solubilidade dos gases é um dos fatores que permite o processo acontecer, pois os reagentes utilizados nas reações de oxidação bacteriana e fotossíntese como o H_2S e o CO_2 , são solúveis em água à pressão atmosférica, enquanto o metano é pouco solúvel (POSADAS et al. 2015).

Controlar a solubilidade desses gases é importante para mantê-los no meio reacional para que as reações bioquímicas ocorram. Um aumento do pH aumenta a solubilidade do CO_2 em água e é o método mais indicado para esse controle, pois a solubilidade dos gases aumenta a baixas temperaturas. No entanto, a diminuição da temperatura afeta também a taxa das reações bioquímicas relacionadas ao processo (BAHR et al., 2014; POSADAS et al., 2015; POSADAS et al., 2016).

4.4.2.2 - Tratamento para Remoção de H_2S

A remoção de H_2S acontece concomitantemente à remoção de CO_2 por meio de reações biológicas oxidativas realizadas por bactérias oxidantes de enxofre, que convertem o sulfeto de hidrogênio em enxofre elementar e posteriormente em sulfatos para a sua remoção e tratamento para que este composto não esteja disponível no biogás para causar corrosão e toxicidade além de mal cheiro. O biogás cru apresenta em sua composição uma baixa concentração de sulfeto de hidrogênio, porém a presença desse composto favorece o processo, pois além de ser um composto de maior solubilidade do que o dióxido de carbono, a presença do H_2S favorece reações aeróbias que auxiliam no controle do processo, aumentando assim a DQO do sistema (BAHR et al., 2014; POSADAS et al., 2015).

4.5 CULTIVO DAS MICROALGAS

As microalgas estão tendo uma valorização maior atualmente por serem uma fonte renovável e mais limpa para geração de biocombustíveis, apresentarem uma boa fixação de dióxido de carbono, além de seu uso potencial para ração animal e fertilizante para a agricultura (CASTRO et al., 2020).

O cultivo das microalgas é etapa pertinente ao processo de purificação do biogás, visto que o crescimento da biomassa é um fator determinante no rendimento do processo (CASTRO et al., 2022b).

4.5.1 Sistema de Cultura

O sistema de cultura pode se dividir em culturas suspensas ou culturas imobilizadas. As do tipo suspensas são as que estão dispersas no meio, se desenvolvendo de forma natural. Estas podem ser desenvolvidas em lagoas abertas (sistemas abertos) ou fotobiorreatores (sistemas fechados) (POURKARIM et al., 2019).

Os sistemas de cultura suspensa têm sido bastante utilizados para o tratamento de água, porém a colheita da biomassa deve ser feita com certa regularidade para que não contribua com a DBO (ZHUANG et al., 2018). Os sistemas imobilizados vêm para poder contribuir para que os processos de colheita sejam simplificados, sendo a imobilização por matriz e a imobilização por biofilme os processos mais utilizados. Na imobilização por matriz, as microalgas são encapsuladas em uma matriz de alginato ou carragenina o que garante facilidade na colheita, além de maior resistência e produtividade no reator, sendo o fornecimento de nutrientes realizado pelos poros da matriz (PETER et

al., 2015).

4.5.2 Modos de Crescimento

Os principais modos de crescimentos para as microalgas são os modos fotoautotrófico, heterotrófico, mixotrófico e o foto-heterotrófico (ZHAN et al., 2017). No crescimento fotoautotrófico a única fonte de energia fornecida para o cultivo é a luz (CESÁRIO et al., 2018), no crescimento heterotrófico apenas compostos orgânicos são utilizados, na ausência de luz. No modo mixotrófico a fotossíntese é primordial para a geração de energia, porém os compostos orgânicos e CO₂ são essenciais para o crescimento. No modo foto-heterotrófico a luz é fornecida concomitantemente a matéria orgânica fonte de carbono (SUPARMANIAM et al., 2019).

4.5.3 Regime de Cultura

Os regimes de alimentação mais utilizados são o batelada e o contínuo, sendo o batelada regido pela matéria orgânica sendo fornecida apenas uma vez ao início do cultivo (GEADA et al., 2017) promovendo o regime de crescimento comum da biomassa que pode ser visto na Figura 8 a seguir:

Figura 8 - Crescimento da biomassa.



Fonte: web.fe.up.pt

Para o regime contínuo, o substrato é adicionado de forma frequente a uma quantidade e volume fixos, e esse mesmo volume é retirado do meio de cultivo. Se bem operado, o crescimento das microalgas é mantido na fase exponencial explorando com isso a melhor fase de crescimento da biomassa que está diretamente ligada ao rendimento do processo. É relatado que o rendimento no processo contínuo pode ser de 2,3 a 5 vezes mais eficiente que o batelada, porém o regime batelada é mais utilizado para produção em massa (WAYNE et al., 2018).

4.5.4 Digestato

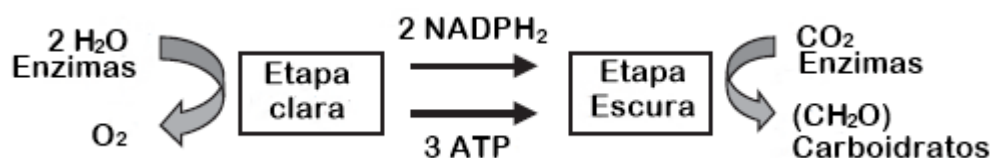
Nos trabalhos analisados, o modo foto-heterotrófico foi utilizado para o cultivo das microalgas, com fornecimento de luz e matéria orgânica ao mesmo tempo. Matéria orgânica como vinhaça, lodo proveniente de esgoto sanitário, digestato proveniente de biodigestores que são substratos com alta carga orgânica, e populações bacterianas A escolha do digestato é importante pois pode influenciar no pH do meio, ou nos nutrientes disponíveis para a assimilação pela biomassa. Caso o substrato seja previamente digerido, a carga bacteriana presente pode auxiliar no controle de contaminantes, facilitando a sua decomposição e, se necessário oxigênio para as reações ocorrerem podem auxiliar no controle desse gás no meio (POSADAS et al., 2015).

A biodegradabilidade do substrato é um fator importante a ser considerado por conta do aumento da carga de carbono inorgânico como dióxido de carbono, e da carga de compostos nitrogenados como nitritos e nitratos. Caso a biodegradabilidade seja muito alta, um excesso desses compostos pode ser disposto no meio, fazendo com que possa haver dessorção de CO₂ além de acúmulo de outros compostos que podem causar inibição da biomassa por conta do excesso de substrato. Uma razão ótima de partes de carbono, nitrogênio e fósforo é 100/18/2 (POSADAS et al., 2015).

4.5.5 Metabolismo celular

A fotossíntese realizada pelos microrganismos, pode ser expressa como uma reação de oxirredução que depende da energia luminosa que é captada pela clorofila, reação essa que converte CO₂ e H₂O em carboidratos e oxigênio. A conversão destes reagentes ocorre em duas etapas, que são a etapa clara e a etapa escura, como pode ser vista na Figura 9 a seguir:

Figura 9 - Etapas clara e escura da fotossíntese.



Fonte: Adaptado de (MASOJÍDEK et al., 2003)

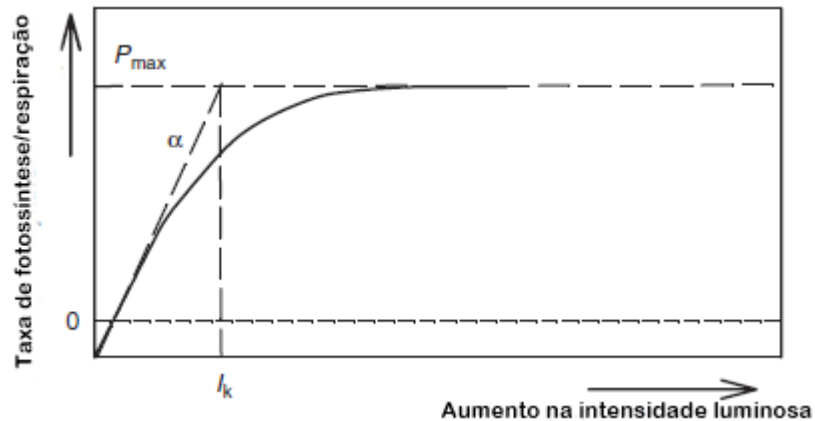
As reações da etapa clara ocorrem nas membranas fotossintéticas e nessas reações a energia luminosa é transformada em energia química gerando um redutor

bioquímico que é o NADPH_2 e também o ATP que é um composto de alta energia. As reações da etapa escura acontecem no estroma, e o NADPH_2 e o ATP são utilizados para reduzir o dióxido de carbono sequencialmente a carboidratos.

