



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO

**PROCESSO BIOLÓGICO DE PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS
DO CULTIVO DE MICROALGAS**

Estevan Luiz Junges

Lajeado, junho de 2021

Estevan Luiz Junges

**PROCESSO BIOLÓGICO DE PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS
DO CULTIVO DE MICROALGAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para obtenção do grau de Mestre em Ambiente e Desenvolvimento, área de concentração Espaço, Ambiente e Sociedade e linha de pesquisa Tecnologia e Ambiente

ORIENTADOR: Prof. Dr. Mont. Odorico Konrad

Lajeado, junho de 2021

Estevan Luiz Junges

PROCESSO BIOLÓGICO DE PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS DO CULTIVO DE MICROALGAS

A Banca examinadora abaixo aprova a Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Mestre em Ambiente e Desenvolvimento na área de concentração Tecnologia e Ambiente:

Prof. Dr. mont. Odorico Konrad – Orientador
Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

Profa. Dra. Vanusca Dalosto Jahno
Universidade Feevale

Profa. Dra. Lucélia Hoehne
Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

Prof. Dr. Hans Fröder
Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

Lajeado, junho de 2021

Dedico esse trabalho à memória de meu pai, Elton, que sempre me mostrou a importância de estudar e fez com que eu nunca desistisse desse caminho.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo à minha família, principalmente minha mãe, Ledir, por sempre me apoiar e me incentivar nos estudos. Agradeço a minha avó, Nelly, que vibra muito com cada conquista de seus netos e netas. Estendo o agradecimento aos meus padrinhos, Pedro e Iara, e ao meu amigo Bruno Petter, que estão sempre ao meu lado.

Agradeço imensamente ao meu orientador, o professor Odorico Konrad. Com a sua personalidade agitada me animou desde o primeiro dia até a conclusão, sempre vendo o lado positivo dos fatos e me incentivando a continuar.

Gostaria de agradecer à Munique Marder e a toda equipe do Centro de Pesquisa em Energias e Tecnologias Sustentáveis (CPETS) pelo apoio na execução do projeto, sempre disponíveis a ajudar. Agradeço também os demais setores da Univates que também me auxiliaram nessa caminhada.

Agradeço aos membros da banca por disponibilizarem esse precioso tempo para avaliar e dar sugestões ao meu trabalho.

Por fim, agradeço aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento. Com todos eles tive ótimos momentos, seja em sala de aula, laboratórios ou saídas de campo. A troca de experiência e conhecimentos com certeza enriqueceram muito a minha formação.

RESUMO

O biogás é uma fonte de energia limpa, renovável e de baixo custo com grande potencial a ser explorado, principalmente em regiões com intensa atividade agropecuária, como Vale do Taquari. Além disso, a ampliação da utilização do biogás vai ao encontro às metas do Objetivo do Desenvolvimento Sustentável de número 7 da Agenda 2030. O biogás é produzido através da digestão anaeróbica de biomassa e tem como principais componentes: CH₄, CO₂, N₂, H₂O, O₂ e H₂S. A presença do dióxido de carbono (CO₂) acarreta a diminuição do poder calorífico do biogás, elevando os custos de compressão e transporte, logo, é desejável a sua remoção, assim como a do sulfídrico (H₂S), que causa corrosão nas estruturas de armazenagem, transporte e em geradores. Processos como absorção físico-química, separação por membrana e *pressure-swing adsorption* (PSA) são tradicionalmente utilizados para realizar a remoção destes componentes, porém, necessitam de quantidade considerável de energia, materiais auxiliares e químicos, além de gerarem resíduos e efluentes que necessitam de tratamento. Pesquisas recentes vêm demonstrando o potencial da utilização de microalgas para realizar a filtragem do biogás. O cultivo de microalgas é um processo biológico, capaz de realizar a captura do CO₂ e do H₂S do biogás e possui impacto ambiental e custo menores do que os processos citados anteriormente. Este trabalho teve como objetivo verificar a viabilidade técnica da utilização de microalgas para a purificação do biogás. Para isso, foi projetado e executado um protótipo de reator de cultivo de microalgas, onde foi filtrado biogás. O sistema construído foi um fotobiorreator de 2 estágios, composto por um tanque de cultivo e uma coluna de transferência de massa, onde o biogás entra em contato com o meio de cultivo. As análises mostraram que o protótipo construído removeu em média 16,98% de CO₂ do biogás. Em relação ao H₂S foi removido em média 85,48% para baixas concentrações e 39,5% para altas. Os níveis de O₂ não passaram de 0,05%. O sistema de purificação biológica se mostrou viável e futuros estudos podem aumentar a sua capacidade de remoção e de cultivo de microalgas.

Palavras-chave: Biogás. Energias Renováveis. Microalgas. Purificação de Biogás.

ABSTRACT

Biogas is a clean, renewable, and low-cost energy source with great potential to be explored, principally in regions with intense agriculture activity, like Vale do Taquari. Besides, the increasing of biogas use contributes to the objectives of Sustainable Development Goals number 7 from the 2030 Agenda. Biogas is produced by anaerobic digestion of biomass and its main components are: CH₄, CO₂, N₂, H₂O, O₂ e H₂S. The presence of carbon dioxide (CO₂) results in the reduction of the calorific power of the biogas, elevating the costs of compression, transportation, and storage, thus, its removal is desirable, just like sulfidric acid (H₂S), that causes corrosion on metallic structure of storage, transportation and generators. Currently process like physical-chemical absorption, membrane separation and pressure-swing adsorption are used, but they can have high energy demand or generate effluents. Recent studies show the potential of microalgae cultivation for biogas upgrade. Microalgae cultivation is a biological process that can capture CO₂ and H₂S from biogas and has lower environmental impacts and costs than the traditional methods. This study was aimed to verify the technical viability of biogas upgrading via microalgae cultivation. It was projected and built a 2-stage system, with a tank photo-bioreactor and a mass-transferred column, where the CO₂ and H₂S present in biogas is transferred to the microalgae culture. Analysis showed that the system was able to reduce 16,98% of the CO₂ from biogas. It also removed 85,5% of the H₂S for low concentrations and 39,5% for high concentrations. The O₂ levels did not exceed 0,05%. The results shows that the system built can upgrade biogas and has satisfactory efficiency in H₂S removal but need further improvements in the CO₂ removal.

Keywords: Biogas. Biogas. Purification. Microalgae. Renewable Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tendência de indicadores ambientais de preocupação	19
Figura 2 - Aumento da temperatura global entre 1880 e 2016.....	20
Figura 3 - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (Agenda 2030)	23
Figura 4 - Oferta Interna de Energia no Brasil em 2020	24
Figura 5 - Detalhamento da participação de outras energias renováveis no Brasil 2020.....	25
Figura 6 - Representação esquemática da produção de biogás	28
Figura 7 - Diagrama esquemático das etapas do processo da digestão anaeróbia.....	30
Figura 8 - Processo de Purificação por Membrana.....	33
Figura 9 - Esquema de Coluna de Lavagem com Água	36
Figura 10 - Esquemático de um reator aberto.....	40
Figura 11 - Esquemático de fotobiorreator de (A) um estágio e (B) dois estágios	41
Figura 12 - - Fotobiorreator em bag, nos trabalhos de (A) Ouyang et al. (2015) e (B) Yan et al. 2016.	42
Figura 13 - Diagrama do reator HomeBiogas 2.0	50
Figura 14 - Reatores para produção de biogás	51
Figura 15 - Local de coleta das microalgas	52
Figura 16 - Microscópio utilizado para visualização das microalgas.....	52
Figura 17 - Microscopia das microalgas coletadas.....	53
Figura 18 - Esquemático do Protótipo.....	54
Figura 19 - Medidor de volume de gás.....	55
Figura 20 - Tanque do reator, vazio	56
Figura 21 - Filtro para bomba (A) e termostato (B)	56
Figura 22 - Coluna de transferência de massa	57
Figura 23 - Bombas e circuito de acionamento	58
Figura 24 - Protótipo de fotobiorreator em operação	58
Figura 25 - Sensor de Metano Advanced Gasmittter (PRONOVA).....	59
Figura 26 - Laboratório móvel.....	60
Figura 27 - Cromatógrafo Gasoso Clarus 580 GC (PerkinElmer)	61
Figura 28 – Quantidade de CH ₄ e CO ₂ em função do tempo – Ensaio 1.....	65
Figura 29 - Quantidade de CH ₄ e CO ₂ em função do tempo - Ensaio 2.....	66
Figura 30 - Quantidade de CH ₄ e CO ₂ em função do tempo - Ensaio 3.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Compilação de protótipos avaliados	45
Quadro 2 - Detalhamento do Cromatógrafo Gasoso utilizado para análise da composição do biogás.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferença de entrada e saída de CH ₄ e CO ₂	64
Tabela 2 - Diferença de CH ₄ e CO ₂ em função do tempo – Ensaio 1	65
Tabela 3 - Diferença de CH ₄ e CO ₂ em função do tempo – Ensaio 2	66
Tabela 4 - Diferença de CH ₄ e CO ₂ em função do tempo - Ensaio 3	67
Tabela 5 - Diferença de H ₂ S em mistura de gás padrão	69
Tabela 6 - Diferença de H ₂ S em função do tempo - Ensaio 1	70
Tabela 7 - Diferença de H ₂ S em função do tempo - Ensaio 2	70

LISTA DE ABREVIATURAS

AGV: Ácidos Graxos Voláteis
ANP: Agência Nacional do Petróleo
CLP: Controlador Lógico Programável
CO₂: Dióxido de Carbono
CH₄: Metano
DFC: Detector Fotométrico de Chama
ETE: Estações de Tratamento de Efluentes
GEE: Gases do Efeito Estufa
H₂O: Água
H₂S: Sulfídrico
N₂: Nitrogênio
N₂O: Óxido Nitroso
O₂: Oxigênio
ODS: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OIE: Oferta Interna de Energia
ONU: Organização das Nações Unidas
PE: Pegada Ecológica
PBB: Potencial Bioquímico de Biogás
PBM: Potencial Bioquímico de Metano
PSA: Adsorção por Variação de Pressão
TCD: Detector por Condutividade Térmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivo Geral	16
1.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Justificativa.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Crise Ambiental.....	18
2.2	Desenvolvimento Sustentável.....	21
2.3	Energias Renováveis.....	23
2.4	Biogás	26
2.4.1	Digestão Anaeróbia	29
2.4.1.1	Hidrólise	30
2.4.1.2	Acidogênese	31
2.4.1.3	Acetogênese.....	31
2.4.1.4	Metanogênese	32
2.5	Purificação do Biogás.....	32
2.5.1	Purificação por Membrana	33
2.5.2	Adsorção por Modulação de Pressão.....	34
2.5.3	Absorção Física	35
2.5.4	Absorção Química	36
2.5.5	Criogenia	37
2.6	Purificação do Biogás por Processo Biológico.....	37
2.6.1	Reator Aberto	39
2.6.2	Fotobiorreator	40
2.6.3	Principais Parâmetros de Operação	44
2.6.3.1	Iluminação	44
2.6.3.2	Temperatura.....	47
2.6.3.3	Concentração de Nutrientes.....	48
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	49
3.1	Biogás	49
3.1.1	Produção de Biogás	49
3.2	Microalgas	51
3.3	Protótipo de Fotobiorreator	53
3.4	Análise da composição do biogás.....	58
3.4.1	Medidor de metano portátil	59
3.4.2	Laboratório móvel	59
3.4.3	Cromatógrafo gasoso.....	60
3.5	Amostragem e Análise.....	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
4.1	Remoção de CO ₂	63
4.1.1	Remoção de CO ₂ em análise de cromatografia gasosa.....	63
4.1.2	Remoção de CO ₂ em função do tempo de operação	64
4.2	Remoção de H ₂ S.....	68
4.2.1	Remoção de H ₂ S em mistura de gás padrão	69
4.2.2	Remoção de H ₂ S em função do tempo de operação	69
5	CONCLUSÃO.....	72

REFERÊNCIAS 74

1 INTRODUÇÃO

O comportamento humano tem um impacto sobre o meio ambiente, evidência disso é degradação e poluição ambiental que afeta o planeta na atualidade, constituindo uma das principais preocupações mundiais (CIFUENTES-AVILA; DÍAZ-FUENTES; OSSES-OSSIS-BUSTINGORY, 2018). Nos últimos 25 anos foram constatados aumentos na temperatura média global, no desflorestamento, na emissão de gases do efeito estufa (GEE) e na extinção de espécies de vertebrados (RIPPLE *et al.*, 2017).

A crise ecológica pela qual a humanidade passa é uma crise da relação humana com o planeta Terra, e tem colocado toda a sociedade em risco, em escala global. Outro aspecto relevante da crise, relacionado com a sua origem e possível superação, é que os recursos naturais são limitados, portanto, são incompatíveis com um modelo econômico que almeja um crescimento sem fim, levando a natureza à exaustão (SOLER; DIAS, 2016).

O conceito de desenvolvimento sustentável adiciona uma dimensão de sustentabilidade ambiental ao modelo econômico de acumulação ilimitada. Essa nova forma de olhar para o desenvolvimento de uma sociedade é baseada no compromisso ético de solidariedade com a geração atual, buscando reduzir a desigualdade social, e com a geração futura, buscando atender as demandas da atualidade sem comprometer as demandas futuras (SACHS, 2008).

A Agenda 2030 foi concebida, em 2015, pela Organização das Nações Unidas (ONU), a partir do entendimento de que o desenvolvimento deve ocorrer de forma sustentável para que não prejudique as próximas gerações. Uma das áreas abordadas pela Agenda 2030 é o acesso à energia. O Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) de número 7, intitulado

“Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos”, traz metas como assegurar o acesso universal à energia confiável e de baixo custo, além de aumentar de forma significativa a utilização de energias de fonte renováveis (ONU, 2021).

Atualmente a matriz de consumo e geração de energia mundial é baseada em combustíveis fósseis, apesar dos crescentes esforços para reverter esse quadro. A utilização desses combustíveis, que ocorre desde o século XVIII, é a principal causa da emissão de gases do efeito estufa, gerando, entre outros impactos, as mudanças climáticas (NASCIMENTO; LAGE, 2019). Uma alternativa para essa situação é a utilização de fontes de energias renováveis, como a biomassa e as suas diversas tecnologias de conversão, sendo uma delas, a produção de biogás.

O biogás é um gás inflamável que pode ser utilizado como fonte de energia. Ele é produzido através da digestão anaeróbia da biomassa e se forma naturalmente em ambientes em que ocorre a decomposição de matéria orgânica sem a presença de oxigênio. Dentre as suas utilizações se destaca a queima para geração de calor, geração de energia elétrica e utilização como combustível para automóveis (KARLSSON *et al.*, 2014). O componente de interesse no biogás é o metano (CH_4) pois ele é inflamável é o principal responsável pelo poder calorífico do composto. Contudo, a composição do biogás possui algumas impurezas que diminuem o seu poder calorífico e impedem a sua utilização de forma bruta em algumas situações (ACCIOLI, 2017; MEIER *et al.*, 2018).

O biogás tem como principais componentes (em % de volume): CH_4 (40%-75%), CO_2 (25%-55%), N_2 (0%-5%), H_2O (0%-10%), O_2 (0%-2%) e H_2S (50-5000 ppm) (CEA-BARCIA *et al.*, 2018). A presença do dióxido de carbono (CO_2) acarreta na diminuição do poder calorífico do biogás, elevando os custos de compressão e transporte, logo, é desejável a sua remoção, assim como a do sulfídrico (H_2S), que causa corrosão nas estruturas de armazenagem, transporte e em geradores (KHAN *et al.*, 2018). Logo, processos que realizam a retirada dos componentes indesejados são de grande importância para a cadeia de produção do biogás.

Atualmente, diversas tecnologias são empregadas a purificação do biogás. Processos como absorção físico-química, separação por membrana e *pressure-swing adsorption* (PSA) são utilizados para realizar a remoção destes componentes, porém, necessitam de quantidade considerável de energia, materiais auxiliares e químicos, além de gerarem resíduos e efluentes que necessitam de tratamento (SRINUANPAN *et al.*, 2018).

Uma alternativa para a utilização dessas tecnologias é usar um processo biológico e, conforme Meier *et al.* (2018), pesquisas recentes vêm demonstrando o potencial da utilização de microalgas para realizar a filtragem do biogás. O cultivo de microalgas é um processo biológico, capaz de realizar a captura do CO₂ e do H₂S do biogás e possui impacto ambiental e custo menores do que os processos de separação físico-químicos tradicionais (CEA-BARCIA *et al.*, 2018).

Considerando os aspectos ambientais relacionados à produção de energia, os desafios de sustentabilidade propostos pela Agenda 2030 da ONU e a demanda de pesquisas sobre a processos biológicos de purificação do biogás, propõe-se o presente trabalho, cujos objetivos gerais e específicos estão apresentados a seguir.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente projeto é verificar a viabilidade técnica da utilização de um fotobiorreator de cultivo de microalgas no processo de purificação do biogás.

1.2 Objetivos Específicos

- 1) Desenvolver e confeccionar um protótipo de fotobiorreator para cultivo de microalgas e purificação de biogás;
- 2) Avaliar a eficiência do protótipo em remover CO₂ do biogás;
- 3) Avaliar a eficiência do protótipo em remover H₂S do biogás.

1.3 Justificativa

Dentro dos objetivos da linha de pesquisa Ambiente e Tecnologia, do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Taquari - Univates, está o desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis. Partindo deste objetivo o presente trabalho, inserido nesta linha de pesquisa, é verificar a viabilidade técnica de uma tecnologia que diminua os impactos ambientais do processo de purificação do biogás.

O processo de purificação do biogás é de grande importância pois, ao elevar o nível de metano, aumenta o seu poder calorífico, diminui a densidade relativa do gás e aumenta o índice

de Wobbe (MEIER *et al.*, 2015). Contudo, os métodos físico-químicos tradicionalmente utilizados possuem desvantagens como perdas de CH₄, alto consumo de energia, necessidade de solventes químicos e geração de subprodutos prejudiciais ao meio ambiente (CEA-BARCIA *et al.*, 2018).

A utilização de microalgas neste processo possui dois benefícios em relação aos métodos tradicionais. O primeiro é a fixação do gás carbônico nas microalgas, evitando a liberação para a atmosfera. O segundo é a possibilidade da utilização das microalgas geradas na produção de biogás, criando assim, um ciclo fechado, em que a purificação retroalimenta a produção.

Além disso, o Vale do Taquari, região onde a pesquisa esta situação, possui potencial para a produção de biogás. Segundo Konrad *et al.* (2016), a região produz anualmente cerca de 5,8 milhões de toneladas de biomassa, sendo a maior parte proveniente de dejetos suínos (44%) e de aves (34%), e o restante é dividido entre dejetos bovinos, equinos, ovinos e resíduos da agroindústria.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos teóricos relacionados aos temas abordados na pesquisa e que servirão de apoio para o desenvolvimento do projeto.

2.1 Crise Ambiental

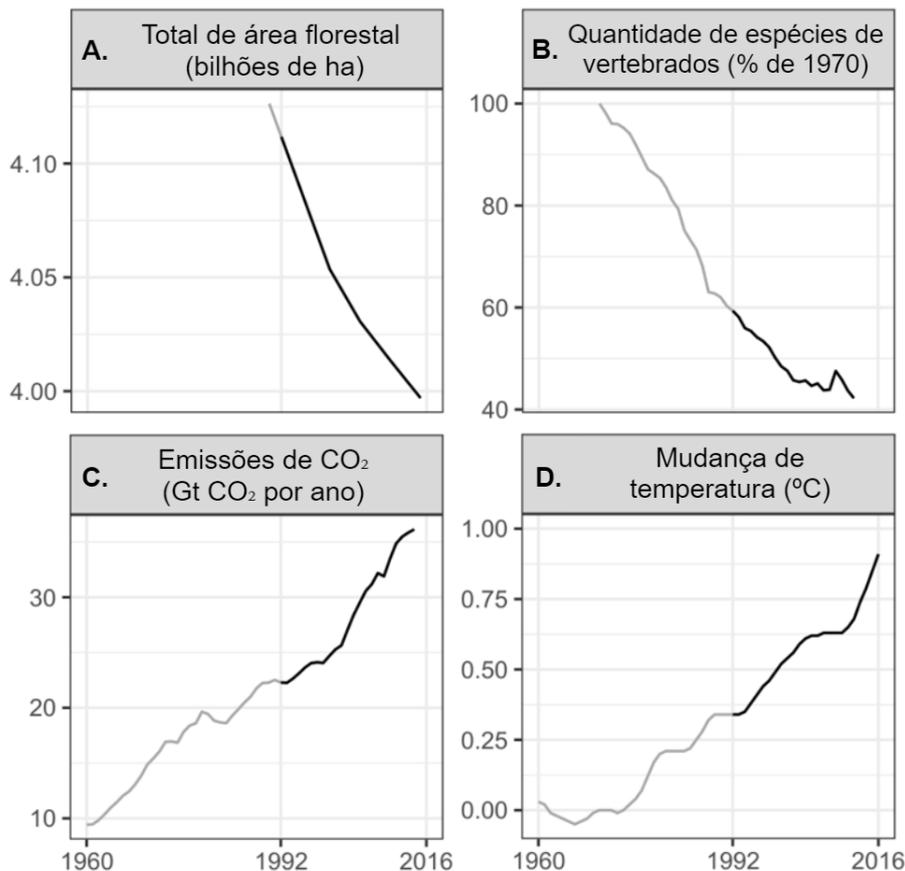
A percepção de uma problemática ambiental remonta a década de 1960, quando problemas práticos do dia a dia, de grande ou pequeno porte, junto com o crescimento da retórica ambiental deflagraram uma tomada de consciência sobre as consequências das ações humanas sobre a natureza. Em 1968 é publicado um relatório intitulado “Limites do Crescimento” pelo Clube de Roma que relaciona a degradação ambiental ao crescimento econômico, populacional e dos sistemas produtivos (SOUZA; FERNANDES, 2013). Desse período até hoje diversos encontros internacionais trataram da problemática de alinhar crescimento econômico e preservação do meio ambiente para as gerações futuras, promovendo diálogo entre líderes mundiais na busca de soluções, com destaque para a Conferência de Estocolmo (Estocolmo, 1972), Eco92 (Rio de Janeiro, 1992) e Rio+20 (Rio de Janeiro, 2012) (NACIMENTO; LAGE, 2019).

A crise ambiental que vivemos hoje é a primeira a unir dois fatores: primeiro, é causada pela atividade antrópica e, segundo, é de extensões planetárias. No percurso histórico do planeta Terra houve extinções em massa, que podem ser caracterizadas como crises ambientais de extensão globais, contudo, estas ocorreram milhões de anos antes do surgimento dos humanos. Desde o surgimento dos primeiros hominídeos também ocorreram diversas crises ambientais, porém sempre pontuais, associadas à fatores locais, por exemplo, erosão de encostas. A crise

ambiental atual, portanto, torna-se única pois associa estes dois aspectos: causada pela atividade de humanos e de extensão global (SOFFIATI, 2011).

É consenso de que as ações humanas têm gerado um impacto negativo na preservação do meio ambiente (CIFUENTES-AVILA; DÍAZ-FUENTES; OSSES-OSSIS-BUSTINGORY, 2018; SOLER; DIAS, 2016). Os efeitos particularmente mais preocupantes são as mudanças climáticas, causadas pelo aumento da emissão de GEE, desflorestamento e produção agrícola. Além disso, os humanos desencadearam um evento de extinção em massa, o sexto maior em 540 milhões de anos, em que muitas formas de vidas podem ser aniquiladas ou ameaças de extinção até o fim do século (RIPPLE *et al.*, 2017). A Figura 1 apresenta indicadores ambientais dos últimos 50 anos e é possível identificar a relação desflorestamento e diminuição do número de espécies de vertebrados e a relação entre emissão de CO₂ e o aumento global da temperatura.

Figura 1 - Tendência de indicadores ambientais de preocupação



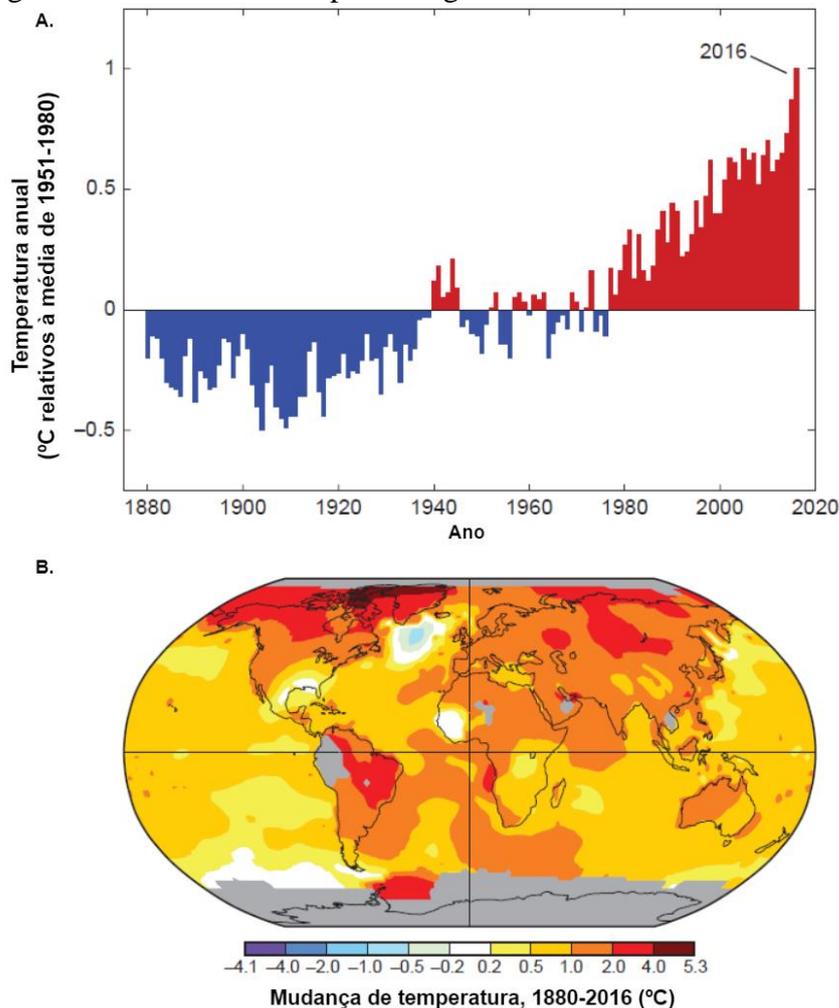
Fonte: Adaptado pelo autor com base em Ripple *et al.* (2017, p. 1027).

A humanidade, de forma geral, aprendeu muito sobre os efeitos de suas ações no meio ambiente, porém os esforços ainda estão longe de serem o suficiente para reverterem o quadro. Um exemplo positivo é a preocupação com a camada de ozônio, que foi um dos poucos

indicadores ambientais que tiveram melhoria nas últimas décadas. Todavia, a urgência de mudança de políticas ambientais, comportamento humano e das desigualdades sociais fazem com que medidas mais drásticas precisem ser tomadas (RIPPLE *et al.*, 2017). O último relatório da Organização Meteorológica Mundial aponta que em 2017 foram alcançados novos recordes de quantidade de CO₂, CH₄ e N₂O na atmosfera. Esses valores representam, respectivamente, 146%, 257% e 122% de aumento comparado ao período pré-industrial (antes de 1750) (OMM, 2018).

A Figura 2 A apresenta o aumento da temperatura média global nos últimos 150 anos, relativo à temperatura média. É possível verificar a tendência de aumento a partir da década de 1980 e que no último ano da série, 2016, ocorreu o recorde de aumento, 1 °C. Já Figura 2 B apresenta a diferença de temperatura nas diversas regiões do planeta. É possível verificar que o aumento na região ártica foi maior do que nos continentes e nos oceanos (MATHEZ; SMEADON, 2018).

Figura 2 - Aumento da temperatura global entre 1880 e 2016



Fonte: Mathez e Smerdon (2018, p. 267).

Um indicador que auxilia na compreensão da crise ambiental é a Pegada Ecológica (PE). A PE é o rasto que os seres humanos deixam no planeta a partir do consumo de recursos e a geração de rejeitos (sólidos, líquidos ou gasosos). O conceito foi criado em 1996, por Mathis Wackernagel e William Rees. Eles definiram que esse indicador representa o impacto de populações, processos ou regiões sobre a área de terra necessária para produzir os recursos naturais e assimilar os resíduos (SILVA; MARTINS, 2017). O modelo econômico atual possui uma PE de 2,2 hectares, que é cerca de 30% maior do que a PE considerada sustentável, que seria de 1,8 hectares. Dessa forma, a humanidade está em um déficit ecológico, visto que explora o planeta em taxas acima da sua capacidade de se recompor, em qualidade e quantidade, fazendo com que a situação seja insustentável a longo prazo (SOLER; DIAS, 2016).

2.2 Desenvolvimento Sustentável

Capra (1997) defende que a crise ambiental é sistêmica, e que seus efeitos não podem ser entendidos de maneira isolada, pois estão interligados, inclusive com aspectos econômicos e sociais. O autor também aponta que a saída para esta crise é uma mudança profunda nas formas de percepção e pensamento sobre o ambiente, e a principal alternativa são as soluções sustentáveis, definidas como ambientes em que as demandas e aspirações da população atual possam ser supridas de forma a não diminuir as chances das gerações futuras.

A construção de um paradigma de desenvolvimento alternativo, alinhado às questões ambientais, não só depende de transformações das condições econômicas, tecnológicas e políticas, mas também estão sujeitos a ideologias teóricas e delimitadas por paradigmas científicos que dificultam a reestruturação das práticas produtivas para um desenvolvimento sustentável. Dessa forma, colocar em prática os princípios do desenvolvimento sustentável provou ser mais complexo do que uma internalização da dimensão ambiental no modelo atual de desenvolvimento econômico. É necessário a construção de uma racionalidade ambiental, baseada em novas práticas de uso integrados de recursos, que respeite as relações sociedade-natureza (LEFF, 2000).

Sachs (2009) entende que o desenvolvimento sustentável demanda o planejamento local e participativo das autoridades locais, comunidade e associações civis e desdobra o conceito de em 8 dimensões. Cada uma dessas dimensões traz condições que devem ser satisfeitas para existir um desenvolvimento sustentável. São elas:

1. Social: alcançar um patamar de homogeneidade social, distribuição de renda, emprego pleno e igualdade de acesso a recursos;
2. Cultural: equilíbrio e respeito entre tradição e inovação. Capacidade de autonomia na elaboração de um projeto nacional integrado;
3. Ecológica: preservação do potencial do capital natural e sua capacidade de produção de recursos renováveis. Limitar o uso de recursos não-renováveis;
4. Ambiental: respeitar a capacidade de regeneração dos ecossistemas naturais;
5. Territorial: equilíbrio entre zonas urbanas e rurais, melhoria do ambiente urbano e diminuição das desigualdades inter-regionais;
6. Econômico: desenvolvimento econômico intersetorial equilibrado, capacidade de modernização contínua da produção e segurança alimentar;
7. Política Nacional: garantia da democracia e de direitos humanos, capacidade do Estado de implementar o projeto nacional e um nível mínimo de coesão social;
8. Política Internacional: garantia de paz e promoção de cooperação internacional, através da ONU. Projeto de co-desenvolvimento Norte-Sul baseado em princípios de igualdade, com o favorecimento dos mais fracos. Sistemas de cooperação científica, tecnológica e de gestão ambiental.

A partir do entendimento de que o desenvolvimento de uma determinada sociedade deve ocorrer de forma sustentável para que não prejudique as próximas gerações foi concebida pela Organização das Nações Unidas, em 2015, a Agenda 2030. Esta agenda é um plano de ação que visa um planeta mais próspero, e reconhece a erradicação da pobreza extrema como o desafio central deste grande objetivo.

O plano de ação é constituído de 17 objetivos principais, que estão apresentados na Figura 3, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, subdivididos em 169 metas. Os ODS são de amplo espectro, abrangendo áreas como igualdade de gênero, redução de desigualdades e educação de qualidade entre outras (ONU, 2021).

Figura 3 - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (Agenda 2030)



Fonte: ONU (2021, figura digital).

O ODS de número 7, intitulado Energia Limpa e Acessível, tem como objetivo assegurar a todos o acesso à energia confiável, sustentável, moderna e de baixo custo. Todas as metas desse objetivo possuem como prazo o ano de 2030 e são elas (ONU, 2021):

1. Assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia;
2. Aumentar significativamente a participação de energias renováveis na matriz energética global;
3. Dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética
4. Reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa
5. Expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos os países em desenvolvimento

2.3 Energias Renováveis

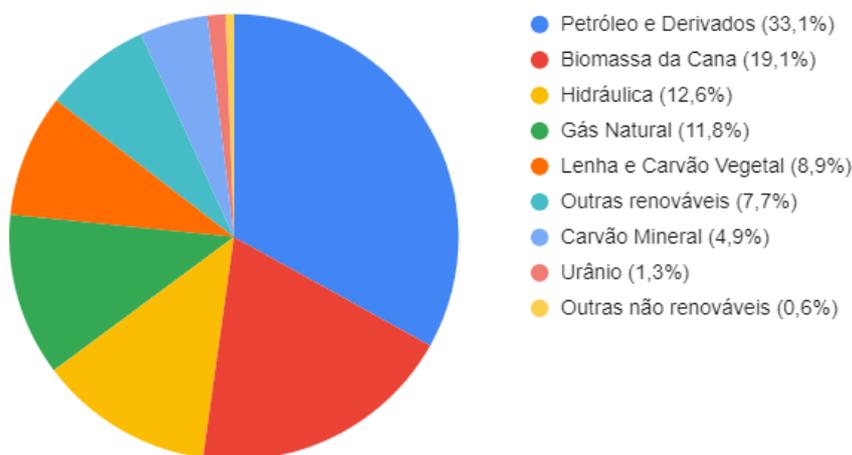
Diversas são as fontes primárias de energia que podem ser utilizadas pelo ser humano para desempenhar as suas atividades, e essas fontes podem ser divididas em renováveis e não renováveis. A diferença reside no tempo em que os recursos são naturalmente repostos. Se o

tempo de reposição de um determinado recurso é relativamente curto comparado com o tempo do seu ciclo de uso, ele é considerado renovável. Um exemplo disso é a utilização de árvores como lenha, visto que em aproximadamente sete anos é possível cultivar outra árvore e o recurso estará repostado. Os recursos ditos não renováveis, por sua vez, possuem um tempo de reposição muito maior do que o seu ciclo de uso, como o petróleo, que leva milhões de anos para ser repostado, e não estará disponível novamente para esta geração e nem para muitas gerações futuras (BIANCHI *et al.*, 2016).