A atividade fotossintética é baseada em medições de evolução de oxigênio comparativamente com a proporção de intensidade luminosa proposta, sendo possível representar a taxa de fotossíntese/respiração celular em função da intensidade luminosa por uma curva, como mostra a Figura 10. A inclinação inicial é igual a P_{\max}/I_k , onde I_k representa a irradiância de saturação e P_{\max} é a taxa máxima de fotossíntese (MASOJÍDEK et al., 2003).

No escuro existe um consumo líquido de oxigênio devido à respiração celular. Sob baixa intensidade luminosa a taxa de fotossíntese é linear ao aumento de intensidade luminosa, porém a relação vai ficando cada vez menos linear até atingir um platô, onde a intensidade luminosa não influencia mais o processo e no caso de uma iluminação excessiva acima da intensidade de platô a fotoinibição pode ocorrer prejudicando a reação.

Figura 10 - Taxa de fotossíntese de acordo com a intensidade luminosa.



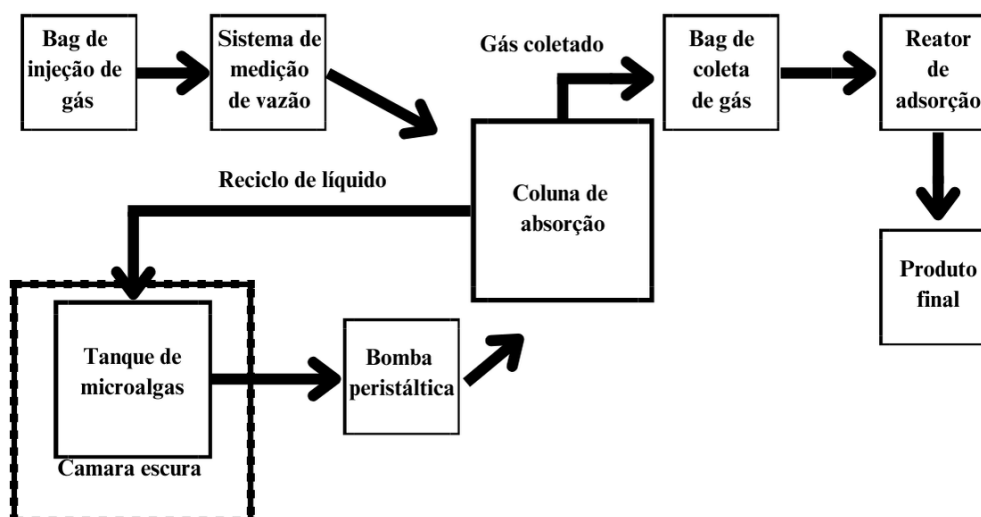
Fonte: (MASOJÍDEK et al., 2003).

5 METODOLOGIA

5.1 MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTO DE CONSTRUÇÃO

O protótipo de bancada do sistema de absorção para purificação de biogás foi projetado baseado em sistemas semelhantes encontrados na literatura (BAHR et al., 2014; POSADAS et al., 2015; SEREJO et al., 2015; POSADAS et al., 2016; TOLEDO-CERVANTES et al., 2017) e adaptado para funcionamento em regime batelada. Na Figura 11 é apresentado o fluxograma do sistema de purificação projetado com o tanque de microalgas.

Figura 11 - Fluxograma do sistema de purificação de biogás.



Fonte: Autor (2024)

A câmara escura foi utilizada para promoção de um regime luminoso controlado para o processo metabólico das algas. O processo acompanhará uma coluna de adsorção para a retirada da umidade residual.

O sistema foi instalado no laboratório de ensino de química da Universidade Federal da Integração Latino – Americana (UNILA), localizado no Itaipu Parquetec, e todas as análises e operações foram executadas em laboratório.

5.1.1 Coluna de Absorção

A coluna foi projetada para operação em paralelo para minimizar mudanças bruscas no pH e a absorção de oxigênio no biogás tratado (TOLEDO-CERVANTES et al.,

2017). A coluna foi construída utilizando uma proveta de vidro borossilicato com graduação de 500 mL, com 5,5 cm de diâmetro externo e 32,4 cm de altura, permitindo que o perfil de bolhas seja visível para identificar visualmente como a área de contato entre as bolhas e o líquido está se formando. Com uma serra diamantada, as extremidades da proveta foram removidas para adaptar as conexões de entrada e saída de correntes, utilizando 2 redutores de PVC de 50 mm para 25 mm adaptado em um torno mecânico. Para a fixação dos redutores ao tubo de vidro foi utilizado uma cola PU, a base de poliuretano na superfície interna destes.

A superfície interna da saída de 25 mm do redutor foi lixada para melhor aderência com a tubulação. Nesses redutores não foram adicionados cola de PVC para o encaixe das tubulações, para a manutenção do equipamento e troca de conexões e tubulações, quando necessário. Tubos de 25 mm de diâmetro com 5 cm de comprimento foram lixados para a conexão nos redutores tanto na parte superior quanto inferior da coluna. Também, na parte superior da coluna uma conexão tipo T foi adicionada para promover uma bifurcação, conectando também tubos de 5 cm de comprimento e 25 mm de diâmetro em PVC para as conexões de entrada e saída do gás, essa tubulação foi lixada e colada com cola de PVC para melhor aderência e estanqueidade.

Um tubo de PVC flexível de 1/4 de polegada de diâmetro e 8 cm de comprimento foi introduzido em um dos lados da bifurcação na parte superior da coluna, para a alimentação do gás através de um furo que foi realizado em um tampão de 25 mm com uma furadeira e um adaptador de plástico adicionado para melhorar a estanqueidade na conexão com a injeção de gás. Ao tubo, foi conectado um tubo de vidro para melhorar a visibilidade e nele uma conexão feita de tubo de PVC flexível de 4 cm foi conectado e selado com uma conexão de plástico totalizando o comprimento de 25,7 cm. O comprimento do tubo de alimentação do gás e a entrada do tubo pela parte superior da coluna foram definidos de modo a evitar inundação do sistema de injeção de gás caso haja redução na pressão da linha. Na conexão final, adicionada ao tubo de vidro, um total de 8 furos foram feitos na extremidade final do tubo de injeção utilizando uma retifica com broca de 1,5 mm para a saída de bolhas menores, promovendo o aumento da área de contato.

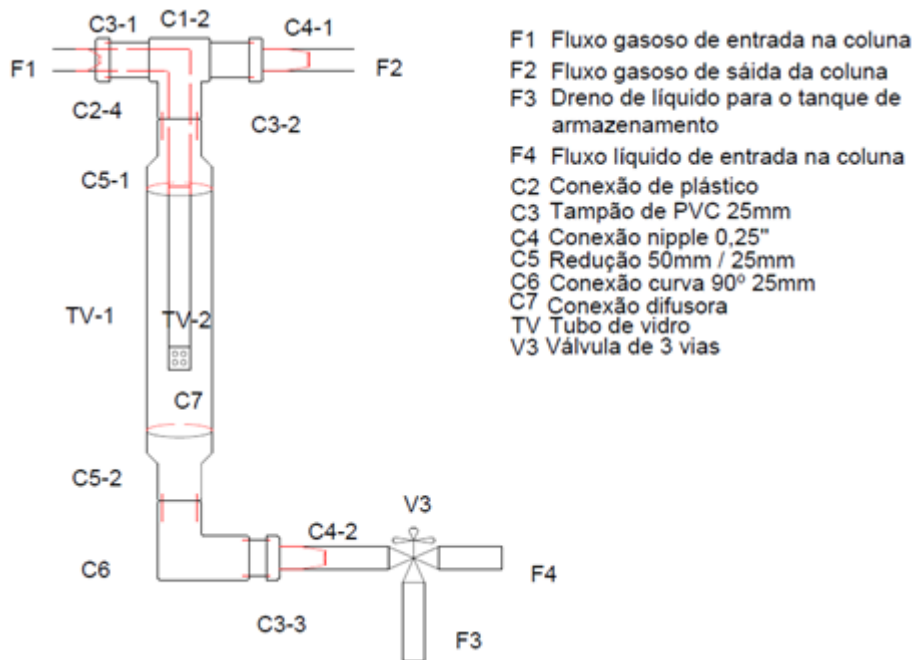
Para evitar movimentação do tubo de injeção de gás no interior da coluna, um suporte foi confeccionado em PLA em uma impressora 3D e encaixado na redução de PVC inferior para promover a sustentação para diferentes configurações.

No outro lado da conexão T na parte superior da coluna, a saída do gás foi

instalada, onde o produto final, após o borbulhamento, será coletado. Nessa saída um tampão de PVC de 25 mm foi acoplado a uma conexão niple de espigão de 1/4 in e 1/2 de rosca e um tubo de PVC flexível de 5 cm foi acoplado a ele, nesse tubo uma válvula esfera foi acoplada para abrir e fechar o canal, onde haverá o fluxo de saída para a coleta do gás purificado.

Na parte inferior da coluna, um tubo de PVC de 25 mm de diâmetro e 5 cm de comprimento foi conectado à redução de 50 mm e uma conexão curva de 45° em PVC foi acoplada ao tubo. A partir dessa curva, um tubo de PVC de 5 cm foi lixado e fixado com cola de PVC na conexão curva, e um tampão de 25 mm de diâmetro foi conectado juntamente com uma conexão niple de espigão de 1/4 in e rosca de 1/2 in, adicionado a partir de um furo feito com uma furadeira no tampão, a partir dessa saída, uma válvula de 3 vias foi colocada na parte inferior para permitir tanto a entrada na coluna de absorção quanto a retirada do fluido contido na coluna ao final do processo. Essa saída pode ser usada também como ponto de coleta de fluido. Um fluxograma da montagem da coluna de absorção pode ser visto na Figura 12 a seguir:

Figura 12 - Coluna de absorção.



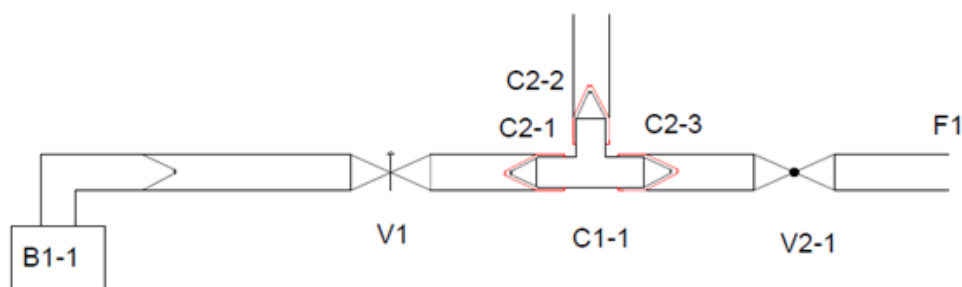
Fonte: Autor (2024)

5.1.2 Sistema de Injeção de Gás

O sistema de injeção de gás é composto por uma bag de gás (Intratherm modelo BAC-10), com capacidade de 1 L, para o armazenamento e fornecimento do gás,

uma válvula tipo agulha para o controle da vazão, tubulação de 1/4 in de diâmetro interno em PVC flexível, uma conexão T que permite coleta de gás para análise e monitoramento da vazão de alimentação do gás, e uma válvula esfera com entrada e saída de 1/4 in externa e um tubo de diâmetro externo de 1/4 in. Um fluxograma do sistema de injeção pode ser visto na Figura 13 a seguir:

Figura 13: Sistema de injeção de gás



- B1 Bag de armazenamento
- V1 Válvula agulha
- C1 Conexão T
- C2 Conexão de plástico para vedação
- V2 Válvula esfera
- F1 Fluxo gasoso de entrada na coluna

Fonte: Autor (2024)

Para a determinação da vazão de gás, foi utilizada uma bureta de 50 mL, imersa invertida em um béquer com água e conectada ao sistema de injeção de gás na conexão T, como mostra a foto na Figura 14 a seguir:

Figura 14 - Sistema de análise da vazão de gás.



Fonte: Autor (2024).

A aferição da vazão foi realizada promovendo um vácuo parcial na tubulação, resultando em um aumento do nível da água na bureta. Estabelecido o nível de líquido, a válvula da bureta foi fechada e a válvula esfera (V2-1) foi fechada para o fluxo de gás ser direcionado para a medição, com isso a válvula agulha será também aberta. Com a válvula da bureta aberta a vazão será aferida pelo deslocamento do nível do líquido em um determinado tempo.

5.1.3 Bombeamento e Recirculação do Líquido

A razão de líquido/gás foi estabelecida para favorecer a transferência de massa. Essa razão é definida a partir dos fluxos de gás e líquido, onde preferencialmente o fluxo de líquido deve ser igual ou maior que o de gás para que haja uma melhor absorção, conforme a equação (1):

$$x_2 = x_1 + \frac{L}{G} * \left(\frac{y_1 - y_2}{m} \right) \quad (1)$$

Onde x_2 é a fração molar de soluto (dióxido de carbono) na corrente líquida na saída, x_1 é a fração molar de soluto na corrente líquida na entrada, L é a vazão molar de líquido, G é a vazão molar de gás, y_1 é a fração molar de soluto na corrente gasosa na entrada e y_2 é a fração molar de soluto na corrente gasosa na saída e m é a inclinação da linha de equilíbrio.

A equação 1 determina a importância da razão líquido/gás para a otimização da absorção dos componentes na fase líquida ao final do processo. Para este trabalho, adotou-se uma razão de líquido/gás igual a 2 (POSADAS et al., 2017). Uma vazão de 16,68 L/h foi estabelecida para o gás, com vazão de líquido de 33,37 L/h e com tempo de residência de 35 s na coluna para favorecer a transferência de massa sem manter líquido saturado de gás na coluna de absorção.

A partir da vazão de líquido e do tempo de residência, foi possível definir a altura da coluna para a recirculação do líquido, medida a partir da saída de gás, conforme a equação (2).

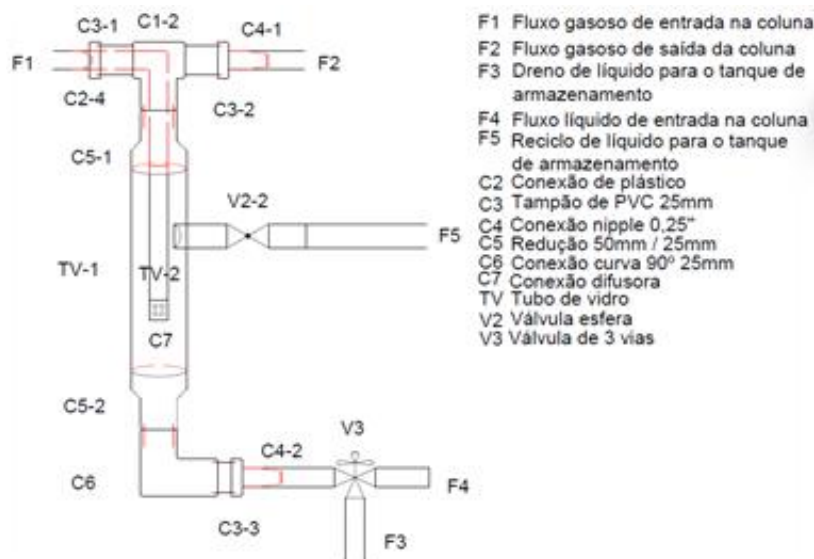
$$h = \frac{F * t}{\pi * r^2} (2)$$

Onde F é a vazão do líquido (cm^3/s), t é o tempo de residência (s) e r é o raio do tubo (cm).

O ponto de saída do líquido deve ser localizado abaixo da altura de recirculação para que um selo hidráulico na tubulação possa ser admitido, e a válvula deve ser graduada a fim de inundar a tubulação. Definidos o tempo de residência e o fluxo do líquido na entrada da coluna, foi feito um furo com 1,55 mm de diâmetro na parte lateral do

tubo de vidro com o auxílio de uma furadeira com uma broca fura copos diamantada, para a recirculação do líquido de absorção a partir de um tubo de PVC flexível de ½ in de diâmetro interno conectada a uma válvula para bloquear e controlar a vazão de reciclo. A configuração do reciclo pode ser visto na Figura 15 a seguir:

Figura 15 - Coluna de absorção com reciclo estabelecido.