Cerca de 85% da energia utilizada no mundo é proveniente de fontes não renováveis, e isso representa um grande problema, com dimensões econômicas e ambientais. É um problema econômico pois, por mais que existam ainda reservas de combustíveis fósseis suficientes para abastecer a humanidade por muitos anos, a maior parte das fontes facilmente acessíveis já estão esgotadas, fazendo com que os custos de extração fiquem cada vez mais caros com o passar dos anos (ROSA, 2015).

A Figura 4 apresenta a Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil em 2020. De acordo com os dados apresentados, o país teve 48,4% da sua energia gerada através de fontes renováveis (Biomassa da cana, hidráulica, lenha e carvão vegetal e lixo e outras renováveis) e 51,6% através de fontes não renováveis. Em comparação com o ano de 2019, houve aumento de 2,5% no uso de energias renováveis e redução de 6,2% de energias não renováveis. Isso mostra que existe espaço para o crescimento da geração de energia através de fontes renováveis.

Figura 4 - Oferta Interna de Energia no Brasil em 2020



Fonte: Adaptado pelo autor com base em EPE (2021, p. 16).

A Figura 5 apresenta o detalhamento da seção “Outras renováveis” da OIE no Brasil em 2020. Com aumento total de 7,4% em relação ao ano anterior, cabe destacar o aumento da

geração de energia solar (61,5%) e de biogás (15,7%). Esses dados reforçam o potencial de crescimento da utilização dessas fontes de energia no Brasil.

Figura 5 - Detalhamento da participação de outras energias renováveis no Brasil 2020

Outras renováveis (mil tep)	2019	2020	Δ 20 / 19
Lixívia	8.948	9.576	7,0%
Biodiesel	4.878	5.300	8,6%
Eólica	4.815	4.906	1,9%
Outras biomassas ¹	1.149	1.139	-0,9%
Solar	572	924	61,5%
Biogás	269	311	15,7%
Gás industrial de carvão vegetal	81	85	4,3%
Total	20.712	22.241	7,4%

¹ Inclui casca de arroz, capim-elefante e óleos vegetais

Fonte: EPE (2021, p. 17).

A utilização de fontes de energia não-renováveis está relacionada com os problemas ambientais enfrentados pela humanidade. O uso de combustíveis fósseis está ligado diretamente ao aumento na emissão de gás carbônico, o CO₂, para a atmosfera, intensificando o efeito estufa e consequentemente aumentando a temperatura média do planeta. As consequências deste aumento de temperatura são diversas, como o derretimento de calotas polares e o aumento dos níveis dos oceanos. Além disso, outros gases são liberados na queima de combustíveis fósseis, como o SO₂, causador de chuvas ácidas (ROSA, 2015). Uma alternativa a estes problemas é a utilização de fontes renováveis de energia.

Dentre as fontes de energias renováveis podem ser citadas a energia eólica, a energia solar, a energia hídrica e a biomassa. Biomassa é todo recurso renovável proveniente de matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que tenha potencial para produção de energia. A energia contida nas biomassas é proveniente do armazenamento de energia solar através de ligações químicas em seus componentes estruturais. Através da queima eficiente da biomassa são produzidos gás carbônico e água, logo, o processo é cíclico, caracterizando a energia proveniente da biomassa como renovável e como alternativa à diversificação da matriz energética (KONRAD *et al.*, 2016).

A biomassa pode ser classificada, de acordo com a sua origem, em biomassa de cultivos agrícolas, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar; biomassa vegetal, como a lenha; biomassa proveniente da pecuária, que são os detritos gerados pelos animais confinados e biomassa de resíduos urbanos, composta por todo o resíduo resultante de atividade antrópica (BIANCHI *et al.*, 2016).

A utilização de biomassas também pode ser dividida em uso tradicional e uso moderno. O uso tradicional é não sustentável está relacionado a um uso rústico, geralmente de uso residencial para aquecimento e cocção de alimentos. Os recursos utilizados são madeira de desflorestamento, resíduos florestais e dejetos de animais. Já a utilização moderna é sustentável e utiliza processos tecnológicos e eficientes, como a produção de biodiesel e biogás, utilização de madeira de reflorestamento e utilização do bagaço de cana em caldeiras (COELHO, 2012).

2.4 Biogás

O biogás é um gás gerado pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica, em um processo chamado de digestão anaeróbia. Neste processo, um consórcio microbiano composto por diferentes espécies de microrganismos, submetidos a um ambiente ausente de oxigênio (anaeróbio), degrada a matéria orgânica (biomassa) existente, transformando parte desta em biogás (KARLSSON *et al.*, 2014). A composição do biogás, em termos percentuais, é principalmente de metano (40-75%) e dióxido de carbono (15-60%), contudo, pode conter traços de vapor de água (5-10%), sulfeto de hidrogênio (0,005-2%), siloxanos (0-0,2%) hidrocarbonetos (<0,6%), amônia (<1%), oxigênio (0-1%), monóxido de carbono (<0,6%) e nitrogênio (0-2%) (KONRAD *et al.*, 2016).

Quando o biogás atinge teor de metano igual ou superior a 50% ele se torna um gás inflamável, podendo ser utilizado diretamente em queimadores, fornos, fogões ou para iluminação. Ainda, o biogás pode ser utilizado em motores de combustão interna, podendo tanto servir como combustível para veículos ou para a geração de energia elétrica (MAMANI, 2015). Além disso, durante o processo da digestão anaeróbia a maior parte da biomassa empregada é digerida ou degradada e o material resultante é chamado de substrato degradado. Esse subproduto pode ser utilizado como biofertilizante, fornecendo nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg) para o solo, elementos estes essenciais para o crescimento de plantas (KARLSSON *et al.*, 2014).

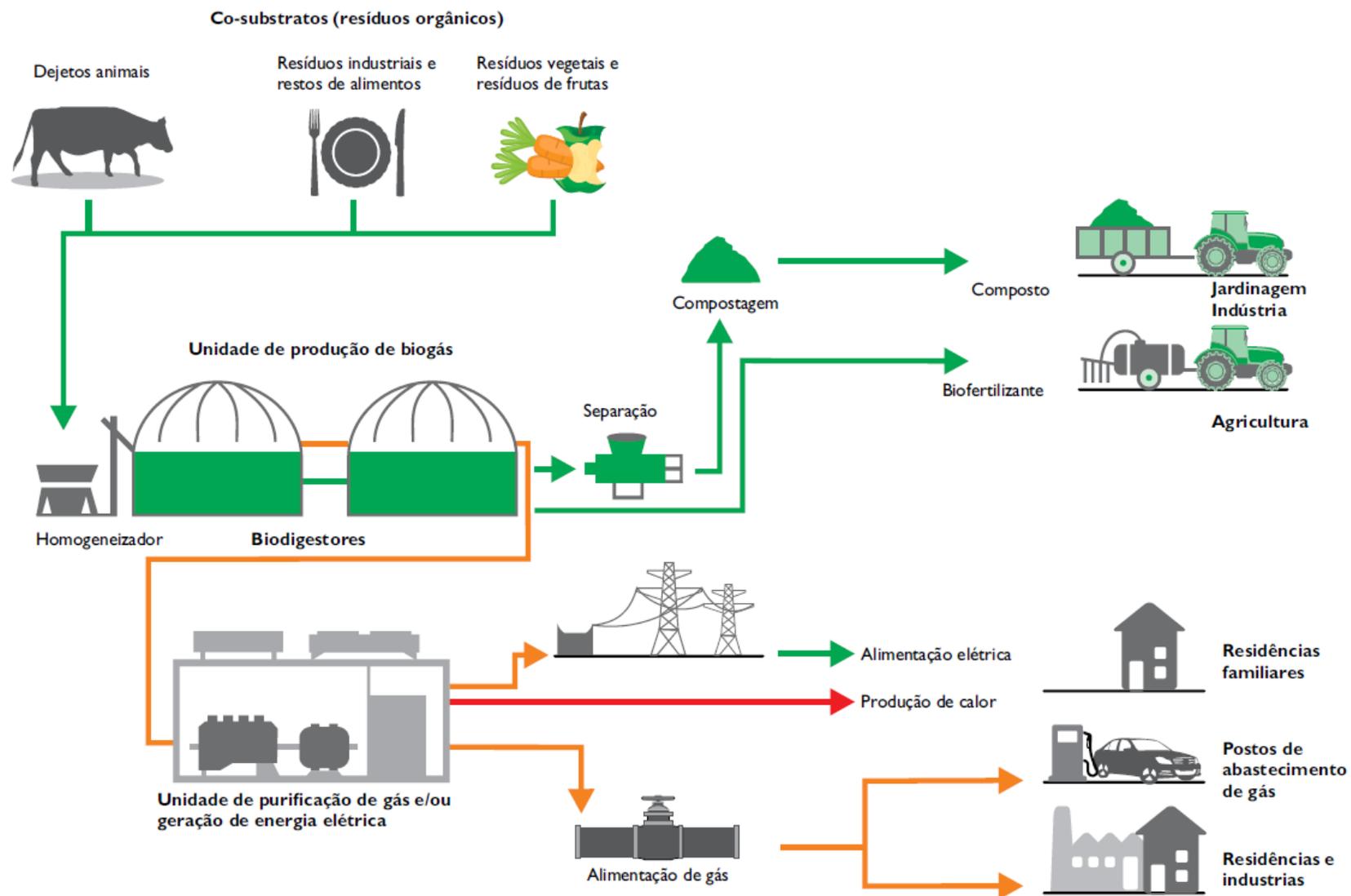
Em países emergentes, ou “em desenvolvimento”, o biogás é normalmente produzido em digestores de escala doméstica, e é utilizado principalmente para cocção e iluminação, através da queima direta. Já em países desenvolvidos, a produção do biogás está mais concentrada em reatores de grande porte, instalados em fazendas, estabelecimentos comerciais e indústrias, e a sua utilização é direcionada para a geração de energia elétrica e calor (água quente ou vapor) (SCARLAT *et al.*, 2018).

Em 2015, o Brasil possuía 127 plantas de produção de biogás, gerando cerca de 548 bilhões de metros cúbicos por ano, que representam 3835 GWh de energia. A capacidade de produção de energia elétrica com biogás cresceu consideravelmente nos últimos anos, atingindo 196 MW em 2015 e 350 MW em 2016 (SCARLAT *et al.*, 2018).

A matéria-prima para a geração do biogás é a biomassa, que compreende uma variedade de resíduos e subprodutos gerados pela atividade humana e, muitas vezes, esses materiais não podem ser descartados diretamente no ambiente e precisam passar por algum processo de digestão. Dentre alguns tipos de biomassa podemos citar: lodo de Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), resíduos de alimentos, dejetos suínos, biomassa de algas, resíduo de plantas, resíduos de indústria etc. (D'AQUINO, 2018). De acordo com Accioli (2017), qualquer biomassa biodegradável pode ser utilizada no processo de digestão anaeróbia, porém, ressalta que a presença de alguns compostos, como a lignina, são mais difíceis de serem digeridos em ambientes sem a presença de oxigênio e, por conseguinte, a composição do biogás é diretamente afetada pelo composição do substrato.

A Figura 6 mostra um esquemático da produção do biogás a partir de biomassa e da utilização dos seus subprodutos. Conforme a figura, as principais matérias-primas para a produção de biogás são dejetos de animais, resíduos industriais e restos de alimentos, de frutas e de vegetais. Após passar por um processo de homogeneização, a matéria é inserida em biodigestores, onde passa pelo processo de digestão anaeróbia, resultando em biofertilizante e biogás. O biogás então passa por um processo de purificação e pode ser utilizado para abastecimento veicular, ou ainda produção de energia elétrica e /ou calor e consequente distribuição para residências e indústrias (KONRAD *et al.*, 2016).

Figura 6 - Representação esquemática da produção de biogás



Fonte: Konrad *et al.* (2016, p. 8).

Por fim, apresentado o potencial econômico e ambiental da produção de biogás, as suas principais vantagens podem ser resumidas (ACCIOLI, 2017):

- Diminuição da utilização de combustíveis fósseis;
- Utilização como fonte renovável de energia;
- Sua queima reduz a emissão de metano;
- O seu resíduo pode ser utilizado como biofertilizante.

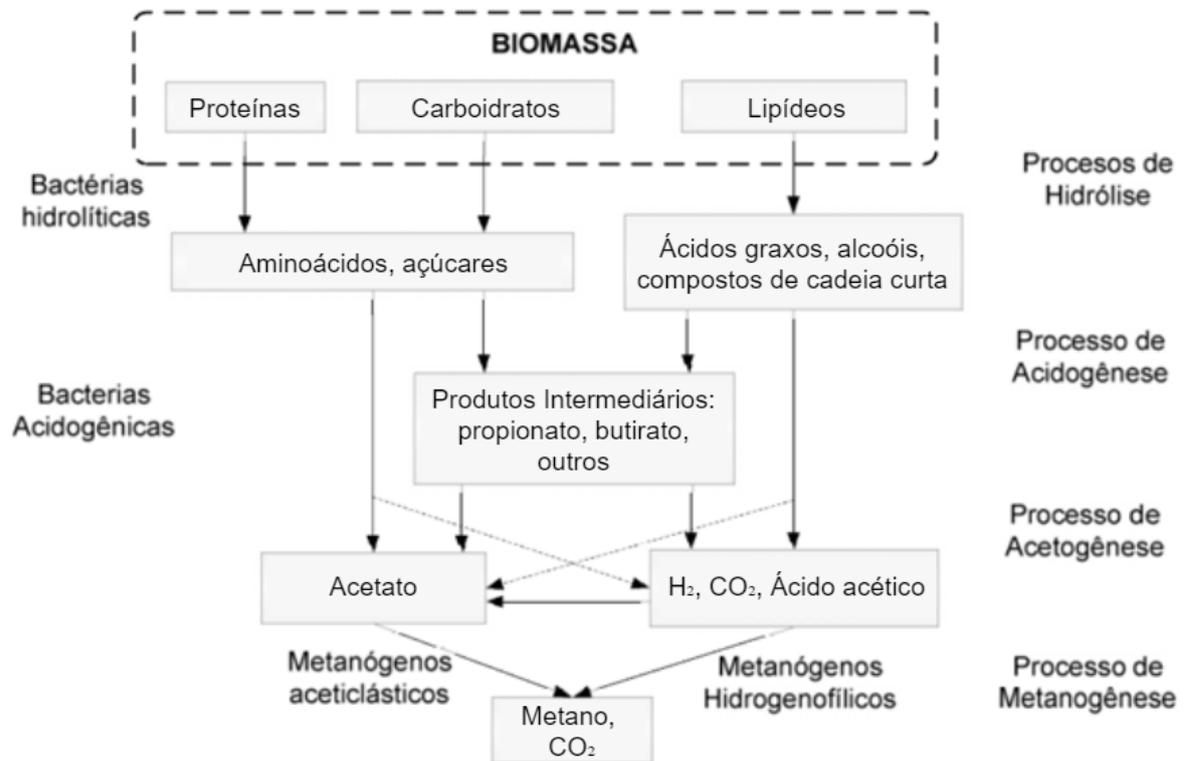
O processo da digestão anaeróbia envolve diversos fatores, tanto físico-químicos quanto biológicos. Na próxima seção serão apresentadas e detalhadas as etapas deste processo.

2.4.1 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia, também chamada de biodigestão é um processo contínuo que ocorre em ambientes com a ausência de oxigênio (por isso o nome de anaeróbia), onde diferentes agentes microbianos, chamados de consórcio microbiano, reduzem as estruturas orgânicas complexas em minerais simples (D'AQUINO, 2018). Dentre as populações microbianas envolvidas no processo, podem ser citadas: bactérias fermentativas hidrolíticas, bactérias fermentativas acidogênicas, bactérias acetogênicas e archaeas metanogênicas (MAMANI, 2015).

De forma geral, a digestão anaeróbia pode ser dividida em quatro etapas, sendo elas: hidrólise, fermentação (ou acidogênese), oxidação anaeróbia (ou acetogênese) e formação de metano (ou metanogênese) (KARLSSON *et al.*, 2014). A Figura 7 apresenta um diagrama esquemático das 4 etapas, dos microrganismos e dos compostos envolvidos. A seguir, cada uma destas etapas será detalhada.

Figura 7 - Diagrama esquemático das etapas do processo da digestão anaeróbia.



Fonte: Mamani (2015, p. 8).

2.4.1.1 Hidrólise

O processo de hidrólise é responsável por reduzir os materiais orgânicos complexos particulados, como proteínas, hidratos de carbono e lipídeos, resultando em elementos mais simples, como aminoácidos, açúcares, ácidos graxos e álcoois (MAMANI, 2015). Este processo é realizado por exoenzimas (celulases, proteases, lipases) que são excretadas pelas bactérias fermentativas (D'AQUINO, 2018).