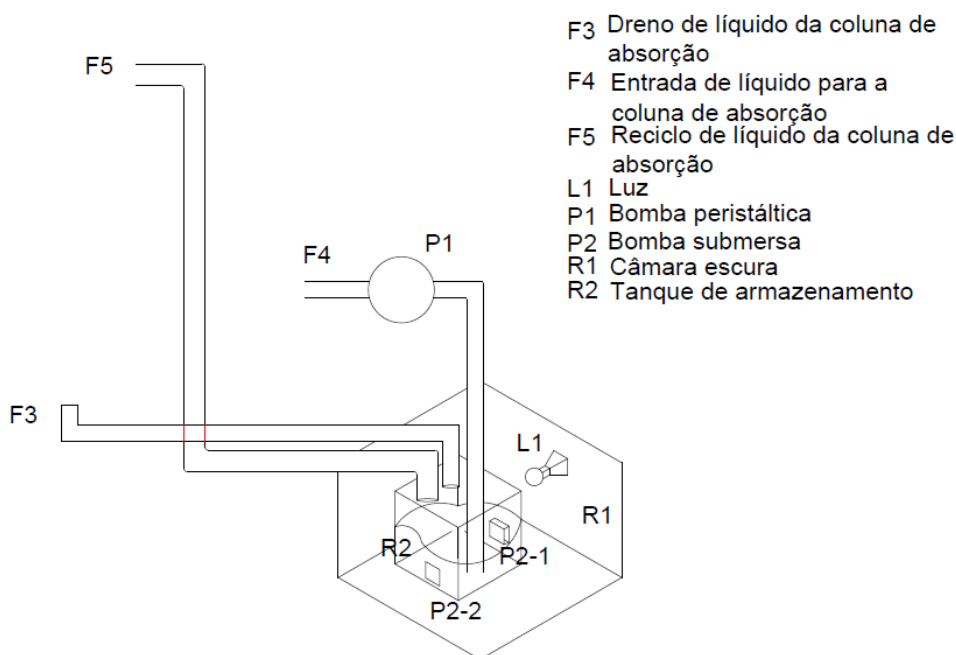


Fonte: Autor (2024).

Para o tanque de armazenamento de microalgas foi utilizada uma caixa plástica de 12 L, que foi conectada à coluna de absorção por uma tubulação emborrachada ligada a uma bomba peristáltica (Milan, modelo BP-601), que permite controlar a vazão do líquido para a coluna por meio de um controlador de velocidade. Para promover a agitação do tanque de armazenamento e diminuir o risco de decantação da biomassa, duas bombas submersas (OceanTech, modelo XT-240) de 3W foram instaladas.

Para promover os processos bioquímicos fotossintetizantes, uma câmara foi confeccionada utilizando uma caixa de papelão forrada internamente com papel alumínio para a impedir a entrada de luz e uma lâmpada LED foi disposta para a iluminação. O fluxograma do tanque e da câmara pode ser visto na Figura 16 abaixo:

Figura 16 - Tanque de armazenamento e câmara escura.



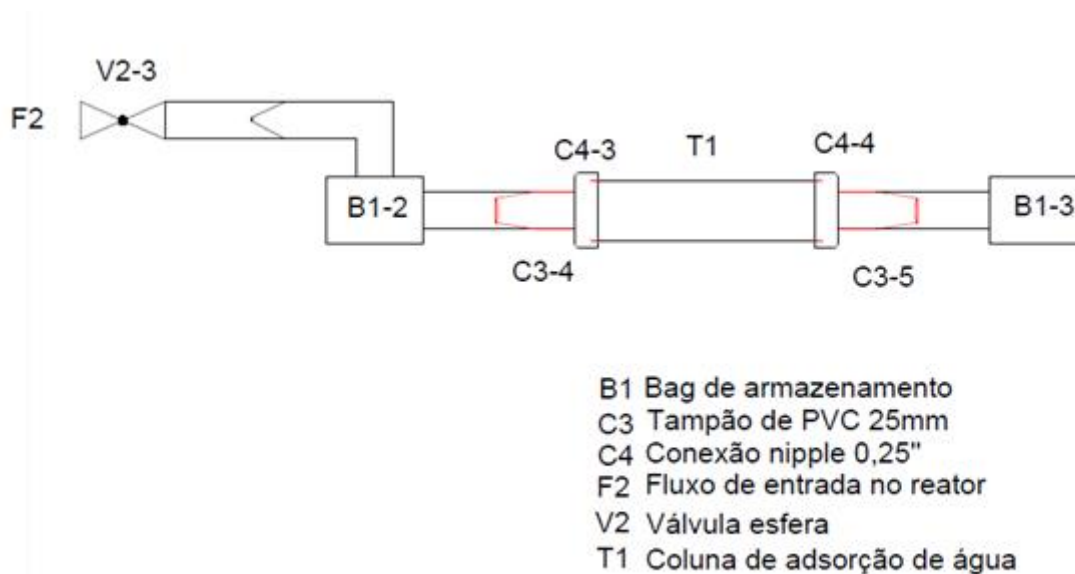
Fonte: Autor (2024).

A câmara escura foi planejada para que em processos bioquímicos fotossintetizantes se possam manter com eficiência um período de claro e escuro em locais com acesso a luz natural ou artificial no período escuro. Ela foi pensada para ser usada apenas no período escuro para isolar o tanque de armazenamento de qualquer fonte externa de luz no caso de biofiltros para promover redução do estresse foto-oxidativo, e otimização do uso de energia, utilizando os carboidratos e lipídios produzidos na etapa escura da fotossíntese para obter energia com os compostos já produzidos e otimizando o processo por meio da respiração celular aeróbia, que esgota o oxigênio do meio para oxidar as moléculas produzidas de carboidratos e lipídios e produzir ATP (Adenosina trifosfato) (MASOJÍDEK et al., 2003).

5.1.4 Coluna de Adsorção

Para remoção de água residual, o gás tratado foi submetido a um processo de adsorção utilizando sílica gel. Um reator de leito empacotado com 75 g de sílica gel foi confeccionado, utilizando 10 cm de tubo de PVC de 25 mm de diâmetro, com uma entrada e saída com tampão com conexão niple de 1/4 in e rosca de 1/2 in para a conexão de tubos de 1/4 in interna de PVC flexível permitindo a conexão de bags de gás ao reator. Um fluxograma representativo da saída da coluna de absorção e entrada no reator pode ser visto na Figura 17 a seguir:

Figura 17 - Sistema de adsorção para remoção de água.



Fonte: Autor (2024).

5.2 METODOLOGIA E EXECUÇÃO

A operação do equipamento se iniciou preparando o líquido de absorção, o tanque de armazenamento (R2) foi preenchido com uma amostra de 5 L de um consórcio de microalgas e bactérias coletada no biotério do Instituto Federal do Paraná de Foz do Iguaçu no dia 28 de agosto de 2024. O local foi escolhido por conta da ambientação prévia estabelecida em um local onde haveria decomposição de matéria orgânica proveniente do dejetos de peixes. A partir de uma análise preliminar, foi constatado que o pH era de 8,5, indicando a possibilidade de resistência ao biogás, a de encontrar espécies mixotróficas e resistentes a altos pHs seria maior. O biotério pode ser visto na Figura 18 a seguir:

Figura 18 - Biotério do Instituto Federal do Paraná.



Fonte: Autor (2024)

O tanque foi submetido a agitação constante 24 h por dia, utilizando as bombas submersas (P2) e exposição a luz de uma lâmpada LED (L1) com fotoperíodo de 12 h para ambientação e crescimento por 12 dias e alocado na câmara escura (R1) no período noturno. Após esse período, uma amostra foi coletada para análise das espécies em microscópio.

A cada dia, 100 mL de fluido foi retirado do tanque de armazenamento (R2) e 100 mL de uma solução de lodo proveniente de dejetos de peixe 7 vezes diluída foi adicionada para otimizar o crescimento. Em cada dia de operação, duas alíquotas foram coletadas do tanque de armazenamento (R2) para medição de pH e da temperatura do meio com o auxílio de um medidor Del Lab modelo DL-PH, sendo um pH de 8,3 o padrão. Para medidas de pH menores que 8, uma amostra de 4 g/L de bicarbonato de sódio foi adicionada ao tanque para correção, a outra alíquota foi coletada e refrigerada para uma posterior análise de massa seca. O procedimento descrito foi mantido por um período de 5 dias.

Diariamente, imediatamente após a troca do regime luminoso de escuro para claro, foi realizado o processo de absorção com alimentação de 1 L de biogás por dia. O biogás utilizado foi disponibilizado pelo CIBiogás. O biodigestor pode ser visto na Figura 19 a seguir:

Figura 19 – Biodigestor.



Fonte: Autor (2024)

O ponto de coleta do gás pode ser visto na Figura 20 a seguir:

Figura 20 - Ponto de coleta de biogás.



Fonte: Autor (2024)

Para operar o equipamento, inicialmente a bomba peristáltica (P1) foi ligada com a válvula de 3 vias (V3) direcionando o fluxo para F5 para que o fluxo entre em regime permanente na tubulação da bomba. Após isso, a válvula esfera (V2-3) foi aberta e desconectada da bag de armazenamento (B1-2), e o fluxo de líquido foi direcionado para a coluna de absorção alterando a configuração na válvula de três vias (V3). A válvula esfera (V2-2) foi aberta em vista a recircular o fluxo e formar um selo hidráulico na tubulação além de atingir um regime permanente de recirculação. Em seguida a válvula esfera (V2-3) foi fechada e a bag de armazenamento (B1-2) foi novamente conectada, a válvula esfera (V2-3) foi novamente aberta em vista a captar o gás que posteriormente será tratado. Para a circulação do gás, a válvula da bureta conectada a parte superior da conexão T (C1-1) foi fechada, e as válvulas agulha (V1) e esfera (V2-1) foram abertas para a circulação do fluxo 1 (F1). Após isso o fluxo 1 seguiu em direção ao tubo de vidro (TV-2) e a conexão difusora (C7) para o borbulhamento do gás no líquido. O gás borbulhado que não foi absorvido segue para o fluxo 2 (F2) e é coletado na bag de armazenamento (B1-2).

Após o processo de absorção, as válvulas esfera (V2-2) e (V2-3) foram fechadas e a bomba peristáltica (P1) foi desligada. A válvula de três vias (V3) foi aberta para drenar o líquido de absorção para o tanque de armazenamento (R2) e esgotar o gás remanescente na linha de injeção. A partir do esgotamento, um vácuo será formado na

coluna de absorção e a válvula de 3 vias (V3) foi alterada para direcionar o fluxo 4 (F4) para a coluna e a bomba peristáltica (P1) foi ligada com a válvula esfera (V2-3) aberta, para a coleta do gás tratado remanescente. Após isso a válvula (V2-3) foi fechada para a retirada da bag de armazenamento (B1-2) e posteriormente aberta para a drenagem do líquido remanescente na coluna. O líquido da coluna foi drenado totalmente ao fim do processo abrindo a válvula de três vias (V3) direcionando fluxo de líquido para o fluxo 5 (F5) para o desligamento do sistema.

Após o desligamento, a bag de armazenamento (B1-2) foi submetida a posterior tratamento para retirada de umidade, conectando-a ao fluxo direcionado para o reator de adsorção contendo sílica gel para a coleta do biogás completamente tratado na bag de armazenagem (B1-3), e a cada batelada a bag de armazenamento do produto final (B1-3) foi submetida a análise no equipamento Dräger X-am 7000 para aferição das concentrações finais de metano, dióxido de carbono e oxigênio. Após a operação diária as bags de armazenamento foram purgadas com o auxílio de uma bomba de vácuo e os valores de temperatura e pH foram catalogados.

Para a análise de massa seca executada nas amostras de fluido do tanque de armazenamento (R2), iniciou-se o processo com a coleta de 25 mL diariamente para cada amostra e preparo das mesmas para transporte. Após a coleta, as amostras foram imediatamente refrigeradas para preservar sua composição.

Filtros de fibra de vidro com poros de 0,7 μm , foram previamente calcinados em estufa a 180° por quatro horas para eliminar qualquer resíduo orgânico que possa interferir na pesagem. Após a calcinação e resfriamento em dessecador, os filtros foram pesados cuidadosamente para determinar a massa inicial.

As amostras foram então filtradas sob baixa pressão para remoção da água. O filtro, com a biomassa já retida foi completamente seco em uma estufa por 3 h com retiradas de 30 em 30 minutos para pesagem, até que toda a umidade tivesse sido eliminada. O filtro seco contendo a amostra foi então pesado novamente. A massa seca da amostra foi calculada pela diferença entre a massa do filtro com a amostra seca e a massa inicial do filtro calcinado, com o valor da massa seca e do volume inicial da amostra de 25ml foi possível calcular a densidade populacional dividindo a massa seca da amostra pelo volume de 25ml

Ao fim dos dias de operação, uma amostra foi coletada para realizar uma análise das espécies em microscópio para aferir se houve mudança nas espécies contidas na amostra inicial.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Sistema de purificação de biogás

O sistema construído pode ser visto na Figura 21 a seguir:

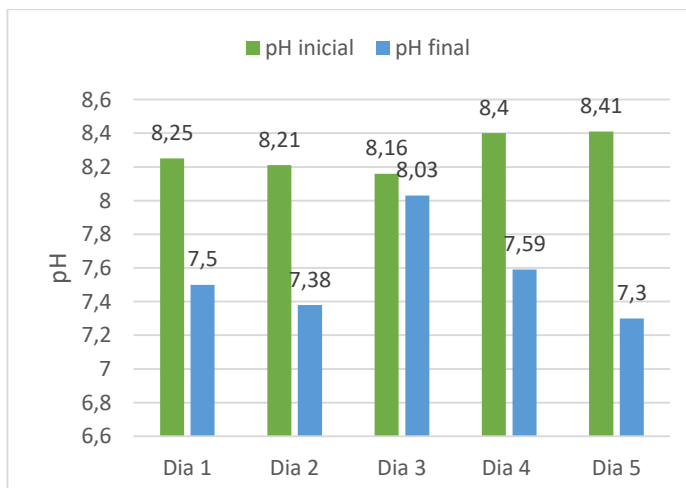
Figura 21 - Sistema de tratamento de biogás construído.



Fonte: Autor (2024)

O sistema de purificação foi operado por 5 dias, sendo realizada a reposição do líquido evaporado com água destilada. Diariamente duas amostras de 25 mL de líquido foram coletadas, uma para medição de pH e temperatura e outra para a medição da massa seca. O pH foi medido todos os dias antes do processo de absorção, para avaliar a necessidade de correção antes da operação. Também, após o processo de purificação, o pH era diariamente avaliado para constatar se houve queda no pH do meio, indicando assim a ocorrência do processo. Os valores de pH antes e após o processo podem ser vistos no Gráfico 1 a seguir:

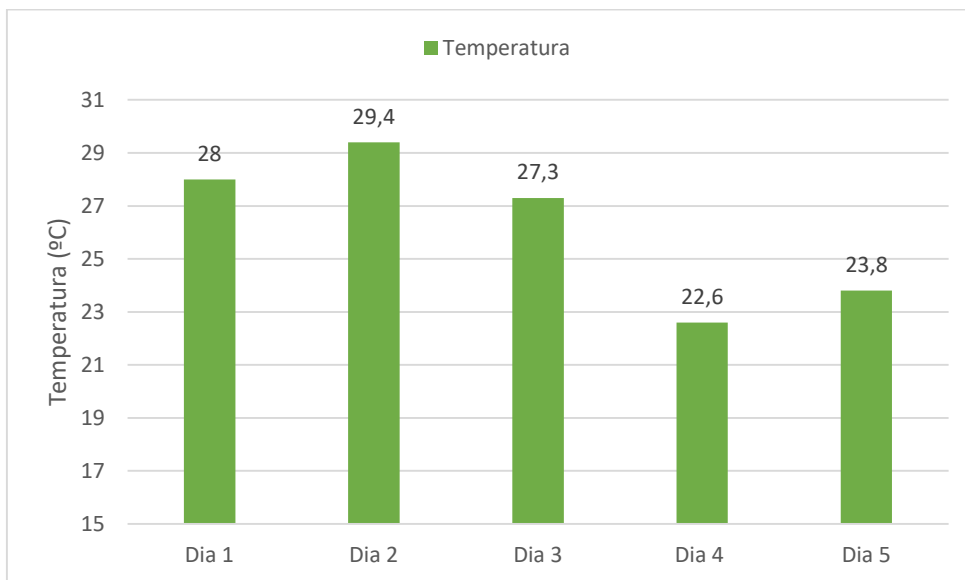
Gráfico 1 - Valores de pH inicial e final.