Esta etapa é importante para o processo de geração do biogás pois é onde ocorre a quebra das moléculas orgânicas complexas que serão utilizadas com fonte de energia para os microrganismos dos processos seguintes (KARLSSON *et al.*, 2014). A eficiência deste processo é influenciada por fatores como o tamanho das partículas, o pH e a temperatura do meio, concentração de NH₄⁺-N e dos produtos de fermentação e, por fim, do tempo de retenção hidráulica e da composição do substrato (D'AQUINO, 2018).

A etapa da hidrólise é mais lenta do que as outras e acaba sendo considerada como um fator limitante pois os processos seguintes são seus dependentes diretos. Levando isso em consideração, foram desenvolvidos processos de pré-tratamento que têm o objetivo de reduzir

o tamanho das partículas presentes na biomassa e, por conseguinte, aumentar a superfície de contato com os microrganismos do consórcio, gerando um aumento significativo na produção do metano. Dentre os processos utilizados se destacam o tratamento térmico, tratamento termoquímico, moagem e tratamento por enzimas (D'AQUINO, 2018).

2.4.1.2 Acidogênese

A acidogênese é uma etapa realizada pelas bactérias fermentativas, em que os produtos gerados na etapa da hidrólise são, na sua maior parte, transformados em acetato e hidrogênio. O restante do material é transformado em ácidos graxos voláteis (AGVs) e em alcoóis de cadeia curta (D'AQUINO, 2018). As reações que ocorrem nesta etapa dependem da biomassa utilizada e dos microrganismos existentes no meio, e a maioria dos organismos que estavam ativos na etapa de hidrólise também estão ativos nesta etapa (KARLSSON *et al.*, 2014). De acordo com Mamani (2015) a etapa de acidogênese demanda energia e é possibilitada pela relação simbiótica com as etapas seguintes, reforçando o caráter contínuo do processo de digestão anaeróbia.

É durante a etapa de acidogênese que os monômeros são transformados pelas bactérias fermentativas em ácidos orgânicos, álcoois, CO₂ e H₂. Os produtos dessa etapa são influenciados pela concentração do H₂ formado: quanto maior for a pressão parcial do hidrogênio, menor será a formação de ácido acético. Nessa etapa também ocorre a mineralização das ligações orgânicas de nitrogênio e enxofre em ácido sulfídrico (H₂S) e amônia (NH₃), entretanto, caso a concentração desses subprodutos for elevada, pode ocorrer a inibição da formação de metano (COELHO, 2019).

2.4.1.3 Acetogênese

As bactérias acetogênicas possibilitam a oxidação dos produtos gerados na fase anterior (MAMANI, 2015). Durante a etapa da acetogênese as bactérias acetogênicas transformam os produtos intermediários da etapa anterior, como o propionato e o butionato, em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio (D'AQUINO, 2018; COELHO, 2019). Karlsson *et al.* (2016) destaca que as bactérias acetogênicas não são resistentes a quantidades expressivas de hidrogênio, dessa forma, é essencial a presença de bactérias metanogênicas, responsáveis pela etapa seguinte, para que consumam o hidrogênio produzido.

2.4.1.4 Metanogênese

A metanogênese é a última etapa do processo de biodigestão e é onde ocorre a formação do metano (CH_4) a partir do dióxido de carbono, hidrogênio e acetato gerado nas etapas anteriores. Esta etapa pode ser dividida em duas rotas químicas. A primeira produz cerca de 70% a partir do acetato e ácido acético, já a segunda, produz cerca de 30% do metano, utilizando o hidrogênio e o dióxido de carbono disponíveis (COELHO, 2019; MAMANI, 2015).

Os organismos atuantes na etapa da metanogênese são estritamente anaeróbios e, comparado com outros microrganismos, são altamente sensíveis às condições do meio. Esses organismos são classificados como *Archea* e vivem em simbiose com as bactérias acetogênicas. Quando esta simbiose é afetada por algum distúrbio ocorre o acúmulo de produtos intermediários, na sua maior parte ácidos, elevando o pH do meio e levando a um processo chamado de *overacidification*, afetando as bactérias acetogênicas e comprometendo o processo como um todo (D'AQUINO, 2018; KARLSSON *et al.*, 2016).

2.5 Purificação do Biogás

O componente do biogás que possui interesse econômico é o metano, gás inflamável que pode ser utilizado como fonte de energia. Contudo, na composição do biogás bruto, resultante da digestão anaeróbia, estão presentes elementos indesejados como CO_2 , H_2O , H_2S , O_2 entre outros. A presença de CO_2 diminui o poder calorífico específico do biogás e diminui o índice de Wobbe (MEIER *et al.*, 2015). Além disso, a presença de elevados níveis de H_2S , combinada com água condensada, causa corrosão em compressores, dutos, gasômetros e motores (CEA-BARCIA *et al.*, 2018).

De acordo com a Resolução N° 685 da Agência Nacional do Petróleo (ANP) (ANP, 2017), para a região Sul o biometano deve conter, no mínimo, 90% mol. de CH_4 , máximo de 0,8 % mol. de O_2 e de 3,0 % mol. de CO_2 . O H_2S não deve passar de 10 mg/m³ e o índice de Wobbe deve ser de 45.600 a 53.500.

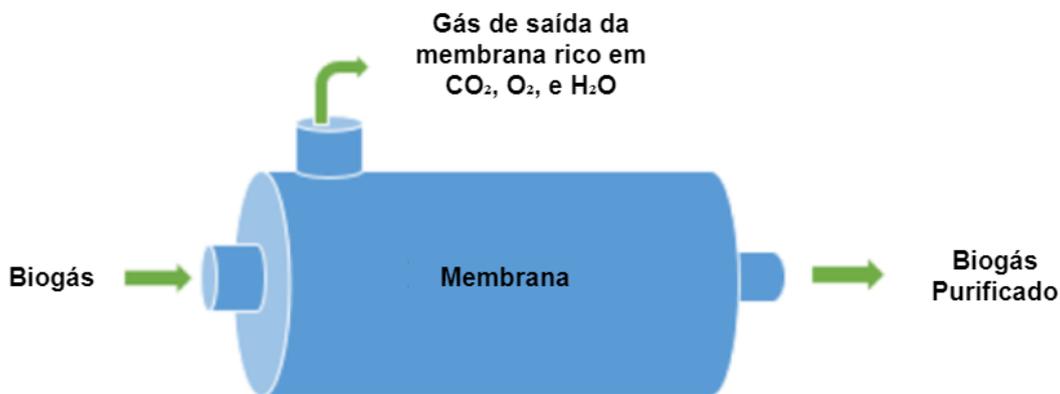
Com o objetivo de reduzir a quantidade destes elementos indesejados, o biogás pode passar por processo de purificação. Atualmente, existem diferentes tecnologias para separar o metano dos outros componentes e elas podem ser divididas em dois grupos: separação físico-

química e separação biológica (CEA-BARCIA *et al.*, 2018). Nesta seção, serão apresentados os principais processos de separação físico-química utilizados atualmente.

2.5.1 Purificação por Membrana

O processo de purificação por membrana consiste em passar o biogás por uma membrana semi-permeável, que permite a passagem de componentes como CO_2 e H_2O , contudo, componentes como CH_4 e o N_2 são retidos. A diferença de pressão entre a entrada e a saída do processo é a força motriz do sistema, logo, quanto maior essa diferença, maior será o fluxo de gás (ACCIOLI, 2017). A Figura 8 apresenta um esquemático do processo de purificação por membrana.

Figura 8 - Processo de Purificação por Membrana



Fonte: Accioli (2017, p. 44).

A separação por membrana possui diversas vantagens, como a eficiência energética, simplicidade do processo e a não necessidade de solventes químicos. Nos últimos anos essa tecnologia evoluiu consideravelmente, tanto técnica quanto economicamente (CEA-BARCIA *et al.*, 2018).

O processo de separação por membrana pode ser dividido em duas categorias: alta e baixa pressão. Os processos de alta pressão operam normalmente acima de 20 bar, e o biogás passa por diversos estágios e pode chegar a uma concentração de CH_4 superior a 96%, e os resíduos das primeiras etapas são reintroduzidos nas etapas seguintes. Esse tipo de tecnologia tem sido utilizado também na purificação de gás natural. Já os processos de baixa pressão operam em pressão semelhante à atmosférica e utilizam uma membrana microporosa

hidrofóbica e um adsorvente como NaOH ou soluções regenerativas com amina. Este processo pode alcançar concentrações de CH₄ superiores a 97% (PATTERSON *et al.*, 2011).

A capacidade de purificação deste tipo de processo está altamente relacionada ao tipo da membrana. Atualmente, os tipos de membrana mais utilizadas são poli-imida, poli-fluorocarbono, membranas baseadas em aminas, membranas baseadas em celulose e acetatos e membranas de peneira molecular de carbono (*Carbon molecular sieve membranes*) (CEA-BARCIA *et al.*, 2018).

2.5.2 Adsorção por Modulação de Pressão

O processo de purificação de biogás através de adsorção por modulação de pressão, também chamado de *pressure-swing adsorption* (PSA) é uma tecnologia versátil para separação e purificação de gases e atualmente é uma das mais utilizadas em processos industriais de separação de gás, devido à sua flexibilidade e relativo baixo custo de aquisição e consumo de energia (PATTERSON *et al.*, 2011).

O processo de adsorção por modulação de pressão ocorre de forma cíclica:

O ciclo é composto por etapas, sendo a sequência mais frequentemente utilizada a do ciclo de Skarstrom, cujas fases são: pressurização, adsorção, equalização da pressão e purga. O gás afluente entra pressurizado no leito, havendo a adsorção da molécula alvo. O aumento da pressão do sistema eleva a concentração da espécie a ser removida na superfície do adsorvente, favorecendo o processo adsorptivo. Após saturação do adsorvente, a coluna é despressurizada, iniciando a liberação do adsorbato (ACCIOLI, 2017, p. 47).

O sistema opera então de forma intermitente, entre altas pressões, em que o CO₂ e as outras impurezas são adsorvidas enquanto o CH₄ fica livre, e baixas pressões, onde o fluxo do biogás é cessado para que os materiais anteriormente fixados possam ser liberados para a purga. Como o objetivo é a separação do CH₄ (tamanho molecular de 3,8 Å) do CO₂ (3,4 Å) um material adsorvente com poros de 3,7 Å deve ser utilizado, dessa forma o CO₂ é adsorvido, mas o CH₄ não. Os materiais adsorventes mais utilizados são peneiras moleculares de carbono, zeólitos, sílica em gel, alumina ou carbono ativado (PATTERSON *et al.*, 2011).

A purificação por PSA pode resultar em concentrações entre 96 e 98% de CH₄, e a suas perdas variam entre 2 e 4%. Uma grande desvantagem deste processo é o fato de que o H₂S

pode contaminar de forma irreversível o material de adsorção, inutilizando-o. Logo, devem ser utilizadas outras tecnologias para remover o H₂S antes de passar por este processo (CEA-BARCIA *et al.*, 2018).

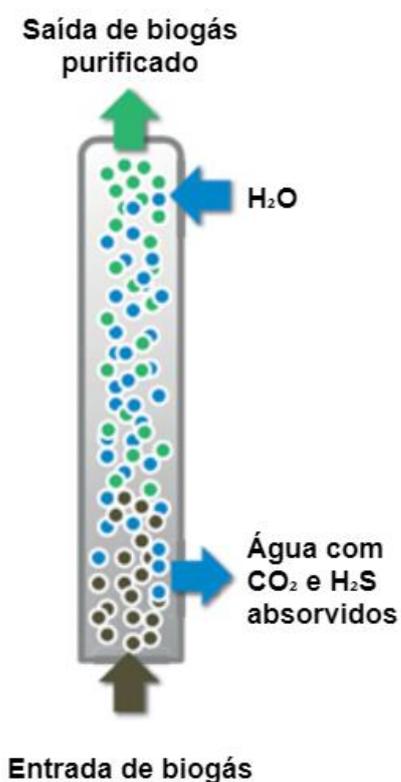
2.5.3 Absorção Física

A absorção física é um processo em que um componente em fase gasosa é transferido para um líquido em que é solúvel. A solubilidade do gás depende de propriedades químicas e estado físico do solvente e o processo ocorre quando as moléculas do gás se unem às moléculas do solvente, através da força intermolecular fraca (CEA-BARCIA *et al.*, 2018).

Um dos solventes utilizados neste processo é a água, cujas propriedades fazem com que, a baixa temperatura e altas pressões, o CO₂ e o H₂S sejam mais solúveis do que CH₄, viabilizando a sua separação. Uma outra característica desse processo é a sua reversibilidade, pois os componentes absorvidos pela água podem ser retirados, possibilitando a sua reutilização no processo (ACCIOLI, 2017).

O método de purificação com lavagem com água (*water scrubbing*) normalmente é aplicado em colunas de absorção, onde o gás pressurizado (entre 9 e 12 bar) é inserido no fundo e a água é pulverizada no topo da coluna, em contrafluxo com o gás. A Figura 9 representa um diagrama deste processo. Após sair da coluna o gás passa por um processo de secagem e estará pronto para uso. A água utilizada passa para outro recipiente com menor pressão (*flash tank*), onde é despressurizada e os componentes absorvidos são liberados, e pode voltar para o processo. A coluna pode ser preenchida com meio que permita uma maior superfície de contato gás/líquido, aumentando a eficiência da absorção (PATTERSON *et al.*, 2011).

Figura 9 - Esquema de Coluna de Lavagem com Água



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Malmberg (2020, figura digital).

2.5.4 Absorção Química

O processo de absorção química envolve a combinação de absorção física e química. As moléculas de CO₂ são absorvidas por ligações covalentes com as moléculas do líquido solvente, e devido a intensidade destas ligações, esse processo é viável mesmo em temperatura e pressão ambiente (CEA-BARCIA *et al.*, 2018). O biogás purificado através da absorção química pode atingir níveis de 99,5 até 99,9% de CH₄ (MUÑOZ *et al.*, 2015).

A escolha do solvente é o principal fator para o bom funcionamento do processo. Além da capacidade de absorção de CO₂ o solvente deve ter um custo viável, ser ambientalmente compatível, ser de fácil regeneração e ter baixa viscosidade (CEA-BARCIA *et al.*, 2018). Os solventes mais utilizados são alcanolaminas (monoetanolamina, dietanolamina etc.), soluções alcalinas (NaOH, KOH, CaOH etc.) e sais aminoácidos (CEA-BARCIA *et al.*, 2018; MUÑOZ *et al.*, 2015). Esses solventes são utilizados pois apresentam uma alta seletividade na absorção

de CO₂ e possuem maior capacidade de dissolução por volume comparado com a água (PATTERSON *et al.*, 2012).

A absorção química possui um gasto energético menor do que a lavagem com água pois ocorre em pressões mais baixas (1-2 bar), porém, a regeneração dos solventes acaba tendo um custo considerável devido a necessidade de altas temperaturas (MUÑOZ *et al.*, 2015). A regeneração dos solventes consiste em remover o CO₂ absorvido para que o líquido pode ser reutilizado no processo. A regeneração pode ocorrer em colunas de dessorção, aquecidas entre 106 °C e 160 °C (ACCIOLI, 2017).

A absorção química também pode absorver o H₂S, porém, não é o processo mais indicado, pois a presença de H₂S no solvente faz com que seja necessário temperaturas mais altas para a regeneração, conseqüentemente, levando a um maior consumo de energia (ACCIOLI, 2017; MUÑOZ *et al.*, 2015).

2.5.5 Criogenia

A diferença das temperaturas de liquefação e solidificação dos componentes do biogás permite uma separação seletiva do CH₄, CO₂ e H₂S. No processo de purificação por criogenia a temperatura do biogás é diminuída em etapas para que seja atingida a liquefação de cada um dos componentes por vez, permitindo a sua respectiva separação. O biogás purificado por este método pode atingir taxas de 97% de CH₄ (ACCIOLI, 2017; MUÑOZ *et al.*, 2015).

O processo pode ocorrer a uma pressão constante de 10 bar com uma descida sequencial de temperatura, começando em -25 °C, em que o H₂S e a água são liquefeitos, indo para -55 °C onde a maior parte do CO₂ é liquefeita e removida, podendo ser comercializada. Por fim, é atingida a temperatura de -85 °C e o restante do CO₂ é solidificado e removido (MUÑOZ *et al.*, 2015).

2.6 Purificação do Biogás por Processo Biológico

A captura biológica do CO₂ com microalgas é uma tecnologia promissora para purificação de biogás. (KHAN *et al.*, 2018; MEIER *et al.*, 2018). Microalgas são todos os organismos unicelulares, ou multicelulares simples, capazes de realizar fotossíntese, sendo separados em procariontes ou em eucariontes. Esses organismos podem fixar CO₂ utilizando

energia solar com uma eficiência até 50 vezes maior do que plantas terrestres (JONHSON *et al.*, 2018). As microalgas procariontes são chamadas também de algas cianófitas, azuis, cianobactérias ou cloroxibactérias. As eucariontes, por sua vez, são referidas como algas verdes ou clorófitas e diferenciam-se das procariontes por “apresentarem núcleo e organelas envolvidos por membranas, cromossomos complexos e células individuais geralmente maiores que as das cianófitas” (ANDRADE; FILHO, 2014a).

As microalgas estão presentes em diversos ambientes aquáticos, tanto de água doce como salgada, e podem suportar temperaturas elevadas, variações de pH e diferentes luminosidades (MAMANI, 2015), contudo, como será discutido mais a frente, a variação destes fatores influencia diretamente no seu crescimento. Além disso, as microalgas desempenham um importante papel no equilíbrio na concentração CO₂ na atmosfera, visto que cerca de 40% da fixação do carbono ocorre nos oceanos (PIRES *et al.*, 2012).

A utilização de microalgas para purificar o biogás possui a vantagens de ser um processo sustentável e utilizar diretamente a energia solar. Ainda, a biomassa das microalgas é rica em lipídeos e pode ser utilizada como matéria-prima em diversos produtos, como (PIRES *et al.*, 2012; SKJÅNES *et al.*, 2012):

- produção de biocombustíveis, como biodiesel, biogás, bioetanol e biohidrogênio;
- suplementos alimentares para humanos e animais;
- pigmentos;
- cosméticos;
- fertilizantes;
- compostos farmacêuticos.

As microalgas podem crescer em diferentes condições de iluminação e de concentração de fonte de carbono. Essas condições podem ser divididas em quatro grupos (CEA-BARCIA *et al.*, 2018):

- fotoautotrófica: utilização da luz visível como fonte de energia e carbono inorgânico como única fonte de carbono;

- heterotrófica: utilização do carbono orgânico como fonte de energia e de carbono;
- fotoheterotrófica: utilização do carbono orgânico como fonte de carbono para a fotossíntese;
- mixotrófica: os organismos variam entre os regimes fotoautotrófico e heterotrófico, dependendo das condições de iluminação e das concentrações das fontes de carbono.

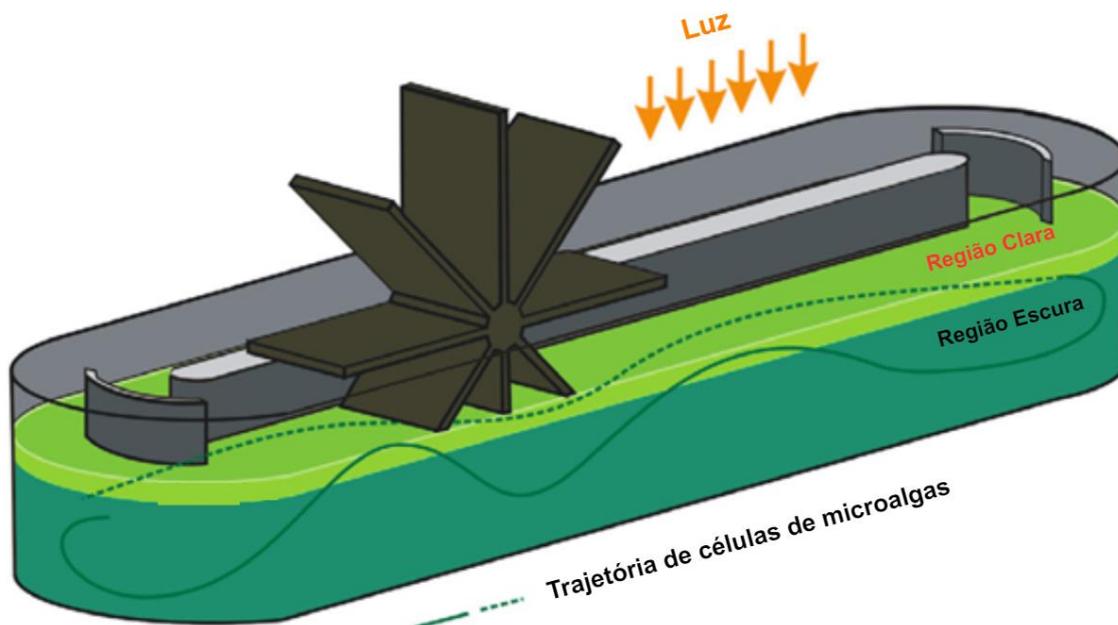
A purificação do biogás, porém, ocorre somente nos regimes fotoautotrófico e mixotrófico, pois são os únicos que utilizam o carbono inorgânico (no caso, o CO₂) para realizar a fotossíntese e conseqüentemente fixar o gás carbônico.

Microalgas podem ser cultivadas em dois tipos de reatores, abertos ou fechados. Os detalhes destes dois tipos de reatores serão apresentados a seguir.

2.6.1 Reator Aberto

O sistema de reator aberto, também chamado de lagoa aberta, é a forma mais antiga de cultivo de microalgas e suas primeiras utilizações foram na década de 1950. Estas lagoas podem ser naturais ou artificiais, como tanques, lagoa circular ou lagoa de canal adutor e utilizam o sol como fonte de luz. Normalmente são construídas a base de concreto e possuem sistemas de propulsão e defletores de fluxo para garantir a mistura da cultura e evitar sedimentações (CHEN *et al.*, 2016; SHOW *et al.*, 2017). A Figura 10 apresenta um esquema de um reator aberto do tipo lagoa de canal adutor (*raceway pond*).

Figura 10 - Esquemático de um reator aberto



Fonte: Chen *et al.* (2016, p. 1).

A principal desvantagem dos reatores abertos é o fato das microalgas estarem expostas, sofrendo grande interferência de agentes externos, como a temperatura, precipitação e contaminações, dificultando o controle do processo. Em comparação com os reatores fechados, as vantagens são o menor custo, menor gasto em energia e manutenção e conseqüentemente mais rentáveis para a produção de microalgas (PIRES *et al.*, 2012; SHOW *et al.*, 2017).

2.6.2 Fotobiorreator

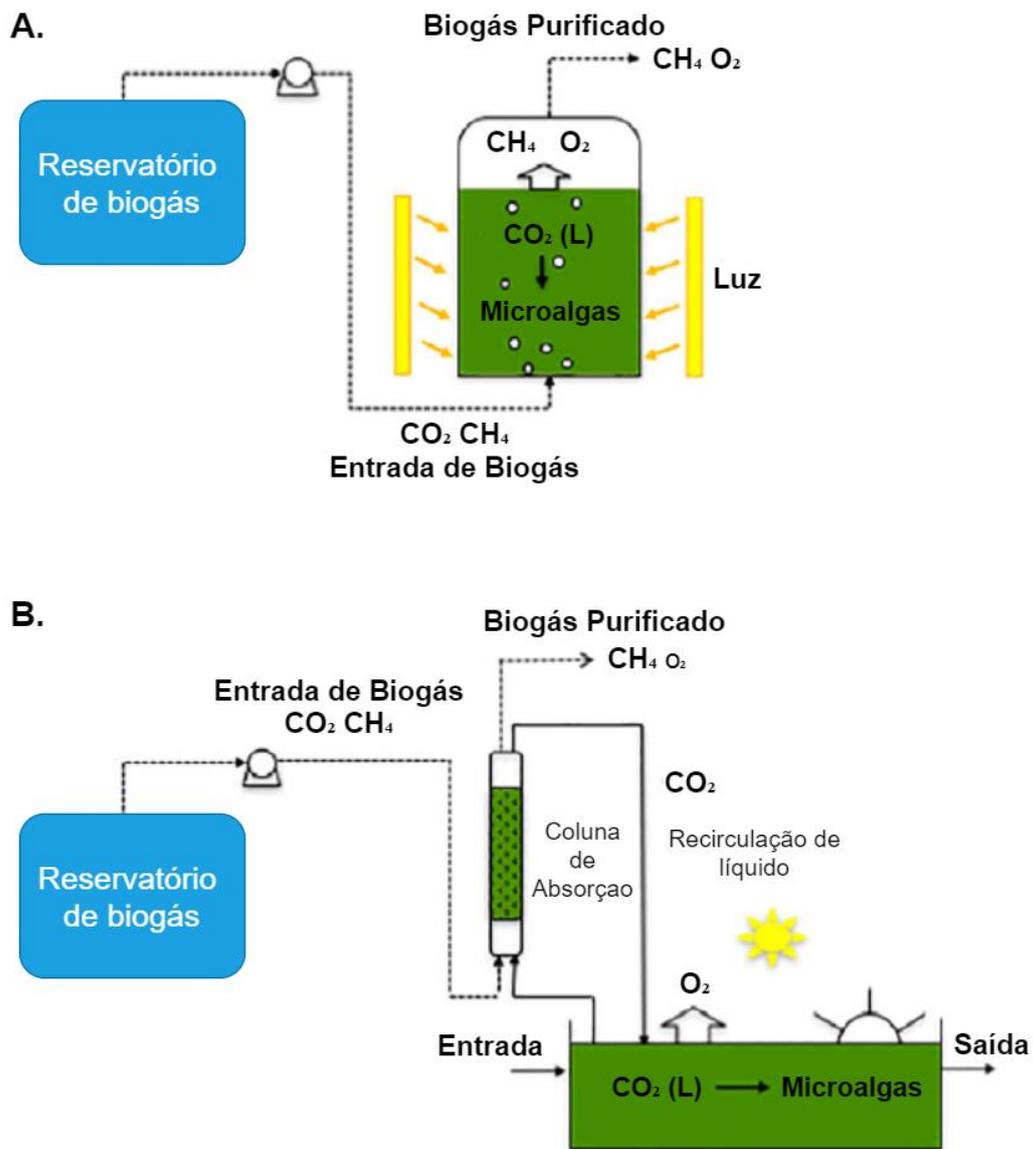
Os fotobiorreatores são biorreatores utilizados para o cultivo de microalgas e cianobactérias. Eles são fechados e contam com uma eficiente captura e utilização da luminosidade. Estes tipos de reatores podem operar tanto em ambiente fechado, onde utilização iluminação artificial ou em ambientes abertos, onde utilizam a iluminação natural. O fato de serem isolados do ambiente externo propicia um controle maior sobre as condições da cultura, como os níveis de pH, temperatura, luminosidade, salinidade e concentração de CO₂ (JOHNSON *et al.*, 2018; SHOW *et al.*, 2017).

Os fotobiorreatores, quando comparados com os reatores de lagoa, possuem contaminação reduzida, maior controle sobre os parâmetros de produção e conseqüentemente maior produtividade de biomassa. Além disso, necessitam de menos espaço físico, e perdem

menos água por evaporação. Entretanto, podem necessitar de resfriamento e/ou aquecimento para manter a temperatura controlada (PIRES *et al.*, 2012).

O processo de purificação de biogás com fotobiorreatores pode ser subdividido em dois arranjos: um estágio ou dois estágios. A Figura 11 apresenta um diagrama evidenciando a diferença entre as duas formas de operação.

Figura 11 - Esquemático de fotobiorreator de (A) um estágio e (B) dois estágios



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Cea-Barcia *et al.* (2018, p. 1517).

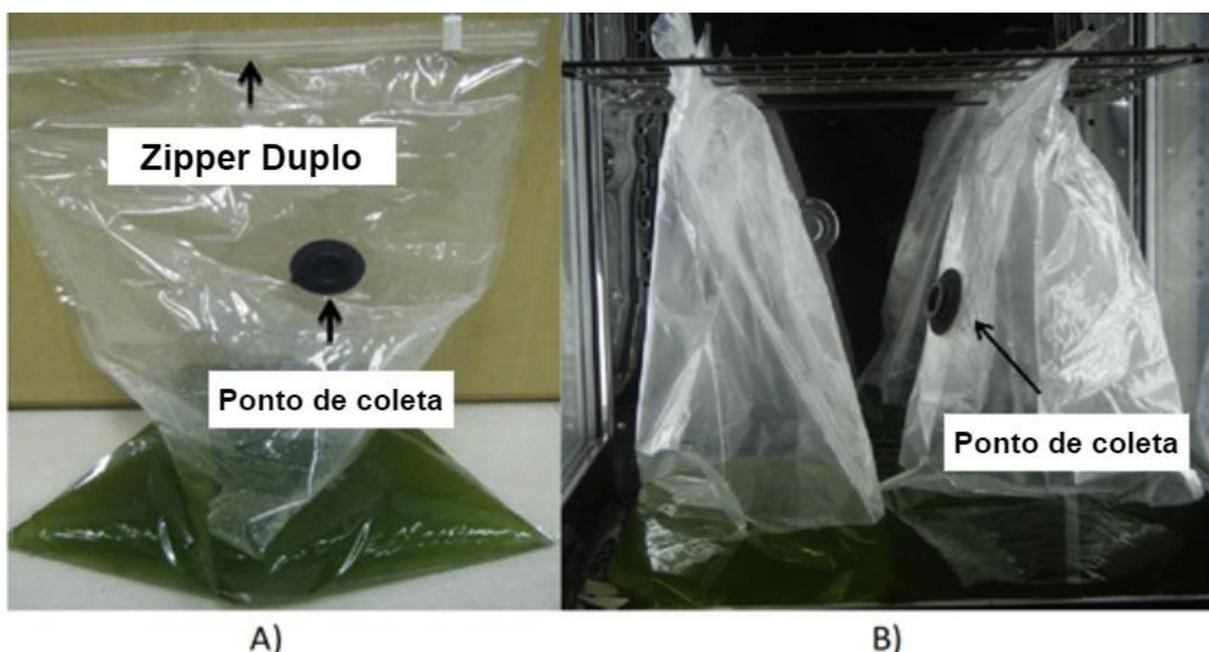
O processo de um estágio é composto somente por um fotobiorreator. O biogás é injetado diretamente na cultura de microalgas e todo o gás resultando do processo é recolhido no mesmo

ponto. Em certos arranjos o biogás é inserido no fundo do reator, promovendo a mistura do meio (CEA-BARCIA *et al.*, 2018).

O processo de um estágio também pode ser feito em um reator totalmente fechado, como por exemplo em um bag, em que o biogás e fase líquida são inseridas em um recipiente hermeticamente fechado, conforme apresentado na Figura 12. Os estudos de Yan *et al.* (2016) e de Ouyang *et al.* (2015) utilizaram este arranjo pois ele possibilita um controle sobre o processo e baixo custo, porém, sua utilização está restrita à escala laboratorial para pesquisa.

Uma desvantagem da utilização de fotobiorreatores de um estágio para a purificação de biogás é que todo o oxigênio produzido pela fotossíntese realizadas pelas microalgas se mistura com o biogás, resultando em altos níveis de oxigênio no gás purificado, o que é indesejado pois, além de ficar fora da conformidade estabelecida pelas agências reguladoras, uma mistura de gás metano rica em oxigênio pode ser explosiva (MEIER *et al.*, 2015).

Figura 12 - Fotobiorreator em bag, nos trabalhos de (A) Ouyang *et al.* (2015) e (B) Yan *et al.* 2016.



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Ouyang *et al.* (2015, p. 158) e Yan *et al.* (2016, p. 555).

O processo de dois estágios é composto por um fotobiorreator e uma unidade de transferência de massa. Neste arranjo a absorção do CO_2 é fisicamente separada da dessorção do O_2 , dessa forma o oxigênio produzido pela fotossíntese das microalgas não irá para o biogás, evitando assim uma contaminação. Nesse tipo de processo as principais variáveis são o design

do fotobiorreator, os fluxos de biogás e a taxa de recirculação de líquido entre reator e unidade de transferência (CEA-BARCIA *et al.*, 2018).

Em seu estudo, Meier *et al.* (2015) concluiu que a alta taxa de oxigênio encontrada no biogás purificado ocorreu por causa do contato direto do gás com a cultura de microalgas em um único estágio. Foi deduzido, então, que para a purificação ser bem-sucedida deve haver uma separação entre a absorção do CO₂ e a dessorção do O₂. O autor também ressalta que a taxa de recirculação da fase líquida é o principal fator determinante da composição do biogás purificado.

Mesmo possuindo custos mais elevados de implantação e manutenção, os fotobiorreatores são mais escolhidos para aplicações que necessitam de maior qualidade, como na indústria farmacêutica e na fabricação de pigmentos e ácidos graxos (SHOW *et al.*, 2017). Os fatores que devem ser levados em consideração no design do fotobiorreator são, segundo Show *et al.* (2017):

- Possibilidade de cultivar diversas espécies de microalga
- Fornecer uma iluminação uniforme da cultura, com o mínimo de áreas escuras
- Auxiliar na transferência de CO₂ e O₂
- Reduzir ao máximo a sedimentação
- Reduzir a evaporação de água e perdas de CO₂
- Suportar espécies que geram muita espuma
- Suportar altas taxas de transferência de massa

O Quadro 1 sumariza os protótipos avaliados, detalhando o arranjo utilizado em cada experimento. A coluna “Período Claro/Escuro” indica por quantas horas a cultura esteve exposta a iluminação e quantas não esteve. Os experimentos em que o período de avaliação foi menor do que 24 horas e foi utilizada iluminação durante todo o processo foram classificados como “Iluminação Contínua”.

2.6.3 Principais Parâmetros de Operação

A purificação do biogás depende principalmente da concentração de biomassa, que, por sua vez, está diretamente ligada ao crescimento da população de microalgas. Logo, para obter eficiência na purificação do biogás, os parâmetros operacionais devem ser otimizados visando o aumento da biomassa (CEA-BARCIA *et al.*, 2018). Além deste fator, a eficiência da fixação do CO₂ está relacionada com a espécie da microalga, a concentração de CO₂, o arranjo do fotobiorreator e as condições de operação (JAIUKA *et al.*, 2018).