Fonte: Autor (2024)

Os valores de temperatura coletados anteriormente a operação, podem ser vistos no Gráfico 2 a seguir:

Gráfico 2 - Valores registrados de temperatura.

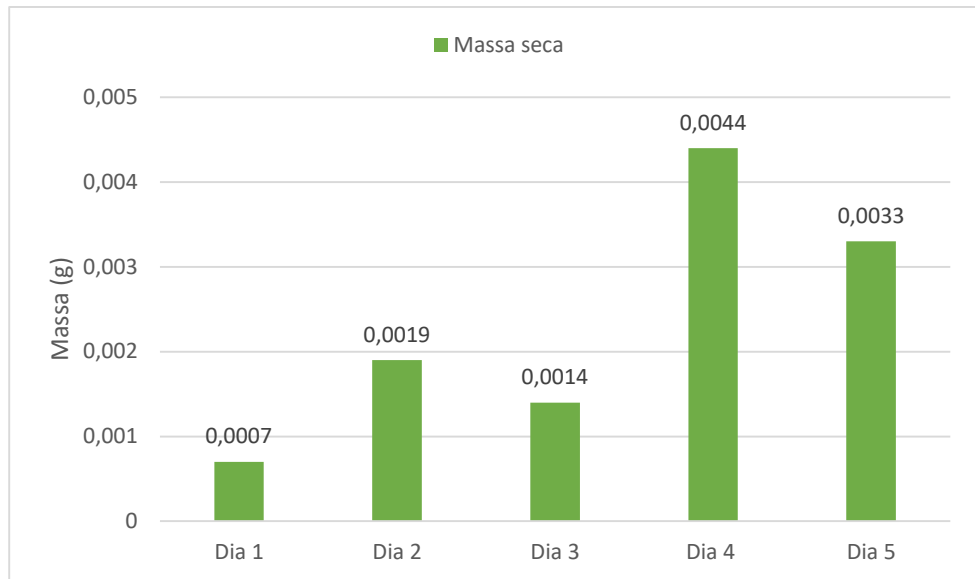


Fonte: Autor (2024)

Através dos dados de queda de pH foi possível constatar a ocorrência da difusão entre a fase gasosa e a fase líquida devido a solubilização do CO₂ e a partir da recomposição natural do sistema, verificado pelas medidas do pH antes do processo de absorção. Como não foi necessário a adição de bicarbonato de sódio, o sistema se provou viável como processo de separação. O aproveitamento do CO₂ pela biomassa se provou possível, não ignorando a dessorção do gás no tanque de microalgas (R1), mas com um bom indicativo de crescimento da colônia devido a recomposição do pH ao longo de cada dia de operação tal como observado no trabalho de Meier et al. (2017), em que o pH oscilou entre 7,6 e 7,2 se recompondo diariamente. Ao contrário, os resultados de Castro et al. (2022b) mostraram uma queda no pH inicial a cada dia indicando que o meio de cultivo não estava conseguindo uma recuperação diária do pH devido ao baixo crescimento da biomassa. Vale ressaltar que as maiores quedas de pH foram registradas nos dias mais frios, demonstrando uma dependência da temperatura no processo por conta da melhor solubilidade de gases em líquidos frios (MEIER et al., 2017).

O teste de massa seca foi conduzido para cada dia de operação através das amostras coletadas diariamente e os valores registrados para massa seca podem ser vistos no Gráfico 3 a seguir:

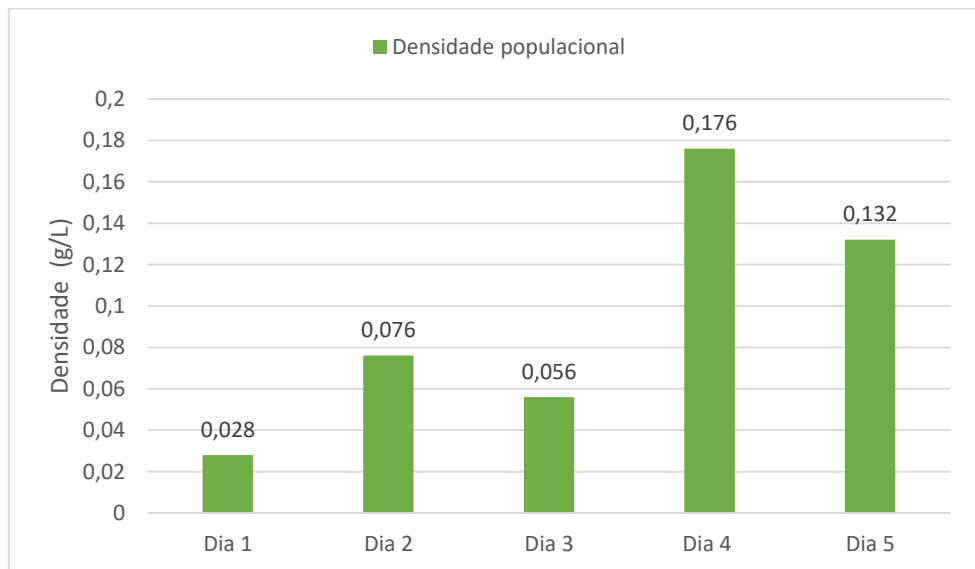
Gráfico 3 - Valores diários de massa seca.



Fonte: Autor (2024)

Como a massa seca foi calculada a partir de um volume de 25 mL, foi possível calcular a densidade populacional de cada dia para avaliar o comportamento de crescimento das microalgas. Os dados de densidade populacional podem ser vistos no Gráfico 4 a seguir:

Gráfico 4 - Valores de densidade populacional de microalgas.



Fonte: Autor (2024)

A razão de concentrações metano/dióxido de carbono foi calculada para avaliar o comportamento do sistema em relação à absorção do CO₂. Os dados da razão CH₄/CO₂ para as amostras de gás afluente e efluente, bem como a composição dos gases CH₄, CO₂ e O₂ estão dispostos na Tabela 1. Em relação à razão CH₄/CO₂ do afluente, houve um aumento para a amostra do biogás tratado, variando no intervalo entre 1,6 a 1,8. Esse

resultado indica o potencial de purificação do sistema projetado. Resultados semelhantes também foram obtidos por Bahr et al. (2014), Posadas et al. (2015), Meier et al. (2015) e Franco-Morgado et al. (2017). Conforme os dados da tabela 1 abaixo, apenas o dia 5 apresentou uma razão CH₄/CO₂ inferior a 1,5 indicando um comportamento mostrado por Castro et al. (2022b) em que a partir de um tempo de operação as razões CH₄/CO₂ do gás efluente começam a decair em relação aos primeiros tratamentos, inclinando para uma razão CH₄/CO₂ do gás efluente menor que nos primeiros dias, mas consistente. Cabendo mais análises para avaliar esse comportamento para o processo em batelada

Em relação à composição do efluente, a queda observada na composição do metano e outros compostos pode ser atribuída à diluição do gás na presença do ar, dado que o volume de amostra não foi o suficiente para purgar o ar contido no equipamento, problema esse que não é enfrentado em colunas de absorção em regime contínuo e com grandes volumes de gás, além do O₂ que pode ser gerado no líquido absorvente e transferido para a corrente gasosa a dadas vazões de líquido e concentração de oxigênio dissolvido (Bahr et al., 2014).

Esse comportamento não foi visto no trabalho de Posadas et al. (2015) e Franco-Morgado et al. (2021). Na Tabela 1 a seguir é possível ver os valores de concentrações iniciais dos compostos químicos na mistura do biogás afluente e os valores de concentração finais dos compostos químicos na mistura do biogás efluente além da razão [CH₄]_I/[CO₂]_I e [CH₄]_F/[CO₂]_F.