As principais variáveis que influenciam o desenvolvimento da cultura de microalga são: distribuição e intensidade da luminosidade, temperatura, pH, salinidade, quantidade e qualidade dos nutrientes, concentração de oxigênio dissolvido e presença de elementos tóxicos, como metais pesados (PIRES *et al.*, 2012). Nesta seção serão apresentados detalhes sobre a influência dos principais fatores.

2.6.3.1 Iluminação

A fonte de iluminação é a principal variável que influencia na dinâmica do crescimento de microalgas. A cultura pode ser iluminada pela luz solar, por luz artificial ou ainda por ambos. A taxa de crescimento pode crescer com a intensidade da iluminação até certo ponto, e depois estabiliza (JOHNSON *et al.*, 2018; PIRES *et al.*, 2012).

A disponibilidade de iluminação, em determinada intensidade e região do espectro, é primordial para o cultivo de microalgas fototróficas. A iluminação pode afetar o metabolismo das microalgas em três condições: limitação, saturação e inibição. Sob o regime de limitação da luminosidade, o crescimento da biomassa e a atividade fototrófica estão limitados, e cresceram com o aumento da intensidade da iluminação. Já sob o regime de saturação, a taxa de absorção de fótons já estará em seu limite, logo a atividade fototrófica já estará em seu máximo e aumentar a luminosidade não aumentará o crescimento da biomassa, pelo contrário, se a intensidade luminosa aumentar muito pode ocorrer danos ao cloroplasto que diminuem a absorção de fótons, o que é chamado de fotoinibição (JOHNSON *et al.*, 2018; SHOW *et al.*, 2017).

Quadro 1 - Compilação de protótipos avaliados

Autor	Espécie de microalga	Período claro/escuro	Estágios	Volume	Material
MEIER <i>et al.</i> , 2015	<i>Nannochloropsis gaditana</i>	Iluminação Contínua	Dois estágios, com aeração.	Tanque de 75 L (15cm X 50 cm X 100 cm). Coluna de 0,7 L (2,2 m de altura, 2 cm de diâmetro).	Vidro
MEIER <i>et al.</i> , 2018	<i>Chlorella sorokiniana</i>	Iluminação Contínua	Dois estágios, com aeração e agitação.	Tanque de 2 L. Coluna de 0,2 L (1,71 m de altura, 1,2 cm de diâmetro).	
KAHN <i>et al.</i> , 2018	<i>Chlorella minutissima</i>	Iluminação Contínua	Um estágio.	Tanque de 12 L (30,5 cm X 22,9 cm X 17,2 cm, vidro de 2 mm)	Vidro
YAN <i>et al.</i> , 2016	<i>Chlorella sp.</i>	Iluminação Contínua	Um estágio. <i>Bag</i>	100 L (100 cm x 50 cm x 20 cm)	Transparente de polietileno de
OUYANG <i>et al.</i> , 2015	<i>S. obliquus</i> , <i>Chlorella sp.</i> , e <i>S. bibrainum</i>	12/12	Um estágio <i>Bag</i>	24 L	Transparente de polietileno
MEIER <i>et al.</i> , 2017	<i>Chlorella sorokiniana</i>	12/12	Dois estágios, com aeração.	Tanque de 50 L (15 cm x 50 cm x 67 cm). Coluna de 0,34 L (3m de altura, 1,2 cm de diâmetro)	
SRINUANPAN <i>et al.</i> , 2018	<i>Scenedesmus sp.</i>	24/0	Um estágio, com agitação magnética	Garrafa <i>Duran</i> de 500 mL	
KAO <i>et al.</i> , 2012	<i>Chlorella sp.</i>	Iluminação Contínua	Um estágio.	Tanque cilíndrico de 800 mL, 70 mm de diâmetro.	Vidro.

Autor	Espécie de microalga	Período claro/escuro	Estágios	Volume	Material
ANSARI <i>et al.</i> , 2017	<i>Scenedesmus sp.</i> e <i>Chlorella sp.</i>	14/10	Um estágio.	Garrafas de 1 L	Vidro
BAHR <i>et al.</i> , 2014	<i>Spirulina platensis</i>	24/0	Dois estágios, com agitação	Raceway Pond de 180 L, coluna de 0,8 L	
PRANDINI <i>et al.</i> , 2016	<i>Scenedesmus spp.</i>	12/12 e 24/0	Um estágio.	Dois reatores de 16,9 L (30 cm x 20cm) interconectados.	
JAIUKA <i>et al.</i> , 2018	<i>Chlorella vulgaris</i>	Iluminação Contínua	Dois estágios.	Tanque de 0,45 L. Coluna de acrílico, 52,5cm de altura e 3,5cm de diâmetro.	
SALAFUDIN <i>et al.</i> , 2015	<i>Clarias gariepinus</i>	14/10	Dois estágios.	Lagoa de cultivo. Coluna feita com tonel de 150 L	

Fonte: Autor (2021).

A intensidade luminosa ótima depende diretamente da espécie de microalga que está sendo cultivada, visto que algumas espécies necessitam de maior luminosidade para realizar a fotossíntese. Por exemplo, a espécie *Chlorella* sp. atinge a saturação à 8.000 lux, enquanto a *Nannochloropsis* sp. atinge à 10.000 lux. Além da absorção de CO₂, a produção de lipídeos também é influenciada pela intensidade da fonte de iluminação (SHOW *et al.*, 2017).

O ciclo claro/escuro influencia no crescimento da cultura. As células que tiveram o seu tecido danificado pelo excesso de luminosidade podem utilizar o período escuro para reparar essas estruturas (PIRES *et al.*, 2012). Em processos de purificação de dois estágios, que utilizam colunas de transferência, a utilização de um ciclo claro/escuro não impede a absorção do CO₂ no período escuro (quando as microalgas não estão realizando fotossíntese) pois a transferência do CO₂ para o líquido ocorre principalmente pela dessorção, que inclusive pode ser beneficiada pela diminuição da temperatura devido à ausência de fonte de iluminação (MEIER *et al.*, 2017).

Por fim, o comprimento de onda da fonte de luz também influencia a taxa de crescimento da biomassa. Em seu estudo, Yan *et al.* (2016) concluiu que, para a espécie *Chlorella* sp., a luz vermelha foi a resultou em maior crescimento da população de microalgas e consequente melhor purificação do biogás.

2.6.3.2 Temperatura

A temperatura também é um fator de influência sobre o crescimento das microalgas. A influência da temperatura é semelhante ao da luminosidade: a produção de biomassa cresce de acordo com a temperatura, até alcançar certo ponto ótimo, em que o aumento de temperatura não afetará mais o crescimento. Da mesma forma, se a temperatura estiver muito acima deste ponto, o crescimento pode ser inibido (PIRES *et al.*, 2012).

Algumas espécies de microalga conseguem tolerar baixas temperaturas, como a *Chlamydomonas nivalis* que cresce no gelo e na neve, porém, para microalgas mesófilas, baixas temperaturas podem inibir o crescimento. Submetidas a baixas temperaturas, pode ocorrer um aumento na rigidez do sistema de membranas, dificultando o transporte de fluídos e elétrons, consequentemente, diminuindo a atividade fotossintética. Além disso, as reações enzimáticas também são afetadas por temperaturas baixas, podendo levar a problemas com oxidação (SKJÅNES *et al.*, 2013).

2.6.3.3 Concentração de Nutrientes

A concentração de nutrientes é outro fator que interfere no crescimento da cultura de microalgas. Os principais nutrientes necessários para o crescimento das microalgas são carbono, nitrogênio e fósforo. O carbono é responsável por 40-50% da biomassa e é responsável pela base do metabolismo da célula. O CO₂ utilizado pelas microalgas pode ser fornecido por diferentes fontes: CO₂ existente naturalmente no meio, CO₂ liberado por atividades antrópicas e CO₂ de carbonatos solúveis. Cerca de 1,8g de CO₂ são utilizadas para cada grama de biomassa gerada, e, para microalgas ricas em lipídeos, esse valor pode chegar a 3g (SHOW *et al.*, 2017).

O nitrogênio e o fósforo são utilizados na síntese de DNA e RNA. O nitrogênio também é utilizado na construção de proteínas e aminoácidos. O fósforo é essencial para o transporte de energia em forma de ATP e faz parte de componentes que constituem a membrana da célula. O enxofre também é um nutriente importante na produção de proteínas e aminoácidos. As microalgas normalmente absorvem o nitrogênio na forma de amônia (NH₄⁺) ou nitrato (NO₃⁻), fósforo em forma de fosfato (PO₄³⁻) e o enxofre em forma de sulfato (SO₄²⁻) (SKJÅNES *et al.*, 2013).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo será apresentada a caracterização deste projeto de pesquisa assim como os procedimentos metodológicos utilizados. Serão apresentados em detalhes a produção do biogás, a coleta e ambientação das microalgas, o projeto e execução do protótipo de biopurificador, os equipamentos utilizados para análise do gás e os procedimentos de amostragem.

3.1 Biogás

Foram utilizados dois tipos de biogás no estudo. Durante o processo de construção e testes iniciais do protótipo, a aclimatação das microalgas e na maior parte dos testes foi utilizado biogás produzido no local cujo detalhamento está apresentado no item a seguir. Entretanto, para uma parte dos testes de remoção de H_2S foi utilizada uma mistura padrão, chamado de biogás sintético, composto por: CH_4 (59,77%), CO_2 (30,00%), N_2 (7,17%), O_2 (1,026%), H_2 (1,012%) e H_2S (10.000 ppm). Essa mistura gasosa é adquirida comercialmente, de fabricantes especializados. O biogás sintético foi utilizado para avaliar o funcionamento do protótipo com altos níveis de H_2S (10.000 ppm), visto que o biogás produzido apresentou níveis baixos (aproximadamente 200 ppm).

3.1.1 Produção de Biogás

O biogás utilizado no estudo foi produzido em reatores de digestão anaeróbia do modelo HomeBiogas 2.0, do fabricante HomeBiogas. Esse modelo possui um tanque digestor com volume de 1200 L e um gasômetro de 700 L. A sua produção nominal de biogás é de 700 L

diários (HOME BIOGAS, 2021). Esse reator também produz biofertilizante, que não foi utilizado neste estudo e foi aplicado na vegetação ao entorno. O reator ainda conta com um filtro de carvão ativado para a remoção do gás sulfídrico, porém, como um dos objetivos do estudo é avaliar a remoção desse componente o filtro foi removido. A Figura 13 apresenta um diagrama com os componentes do equipamento.

Figura 13 - Diagrama do reator HomeBiogas 2.0



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Homebiogas (2021, figura digital).

A Figura 14 apresenta uma imagem dos dois reatores utilizados no estudo. O reator da direita, em cima do reboque, foi denominado Reator 1 e o da esquerda, em cima do pallet, de Reator 2. Os reatores foram alimentados com resíduo orgânico proveniente de restaurantes universitários. Ambos os reatores foram alimentados 3 vezes por semana com 4 quilograma de material.

Figura 14 - Reatores para produção de biogás



Fonte: Autor (2021).

3.2 Microalgas

As microalgas utilizadas neste estudo foram coletadas em uma lagoa de efluente tratado de uma empresa do ramo alimentício localizada na cidade de Arroio do Meio/RS. A lagoa, contudo, não estava sendo abastecida com efluente, ela estava recebendo somente água de chuva. A coleta ocorreu no mês de maio de 2021. A Figura 15A apresenta uma imagem da referida lagoa.

Conforme a Figura 15B, as microalgas estavam depositadas no fundo da lagoa, na geomembrana. Junto com elas foram encontrados materiais indesejados como cascalhos, galhos, folhas e insetos. Esses materiais foram removidos manualmente no local da coleta. As microalgas foram coletadas e transportadas com um balde plástico, junto com uma quantidade da água da lagoa.

Figura 15 - Local de coleta das microalgas



Fonte: Autor (2021).

Como meio de nutrientes para as microalgas foi utilizado efluente de esgoto predial, coletado em uma estação de tratamento de esgoto localizada na frente do prédio 17 da Univates. Durante o período do estudo foi aplicado 2 L de efluente por semana no tanque das microalgas.

A identificação das espécies de microalgas foi feita através de caracterização morfológica com o auxílio de microscópios (ANDRADE; FILHO, 2014b). Foi utilizado o microscópio Imager.Z2, Figura 16, equipado com uma câmera digital AxioCam 506 Color, ambos da fabricante Zeiss. O software utilizado para captura foi o ZEN, versão 2.3 *pro*.

Figura 16 - Microscópio utilizado para visualização das microalgas

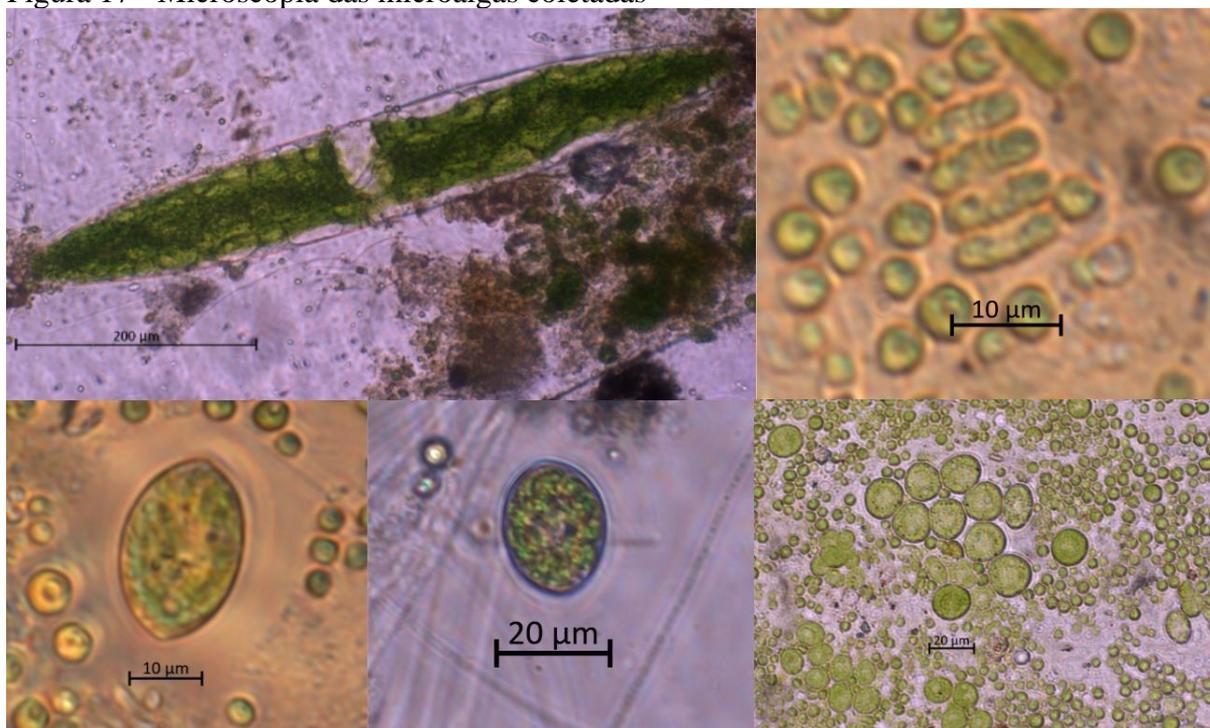


Fonte: Autor (2021).

A Figura 17 apresenta as imagens resultantes da microscopia. A partir dessas imagens foi consultada a bibliografia para determinar os possíveis gêneros das microalgas presentes nas amostras coletadas (BICUDO; MENEZES, 2006; TUCCI *et al.*, 2019). Os seguintes gêneros foram elencados como possíveis: *Netrium*, *Scenedesmus*, *Euglena*, *Clorella* e *Mougeotia*.

Cabe ressaltar que a identificação dos gêneros das microalgas foi preliminar e não teve o objetivo de identificar as espécies. Conforme Andrade e Filho (2014b) a identificação de espécies de microalgas é um processo complexo que envolve análise morfológica, tanto de células como de colônias, e ensaios de análise molecular. Como não está entre os objetivos desse trabalho a identificação exata das espécies, esses ensaios não foram realizados.

Figura 17 - Microscopia das microalgas coletadas



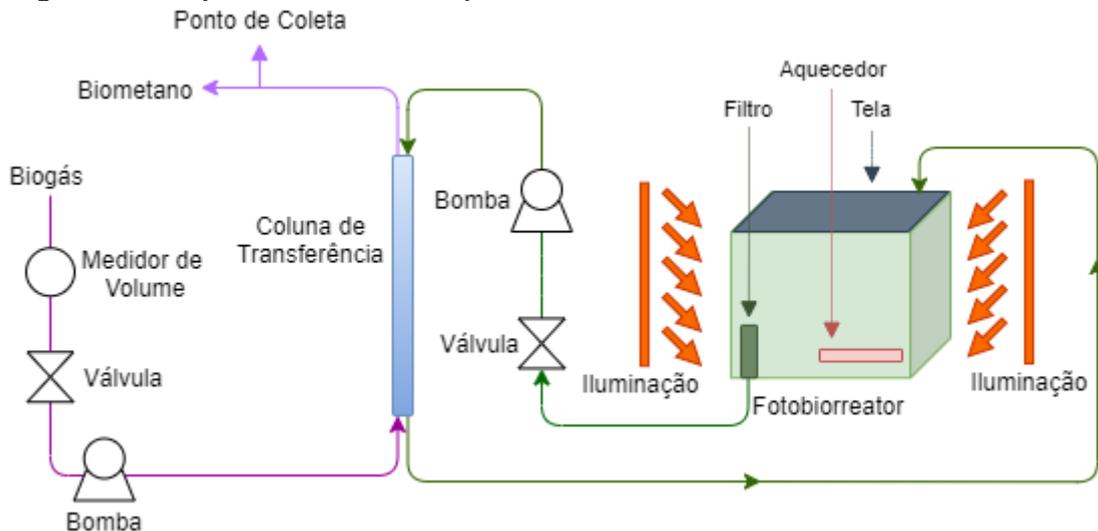
Fonte: Autor (2021).

3.3 Protótipo de Fotobiorreator

O protótipo do fotobiorreator foi projetado com base na literatura disponível sobre reatores utilizados para cultivo de microalgas com finalidade de purificação de biogás, considerando as respectivas características, qualidades e limitações de cada projeto. Foram selecionados os aspectos construtivos mais relevantes de cada protótipo de acordo com a relevância de seus resultados, assim como os seus parâmetros operacionais. O Quadro 1 apresenta uma compilação dos estudos revisados.

O protótipo de purificador de biogás elaborado foi de dois estágios, e o fotobiorreator é do tipo tanque. A Figura 18 apresenta um esquemático geral do arranjo. O biogás é borbulhado em uma coluna de transferência de massa, por onde passa, no contrafluxo, o cultivo de microalgas. A fase líquida circula pela coluna, sendo retirada do fundo do tanque e reinsertada na parte superior para forçar a homogeneização da cultura.

Figura 18 - Esquemático do Protótipo



Fonte: Autor (2021).

A taxa de recirculação da cultura e de fluxo de biogás são parâmetros chaves para o funcionamento do sistema (JAIUKA *et al.*, 2018). Com o objetivo de medir estes parâmetros, foi adicionado na entrada do biogás um medidor de volume e, posteriormente, calculada a vazão do gás. O medidor utilizado é da marca Ritter, modelo TG 0.5. Esse medidor possui um relógio que cada volta completa representa 0,5 L transitados e, além disso, possui um contador mecânico cumulativo, possibilitando avaliar a quantidade de gás utilizado durante os experimentos. A Figura 19 apresenta uma imagem do equipamento.

Figura 19 - Medidor de volume de gás



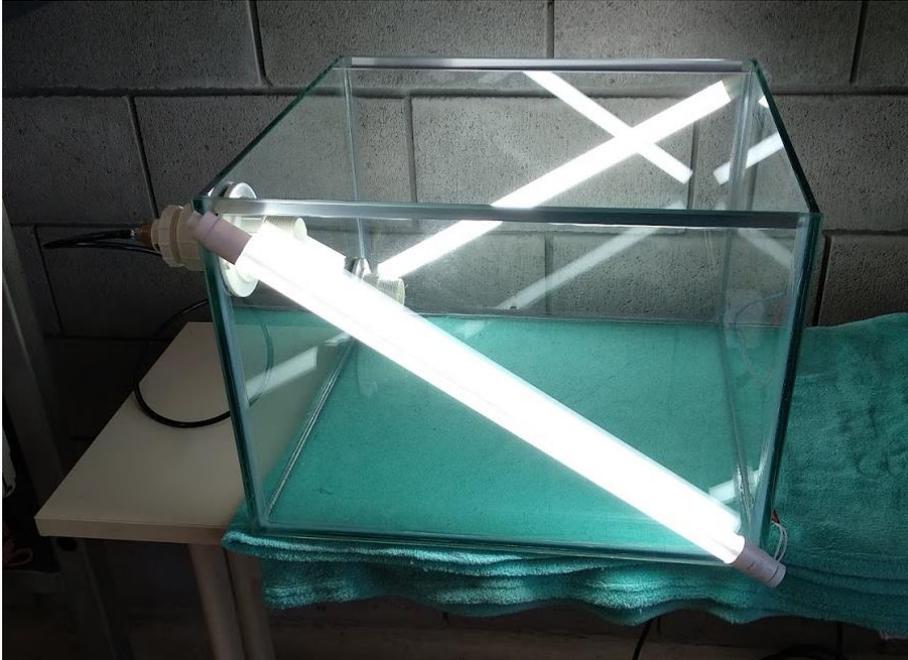
Fonte: Autor (2021).

O tanque de cultivo foi confeccionado com placas de vidro transparente de 8 mm de espessura, com dimensões de 50 cm X 50 cm X 35 cm (largura, comprimento e altura). O volume total do reator é de 87,5 L, porém, foram deixados 10 cm de altura livre no topo para evitar transbordamentos, chegando a uma capacidade útil de 62,5 L. Na Figura 20 pode ser visto o tanque vazio.

O tanque possui duas aberturas em uma das laterais para a circulação do líquido com a coluna de transferência. Uma das aberturas é na parte inferior e funciona como saída para a coluna, e a outra é na parte superior, por onde o líquido retorna. Além disso, uma delas está na parte traseira do tanque e a outra na parte dianteira. Esse arranjo foi pensado para auxiliar na movimentação do líquido dentro do tanque.

Como fonte de iluminação foram utilizadas duas lâmpadas de LED tubular branca fria (*cool white fluorescent*) de 9 W de potência. A temperatura de cor da lâmpada é de 6500 K e o fluxo luminoso é de 900 lúmens. Elas foram posicionadas de forma diagonal em duas faces opostas do reator (Figura 20). A iluminação permaneceu ligadas durante todo o período do estudo.

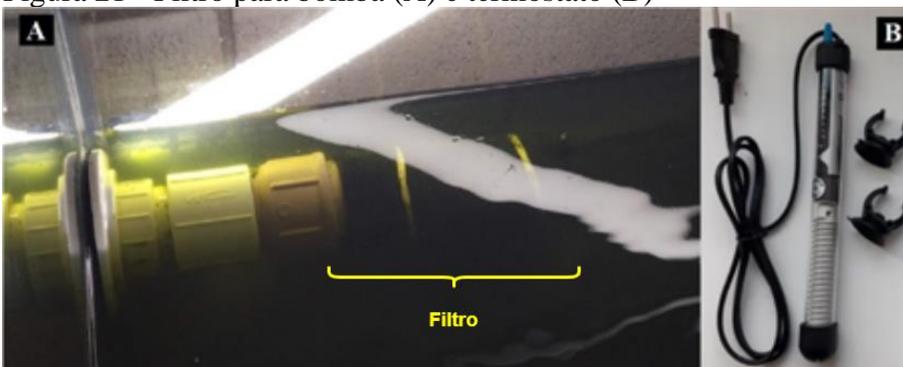
Figura 20 - Tanque do reator, vazio



Fonte: Autor (2021).

Com o objetivo de evitar o entupimento da bomba e dos tubos, foi desenvolvido um filtro e acoplado na tomada de água do tanque. O filtro foi montado com um cano PVC de 50 mm cortado e tela do tipo sombrite. Para manter a água em uma temperatura estável foi adicionado um termostato submerso no tanque, posicionado de maneira horizontal no lado do tanque oposto da troca de líquido. O termostato utilizado possui 100 W de potência e regulagem de temperatura de 20 a 34 °C. A Figura 21 apresenta o filtro já acoplado (A) e o termostato com as ventosas para fixação (B).

Figura 21 - Filtro para bomba (A) e termostato (B)



Fonte: Autor (2021).

A coluna de transferência foi construída com um cano de PVC de 50 mm marrom fosco com 80 cm de altura. Nas suas extremidades foram fixados “tês” para acoplar as entradas e saídas de gás e água. Foram adicionadas válvulas borboletas nas duas conexões da parte inferior

da coluna para possibilitar o manuseio das conexões mesmo com a coluna cheia. Na Figura 22 está apresentada a coluna e estão destacadas as entradas e saídas de gás e água.

Figura 22 - Coluna de transferência de massa

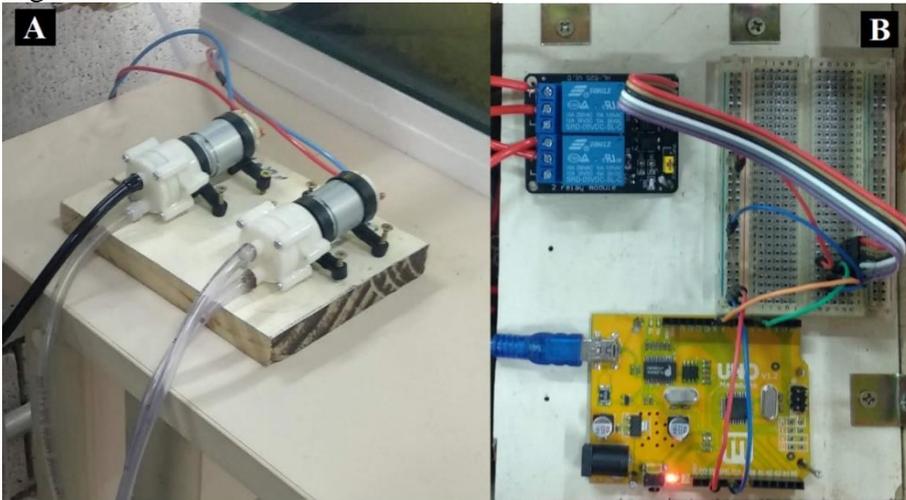


Fonte: Autor (2021).

Para a circulação de água e de gás foram utilizadas bombas iguais. A bomba utilizada é do tipo diafragma e serve tanto para líquido quanto para gases. O modelo da bomba é R385, com tensão de funcionamento de 6 a 12 V e vazão nominal máxima de 3 L/min (ELECTRONICSCOMP, 2021). As bombas são acionadas por um circuito elétrico com controlador programável e chaveamento com relés. Através deste controlado foi possível programar lógicas temporizadas para o acionamento das bombas conforme a vazão desejada. A Figura 23 A apresenta uma imagem das bombas instaladas.

O controlador utilizado foi o Arduino. Conforme definição do fabricante, o Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto composta de hardware e software. Os controladores podem receber e emitir sinais elétricos, digitais ou analógicos, possibilitando a leitura de sensores e o acionamento de atuadores. A programação é realizada através da linguagem de programação Arduino (ARDUINO, 2021). O circuito montado está apresentado na Figura 23 B.

Figura 23 - Bombas e circuito de acionamento



Fonte: Autor (2021).

O protótipo completo, com todos os seus componentes, e em fase de operação pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 - Protótipo de fotobiorreator em operação



Fonte: Autor (2021).

3.4 Análise da composição do biogás

Com o intuito de avaliar a eficiência do protótipo foi feita a análise da composição do biogás, tanto na entrada (biogás *in natura*) quanto na saída (biogás purificado). Em ambos os

casos foram utilizados 3 equipamentos distintos para realizar as análises: medidor de metano portátil, laboratório móvel e cromatógrafo gasoso. Foi utilizado mais de um equipamento para a análise pois cada um deles possui características específicas, como tempo de leitura, precisão, disponibilidade e custo. Nessa seção serão apresentados os detalhes técnicos de cada um dos equipamentos.

3.4.1 Medidor de metano portátil

Esse medidor possui um sensor Advanced Gasmitter, do fabricante PRONOVA que detecta o teor de CH_4 presente no gás analisado e exibe o resultado em um display, conforme a Figura 25. É um equipamento portátil, utiliza 50 ml por análise, e apresenta o resultado em menos de um minuto. O medidor portátil foi utilizado para a parametrização inicial, realizando testes para verificar o funcionamento geral do sistema. As análises realizadas com esse medidor não compõem os resultados deste estudo.

Figura 25 - Sensor de Metano Advanced Gasmitter (PRONOVA)



Fonte: Autor (2021).

3.4.2 Laboratório móvel

O laboratório móvel é um conjunto de sensores para análise da composição de biogás instalados em um painel elétrico e acoplado a um veículo Volkswagen Kombi. O equipamento é desenvolvido pela empresa Awite. Os sensores existentes no laboratório são de CH_4 (0-100%), CO_2 (0-100%), O_2 (0-25%), H_2 (0-2000 ppm) e H_2S (0-5000 ppm). A análise leva

aproximadamente 10 minutos, utiliza 3 litros de gás e apresenta resultado para os 5 componentes descritos. O equipamento possui dois pontos de medição, podendo realizar a medição de duas fontes diferentes.

A Figura 26 apresenta imagens do laboratório móvel. No quadrante A é possível ver o lado direito do veículo, onde fica a porta lateral e o acesso ao painel elétrico. Já no quadrante B é possível ver o lado esquerdo, onde são conectados os dois pontos de medição. O quadrante C mostra a interface do sistema, onde é possível ver o resultado das análises, extrair os dados, programar leituras e ver o histórico de operação. Por fim, o quadrante D mostra o interior do painel com os sensores.

Figura 26 - Laboratório móvel

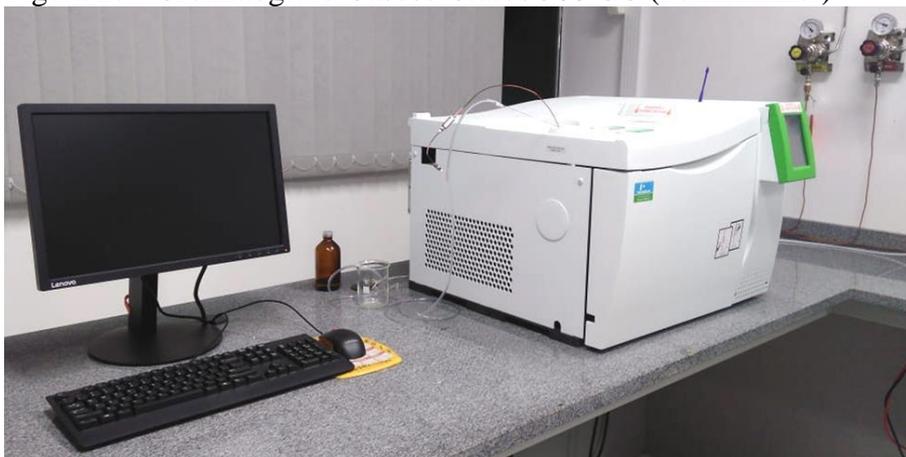


Fonte: Autor (2021).

3.4.3 Cromatógrafo gasoso

Para a análise da composição do gás também foi utilizado o cromatógrafo gasoso modelo Clarus 580 GC do fabricante PerkinElmer. Ele é equipado com Detector por Condutividade Térmica (TCD) para a leitura de CH₄, CO₂, H₂, O₂ e N₂. Para a determinação dos níveis de H₂S ele é equipado com Detector Fotométrico de Chama (DFC). Este cromatógrafo gasoso está disponível no Laboratório de Biorreatores do Tecnovates (Figura 27) e a sua descrição detalhada está no Quadro 2. As análises foram realizadas em triplicata.

Figura 27 - Cromatógrafo Gasoso Clarus 580 GC (PerkinElmer)



Fonte: Autor (2021).

Quadro 2 - Detalhamento do Cromatógrafo Gasoso utilizado para análise da composição do biogás

Características do Cromatógrafo Gasoso	
Coluna	Empacotada (Hayesep e Peneira Molecular)
Gás de arraste e referência do TCD	Argônio
Gás de combustão do DFC	Hidrogênio
Temperatura do forno	60 °C
Tipo e temperatura dos detectores	TCD (250 °C) e FPD (325 °C)
Software	TotalChrom & Int LINK

Fonte: Autor (2021).

3.5 Amostragem e Análise

Após a coleta das microalgas elas foram inseridas no tanque e iniciou-se um período de aclimação, visando ambientar os organismos ao ambiente. Na primeira semana o experimento foi feito em dois dias durante 3 horas, e na segunda, 3 dias durante 3 horas. Durante todo o tempo o fluxo de entrada de gás foi de 50 L/h. Após esse período foram realizados os ensaios e foram feitas as análises que compõem os resultados do presente estudo.

Foram realizados 3 ensaios visando avaliar a eficiência do protótipo na remoção de componentes indesejados do biogás. O primeiro ensaio serviu para avaliar a composição do gás de entrada e de saída para determinar a diferença para cada um dos componentes. Para esse ensaio o protótipo foi ligado durante uma hora e então foi feita a coleta de gás na saída do

biorreator e na saída do protótipo. O gás foi armazenado em bags metálicas e analisado no cromatógrafo gasoso. Esse ensaio foi realizado nos dois reatores e com gás padrão, totalizando 4 análises.

O segundo ensaio objetivou analisar a eficiência do protótipo em função do seu tempo de operação. O protótipo foi ligado por 3 horas e foram feitas análises dos gases de entrada e de saída a cada 30 minutos com o laboratório móvel. Esse ensaio foi realizado 3 vezes, totalizando 36 análises e foram coletados dados de CH₄, CO₂, O₂ e de H₂S.