Tabela 1: Dados de composição inicial e final e razão inicial e final

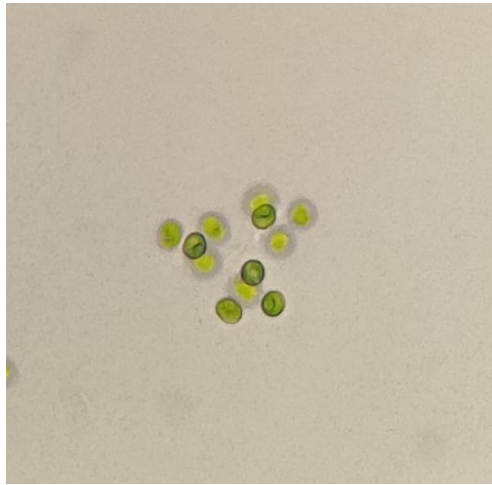
Dia	[CH ₄] _I (%)	[CO ₂] _I (%)	[O ₂] _I (%)	Razão [CH ₄] _I /[CO ₂] _I	[CH ₄] _F (%)	[CO ₂] _F (%)	[O ₂] _F (%)	Razão [CH ₄] _F /[CO ₂] _F
1	45	45	0,9	1	28	17,5	11,2	1,6
2	45	45	0,9	1	31	20	10	1,6
3	45	45	0,9	1	24	13	12,2	1,8
4	45	45	0,9	1	29	16	10,5	1,8
5	45	45	0,9	1	33	25	8,3	1,3

Fonte: Autor (2024)

Através da análise microscópica inicial do consórcio de microalgas foi possível constatar a presença de 3 grupos predominantes, uma espécie do gênero *Mucidosphaerium*, a espécie *Kirchneriella obesa*, e a espécie *Desmodesmus opoliensis*,

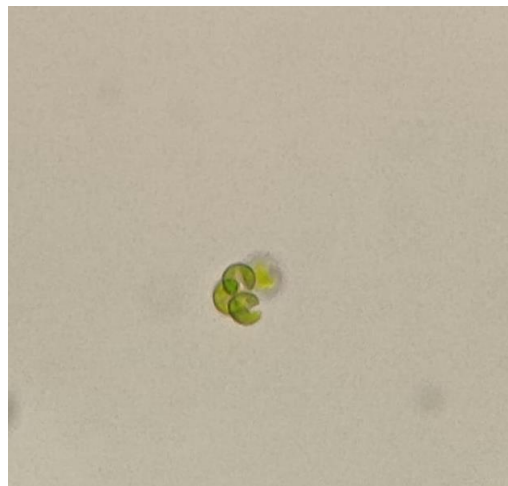
elas podem ser vistas nas Figuras 22 a 24 a seguir:

Figura 22 - Espécie do gênero *Mucidosphaerium*.



Fonte: Autor (2024)

Figura 23 - *Kirchneriella obesa*.



Fonte: Autor (2024)

Figura 24 - *Desmodesmus opoliensis*.



Fonte: Autor (2024)

A importância do cultivo prévio é ressaltada na execução do projeto para se manter a colônia em fase de crescimento exponencial (CASTRO et al., 2022b) pois no momento de coleta da biomassa no biotério a cultura estava translúcida quase transparente apresentando pequena densidade de algas por conta da condição do inverno, porém com a ambientação e alimentação periódica, além do regime luminoso, o crescimento e uso foram potencializados. Na análise microscópica posterior à operação, foi constatada a manutenção das espécies encontradas na primeira análise, reforçando a hipótese inicial da coleta de que o ambiente onde as algas se encontravam anteriormente, já seria resistente a pHs básicos, a incidência de biogás por conta da decomposição anaeróbia que poderia ocorrer no local, e da resistência das microalgas à concentração de matéria orgânica adicionada, abrindo a hipótese de serem mixotróficas, fatores esses que melhoram o processo (BOSE et al., 2019)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do projeto, planejamento e construção do sistema de purificação de biogás por absorção, foi possível experienciar todas as etapas de um projeto de engenharia, desde a escolha dos materiais até as técnicas de construção necessárias para uma boa montagem, estanque e fixa mitigando problemas mecânicos e hidráulicos, a dinâmica de se pensar em todos os problemas possíveis e cabíveis abre os olhos do profissional para uma grande variedade de problemas a se enfrentar e soluções para escolher, dado a limitações de materiais, técnicas e acessórios certas decisões precisam ser tomadas dadas as circunstâncias e limitações impostas pela infraestrutura, e o papel do engenheiro solucionador de problemas se mostra nessas horas onde o conhecimento e a criatividade é usada para construir e operar equipamentos dados as circunstâncias operacionais.

Com os resultados obtidos, foi possível constatar a real possibilidade de solubilização e separação do CO₂ usando uma cultura de microalgas em meio alcalino. O crescimento das microalgas também mostrou um bom indicador de que a técnica de cultivo aliada com a difusão de biogás no meio gerou um ecossistema favorável para o crescimento da biomassa indicando que a amostra coletada é favorável a resistir ao processo e continuar crescendo no meio não dispensando a atenção necessária para manter as condições favoráveis a vida da biomassa.

A ideia da construção e da montagem favorece e da partida a ideia da construção de equipamentos para o ensino prático da engenharia química e ciências afins, servindo de base para alunos de todas as redes de ensino experienciarem a aplicação de fundamentos das ciências e analisarem os problemas reais da construção e operação de um equipamento.

O sistema se provou operacional, oferecendo também a liberdade de certas mudanças como o fluido utilizado, mudança de vazões, configurações de fluxo, tempo de residência e regime luminoso, e também apresenta muitas possibilidades para uso no ensino para demonstrar diferentes operações unitárias como bombeamento, absorção e adsorção, além de conhecimentos a respeito de cinética química, bioquímica e metabolismo celular.

REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, N., BOIVIN, S. A review of biogas purification processes. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 3, n. 1, p. 42-71, jan. 2009.

ALMEIDA, J. N. S. ., & RIZZATTO, M. L. . (2022). Biogás de vinhaça: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, 15(6).

ANDERSON, T. R., HAWKINS, E., JONES, P. D. CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. **Endeavour**, Londres, v. 40, n. 3, p. 178-187, jul./set. 2016.

BAHR, M., DÍAZ, I., DOMINGUEZ, A., GONZÁLEZ SÁNCHEZ, A., MUÑOZ, R. Microalgal-biotechnology as a platform for an integral biogas upgrading and nutrient removal from anaerobic effluents. **Environmental Science and Technology**, v. 48, n. 1, p. 573-581, jan. 2014.

BASU, S., KHAN, A. L., CANO-ODENA, A., LIU, C., VANKELECOM, I. F. J. Membrane-based technologies for biogas separations. **Chemical Society Reviews**, v. 39, n. 2, p. 750-768, fev. 2010.

BOSE, A., LIN, R., RAJENDRAN, K., O'SHEA, R., XIA, A., MURPHY, J. D. How to optimise photosynthetic biogas upgrading: a perspective on system design and microalgae selection. **Biotechnology Advances**, v. 37, n. 8, p. 1-12, 2019.

BUDZIANOWSKI, W. M. A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1148-1171, jan. 2016.

CAILLOT, V. A., FRANCISCO, A. C. De., KOVALESKI, J. L., SILVA, C. B., SOUZA, T. De. O potencial de geração de biogás a partir de efluentes industriais: uma revisão bibliográfica. **Revista Espacios**, Caracas, v. 37, p. 1, jan. 2016.

CASTRO, A. A., KONRAD, O., MARDER, M., FILHO, M. G. Cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais: revisão de literatura. **Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology**, v. 6, n. 2, p. 60-71, 2020.

CASTRO, A. A., JUNGES, E. L., MARDER, M., MÖRS, J., KONRAD, O. Dessulfurização de biogás por processo fotossintético com microalgas e absorção por lavagem com água. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, p. e388111032891, out. 2022a.

CASTRO, A. A., HORN, B. C., BECKER, C. M., OLIVEIRA, G., KONRAD, O. Purificação biológica de biogás por processo fotossintético utilizando microalgas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e228111335327, 2022b.

CESÁRIO, M. T., DA FONSECA, M. M. R., MARQUES, M. M., DE ALMEIDA, M. C. M. D. Marine algal carbohydrates as carbon sources for the production of biochemicals and biomaterials. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 3, p. 798-817, maio/jun. 2018.

DOBRE, P., NICOLAE, F., MATEI, F. Main factors affecting biogas production-an overview. **Romanian Biotechnological Letters**, v. 19, n. 3, 2014.

DE AZEVEDO, T. R., COSTA JUNIOR, C., BRANDÃO JUNIOR, A., CREMER, M. dos S., PIATTO, M., TSAI, D. S., et al. SEEG initiative estimates of Brazilian greenhouse gas emissions from 1970 to 2015. **Sci Data**, Londres, v. 5, p. 180045, mar. 2018.

DEVAI, I., DELAUNE, R. D. Effectiveness of selected chemicals for controlling emission of malodorous sulfur gases in sewage sludge. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 23, n. 3, p. 319-329, 2002.

FIGUEIREDO, D. M., ABREU, F., ARISMEL, R., BOLOY, M. Energy analysis of bioenergy generation from biogas. **Revista Tecnologia & Cultura**, v. 33, p. 62-69, 2019.

GEADA, P., VASCONCELOS, V., VICENTE, A., FERNANDES, B. Microalgal biomass cultivation. **Algal Green Chemistry**, p. 257-284, 2017.

JOALE, P. C., RICARDO, P. F., MEDINA, T. G. I. Sizing of electric power generation systems from biogas through the generator staggering methodology. **SN Applied Sciences**, Nova York, v. 2, p. 215, fev. 2020.

KHAN, M. U., LEE, J. T. E., BASHIR, M. A., DISSANAYAKE, P. D., OK, Y. S., TONG, Y. W., SHARIATI, M. A., WU, S., AHRING, B. K. Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Nova York, v. 149, p. 111343, jan. 2021.

MACHADO, G. B. Formas de uso do biogás. Disponível em: <https://portaldobiogas.com/formas-de-uso-do-biogas/>. Acesso em: 23 jun. 2023.

MASOJÍDEK, J.; KOBLÍŽEK, M.; TORZILLO, G. Photosynthesis in Microalgae. In: RICHMOND, Amos (Ed.). Handbook of microalgae culture: **Biotechnology and applied phy-cology**. Blackwell Publishing, 2003. Cap. 2, p. 20-39.

MEIER, L.; BARROS, P.; TORRES, A.; VILCHEZ, C.; JEISON, D. Photosynthetic biogas upgrading using microalgae: effect of light/dark photoperiod. **Renewable Energy**, 2017.

NOVAK, A. C.; SCHNEIDER, A. H.; SIMÃO, C. A. F.; FRÖHLICH, C. E.; SYDNEY, E. B.; BOSCH, E.; LOFHAGEN, J. C. P.; BAZZO, J.; WILDAUER, L. D. B. S.; MAKISHI, L. M. M.; SOUZA, M. de; STUMM, M. G. Oportunidades da cadeia produtiva de biogás para o Estado do Paraná. Curitiba: **SENAI/PR**, 2016.

PETER, J.; SCHNURR, D.; GRANT, A. Factors affecting algae biofilm growth and lipid production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 418-429, 2015.

PIGOSSO, A.; KUNZ, A.; DO AMARAL, A. C.; WUADEN, C. R.; BARROS, E. C.; ANTES, F. G.; BORTOLI, M.; DA SILVA, M. L. B.; DE PRÁ, M. C.; MEZZARI, M. P.; STEINMETZ, R. L. D.; NICOLOSO, R. S. In: KUNZ, A.; DO AMARAL, A.; STEINMETZ, R. L. D. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 2ª Edição. Concórdia: EMBRAPA, 2019. P. 69-93

- PIROLI, M.; SILVA, M. L. B.; MEZZARI, M. P.; MICHELON, W.; PRANDINI, J. M.; MOREIRA SOARES, H. Methane production from a field-scale biofilter designed for desulfurization of biogas stream. **Journal of Environmental Management**, v. 177, p. 161-168, 2016.
- POSADAS, E.; SZPAK, D.; LOMBÓ, F.; DOMÍNGUEZ, A.; DÍAZ, I.; BLANCO, S.; GARCÍA-ENCINA, P. A.; MUÑOZ, R. **Journal of Applied Phycology**, v. 28, n. 4, p. 2147-2157, 2016.
- POSADAS, E.; SEREJO, M. L.; BLANCO, S.; PÉREZ, R.; GARCÍA-ENCINA, P. A.; MUÑOZ, R. Minimization of biomethane oxygen concentration during biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors. **Algal Research**, v. 12, p. 221-229, 2015.
- POURKARIMI, S.; HALLAJISANI, A.; ALIZADEHDAKHEL, A.; NOURALISHAHI, A. Biofuel production through micro- and macroalgae pyrolysis – A review of pyrolysis methods and process parameters. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 142, 2019.
- ROSHA, P.; DHIR, A.; MOHAPATRA, S. K. Influence of gaseous fuel induction on the various engine characteristics of a dual fuel compression ignition engine: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 82, p. 3333-3349, fev. 2018.
- RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. In: **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1633-1645, 2011.
- SCHNURR, P. J.; ALLEN, D. G. Factors affecting algae biofilm growth and lipid production: A review. In: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 418-429, 2015.
- SCHOLZ, M.; MELIN, T.; WESSLING, M. Transforming biogas into biomethane using membrane technology. In: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 17, p. 199-212, 2013.
- SOREANU, G.; ASACHI, G.; FALLETTA, P.; CANADA, E.; SYED, M.; BÉLAND, M. Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes: A review. 2006.
- SUBRAMANIAM, Y.; MASRON, T. A. The impact of economic globalization on biofuel in developing countries. **Energy Conversion and Management: X**, Amsterdã, p. 100064, dez. 2020.
- SEREJO, M. L.; POSADAS, E.; BONCZ, M. A.; BLANCO, S.; GARCÍA-ENCINA, P. A.; MUÑOZ, R. Influence of biogas flow rate on biomass composition during the optimization of biogas upgrading in microalgal-bacterial processes. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 5, p. 3228-3236, mar. 2015.
- SUN, Q.; LI, H.; YAN, J.; LIU, L.; YU, Z.; YU, X. Selection of appropriate biogas upgrading technology: a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. In: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 521-532, 2015.
- SUPARMANIAM, U.; LAM, M. K.; UEMURA, Y.; LIM, J. W.; LEE, K. T.; SHUIT, S. H. Insights into the microalgae cultivation technology and harvesting process for biofuel production: A review. In: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, 2019.

TOLEDO-CERVANTES, A.; MADRID-CHIRINOS, C.; CANTERA, S.; LEBRERO, R.; MUÑOZ, R. Influence of the gas-liquid flow configuration in the absorption column on photosynthetic biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors. **Bioresource Technology**, v. 225, p. 336-342, 2017.

UNEP. As emissões de metano estão impulsionando a mudança climática. Veja como reduzi-las. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/emissoes-de-metano-estao-impulsionando-mudanca-climatica-veja>. Acesso em: 16 jun. 2023.

WAYNE, C. K.; REEN, C. S.; SHOW, P. L.; JIUN, Y. Y.; CHUAN, L. T.; CHANG, L. Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 91, p. 332-344, 2018.

WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E.; RORRER, G. L. **Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer**. 5ª Edição, 2008.

ZANK, J. C. C.; BRANDT, L. S.; BEZERRA, R. C.; PEREIRA, E. N. The characteristics of biogas and evaluation of fuel substitution. **Exacta**, v. 18, p. 502-516, 2020.

ZHAN, J.; RONG, J.; WANG, Q. Mixotrophic cultivation, a preferable microalgae cultivation mode for biomass/bioenergy production, and bioremediation, advances and prospect. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 12, p. 8505-8517, 2017.

ZHAO, Q.; LEONHARDT, E.; MACCONNELL, C.; FREAR, C.; CHEN, S. Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion.

ZHUANG, L. L.; YU, D.; ZHANG, J.; LIU, F.; FEI, W.; WU, Y. H.; ZHANG, T. Y.; DAO, G. H.; HU, H. Y. The characteristics and influencing factors of the attached microalgae cultivation: A review. In: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 1110-1119, 2018