Por fim, o terceiro ensaio teve como objetivo analisar a eficiência da remoção do gás sulfídrico. Para isso, foi utilizado uma mistura gasosa padrão com 10.000 ppm de H₂S como entrada do protótipo. Foram realizadas duas análises da saída com o cromatógrafo gasoso.

Para o cálculo da eficiência da remoção dos componentes a seguinte equação foi utilizada, baseada em Salafudin *et al.* (2015) e Jaiuka *et al.* (2018):

$$\frac{\% \text{ de Entrada} - \% \text{ de Saída}}{\% \text{ de Entrada}} \times 100\%$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados e discutidos os resultados das análises realizadas, cujo objetivo foi verificar a eficiência de purificação do sistema construído. Para isso, foram realizadas análises de composição do biogás antes e depois de passar pelo sistema construído, possibilitando a comparação e conseqüente cálculo de percentual de remoção de CO_2 e H_2S . Quanto maior for o percentual de remoção, maior a eficiência do sistema. Os níveis de O_2 também foram avaliados para verificar se eles não aumentaram.

Na primeira parte são descritos os resultados relacionados à remoção de CO_2 . É importante notar que não ocorre a transformação de CO_2 em CH_4 , mas sim a remoção de CO_2 do biogás, diminuindo o volume total e conseqüentemente aumento o percentual de CH_4 no biogás purificado. Logo, a remoção de CO_2 , em termos absolutos, é igual ao aumento de proporção do CH_4 .

Em um segundo momento serão apresentados os resultados da remoção de H_2S . Foram realizados dois tipos de testes para avaliar a eficiência do protótipo em baixas (biogás dos reatores) e em altas (gás padronizado) concentrações de H_2S . Por fim, serão apresentados os resultados de incremento de O_2 .

4.1 Remoção de CO_2

Nessa seção serão detalhados os resultados de remoção de CO_2 . Primeiramente são apresentados os resultados das análises de cromatografia gasosa, que foram realizados tanto com biogás e com o gás padronizado. Após, os resultados de remoção em função do tempo de operação.

4.1.1 Remoção de CO₂ em análise de cromatografia gasosa

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises de cromatografia gasosa realizadas nas amostras de entrada e saída do protótipo junto com a diferença, em % Vol. e em percentual. A média de remoção de CO₂ foi de 24,97%, com desvio padrão de 9,2%. Apesar do resultado ter sido menor do que alguns reportados na literatura, como Meier *et al.* (2015) que obteve 93% de remoção, ele já é um indicativo de que a purificação de biogás através de microalgas é possível. A análises 4 apresentou uma taxa de remoção de CO₂ de 25,83%, esse resultado é comparável com o de Salafudin *et al.* (2015), que obteve uma redução de 25% utilizando o mesmo arranjo deste estudo, porém em maiores proporções (coluna de transferência de 150 L e fluxo de biogás de 18-28 L/min).

Tabela 1 - Diferença de entrada e saída de CH₄ e CO₂

Análise	Entrada (% Vol.)		Saída (% Vol.)		Diferença (% Vol.)		Diferença (%)	
	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
1 ^a	54,95	43,00	64,40	33,61	9,45	-9,39	17,20	-21,84
2 ^b	47,57	47,93	53,29	41,96	5,72	-5,97	12,02	-12,46
3 ^c	59,77	30,00	67,84	18,07	8,07	-11,93	13,50	-39,77
4 ^c	59,77	30,00	65,34	22,25	5,57	-7,75	9,32	-25,83
^a Reator 1								
^b Reator 2				Média	7,20	-8,76	13,01	-24,97
^c Gás padronizado				Desv. Pad.	1,63	2,19	2,84	9,82

Fonte: Autor (2021).

4.1.2 Remoção de CO₂ em função do tempo de operação

Com o objetivo de avaliar a eficiência do protótipo na remoção de CO₂ ao longo do tempo de operação foram realizados 3 ensaios em que o sistema operou por 3 horas e foram feitas análises a cada 30 minutos no laboratório móvel. Os resultados são apresentados a seguir.

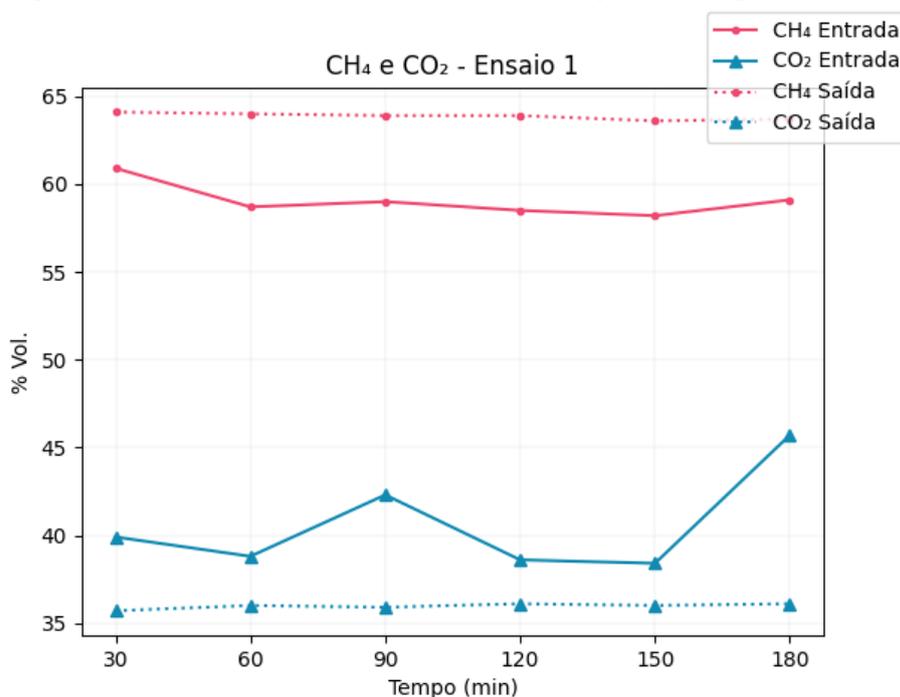
A Tabela 2 apresenta os resultados do Ensaio 1, realizado no Reator 1. É possível verificar que o protótipo apresentou uma redução média de 11,10% de CO₂ e um aumento médio de 8,15% de CH₄. Um fato relevante é que a quantidade de CO₂ na saída permaneceu próximo de 36% com uma variação baixa (desvio padrão de 0,14%) mesmo com uma variação significativa na entrada (desvio padrão de 2,63%).

Tabela 2 - Diferença de CH₄ e CO₂ em função do tempo – Ensaio 1

Tempo (min)	Entrada (% Vol.)		Saída (% Vol.)		Diferença (% Vol.)		Diferença (%)	
	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
30	60,9	39,9	64,1	35,7	3,2	-4,2	5,25	-10,53
60	58,7	38,8	64,0	36,0	5,3	-2,8	9,03	-7,22
90	59,0	42,3	63,9	35,9	4,9	-6,4	8,31	-15,13
120	58,5	38,6	63,9	36,1	5,4	-2,5	9,23	-6,48
150	58,2	38,4	63,6	36,0	5,4	-2,4	9,28	-6,25
180	59,1	45,7	63,7	36,1	4,6	-9,6	7,78	-21,01
Média	59,1	40,6	63,9	36,0	4,8	-4,7	8,15	-11,10
Desv. Pad.	0,9	2,6	0,2	0,1	0,8	2,6	1,40	5,40

Fonte: Autor (2021).

A Figura 28 apresenta o percentual em volume de CH₄ e CO₂ em função do tempo para o Ensaio 1. Nesse gráfico fica visível a estabilidade do CH₄ em 63,9% na saída e do CO₂ em 36%, mesmo com variações na entrada.

Figura 28 – Quantidade de CH₄ e CO₂ em função do tempo – Ensaio 1

Fonte: Autor (2021).

Os resultados do Ensaio 2, que foi realizado no Reator 2, está apresentados na Tabela 3. Os dados mostram que a quantidade de CH₄ e CO₂ na entrada permaneceram constantes, em 48,3% e 53,1%, respectivamente. A saída, entretanto, teve uma tendência de queda na absorção de CO₂. Por mais que a redução média de CO₂ tenha ficado maior do que no Ensaio 1 (17,46%

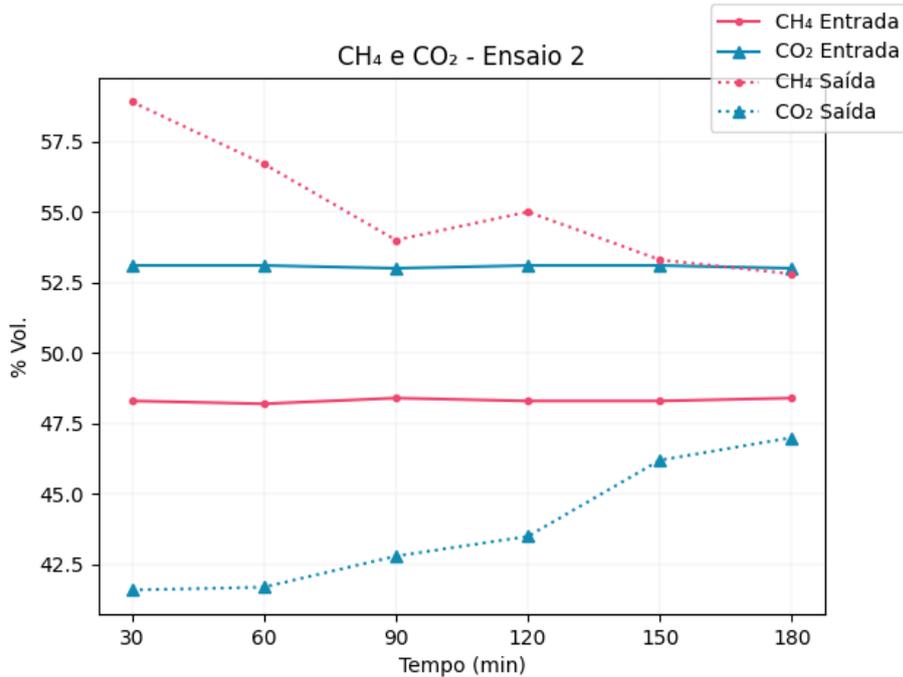
nesse caso e 11,10% no anterior) é clara a tendência de diminuição desta redução, visto que começou em 22,66% e diminui gradualmente até atingir 11,32%. Na Figura 29 é possível visualizar a tendência de queda da saída.

Tabela 3 - Diferença de CH₄ e CO₂ em função do tempo – Ensaio 2

Tempo (min)	Entrada (% Vol.)		Saída (% Vol.)		Diferença (% Vol.)		Diferença (%)	
	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
30	48,3	53,1	58,9	41,6	10,6	-11,5	21,95	-21,66
60	48,2	53,1	56,7	41,7	8,5	-11,4	17,63	-21,47
90	48,4	53,0	54,0	42,8	5,6	-10,2	11,57	-19,25
120	48,3	53,1	55,0	43,5	6,7	-9,6	13,87	-18,08
150	48,3	53,1	53,3	46,2	5,0	-6,9	10,35	-12,99
180	48,4	53,0	52,8	47,0	4,4	-6,0	9,09	-11,32
Média	48,3	53,1	55,1	43,8	6,8	-9,3	14,08	-17,46
Desv. Pad.	0,1	0,1	2,1	2,1	2,2	2,1	4,5	3,98

Fonte: Autor (2021).

Figura 29 - Quantidade de CH₄ e CO₂ em função do tempo - Ensaio 2



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 4 apresenta os resultados do Ensaio 3, realizado no Reator 2. A média de remoção de CO₂ foi de 17,06%. Nesse ensaio também é possível observar uma tendência de saturação da saída. O nível de entrada permaneceu em 49,3%, porém o sistema atinge a maior redução de CO₂ na segunda medida (12,0%) e no último ponto a redução já é praticamente a

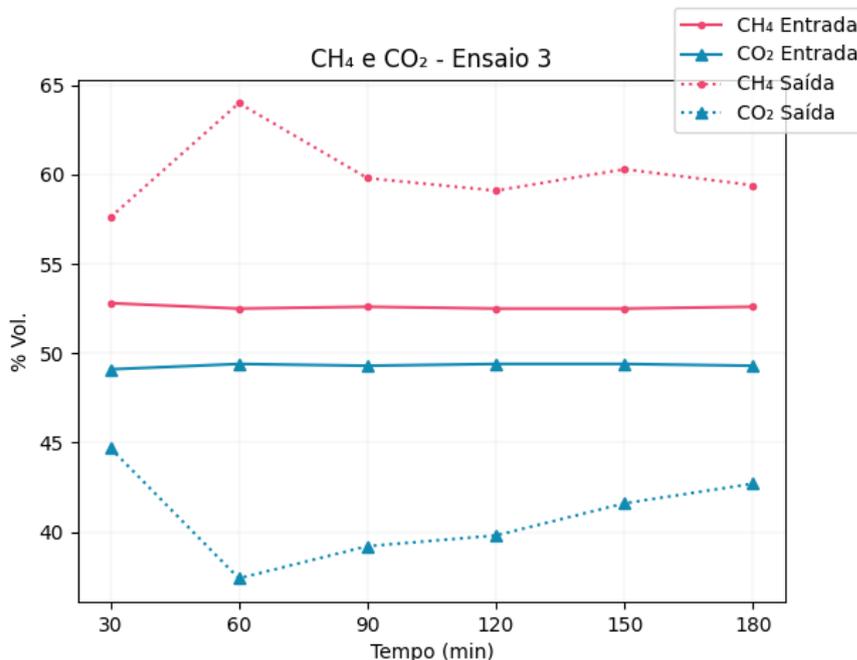
metade (6,6%). A Figura 30 apresenta o gráfico desse ensaio, em que é possível verificar a tendência de aumento do CO₂ na saída.

Tabela 4 - Diferença de CH₄ e CO₂ em função do tempo - Ensaio 3

Tempo (min)	Entrada (% Vol.)		Saída (% Vol.)		Diferença (% Vol.)		Diferença (%)	
	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
30	52,8	49,1	57,6	44,7	4,8	-4,4	9,09	-8,96
60	52,5	49,4	64,0	37,4	11,5	-12,0	21,90	-24,29
90	52,6	49,3	59,8	39,2	7,2	-10,1	13,69	-20,49
120	52,5	49,4	59,1	39,8	6,6	-9,6	12,57	-19,43
150	52,5	49,4	60,3	41,6	7,8	-7,8	14,86	-15,79
180	52,6	49,3	59,4	42,7	6,8	-6,6	12,93	-13,39
Média	52,6	49,3	60,0	40,9	7,5	-8,4	14,17	-17,06
Desv. Pad.	0,1	0,1	2,0	2,4	2,0	2,5	3,9	5,01

Fonte: Autor (2021).

Figura 30 - Quantidade de CH₄ e CO₂ em função do tempo - Ensaio 3



Fonte: Autor (2021).

A comparação do resultado do Ensaio 1 com o Ensaio 2 mostra que ocorreu uma saturação de CO₂ no meio líquido do protótipo no segundo caso. Comparando com o primeiro ensaio é possível verificar que os níveis de CO₂ na entrada são maiores (média de 40,6% no primeiro e 53,1% no segundo). Essa diferença pode explicar o fato do sistema não ter saturado no primeiro caso e ter saturado no segundo. Conforme apontado por Cea-Barcia *et al.* (2018),

resultados semelhantes foram observados em outros estudos, indicando que a captura de CO₂ depende da concentração de biomassa no reator.

Entre os ensaios 2 e 3 é possível notar uma diferença no nível de CO₂ na entrada (53,1% no Ensaio 2 e 49,3% no Ensaio 3). Em ambos os casos ocorreu a saturação e CO₂ no meio, porém, a partir das curvas é possível inferir que no Ensaio 2 a remoção teve uma queda mais acentuada, e isso pode ter ocorrido devido a diferença dos níveis de CO₂ na entrada. A remoção média nesses dois casos foi maior do que no Ensaio 1, porém, seria necessário mais tempo de operação para conseguir determinar se a remoção é maior em regime saturado ou em equilíbrio.

Os resultados dos Ensaios 2 e 3, comparados ao do Ensaio 1, mostram que o nível de CO₂ na entrada do sistema pode levá-lo a saturação e conseqüente diminuição de eficiência. O controle do fluxo de biogás na entrada e da taxa de recirculação de água entre o tanque a coluna de transferência são fatores chaves no processo (CEA-BARCIA *et al.*, 2018). A redução do fluxo de biogás na entrada pode levar a maiores taxas de remoção de CO₂ (JAIUKA *et al.*, 2018). A saturação de CO₂ no meio líquido do purificador também está relacionado com a manutenção de uma determinada espécie de microalga como dominante no sistema, logo, alterações na saturação podem interferir na composição e quantidade de microrganismos no sistema (BAHR *et al.*, 2014).

4.1.3 Remoção média de CO₂

A remoção média de CO₂ considerando das análises realizadas no cromatógrafo, apresentadas no item 4.1.1, foi de 24,97%. Já para os ensaios de remoção em função do tempo, apresentados no item 4.1.2, foi de 15,21%. Por fim, considerando todas as análises realizadas, a remoção média de CO₂ foi de 16,98%, calculada através de uma média simples de todas as análises.

4.2 Remoção de H₂S

Com o objetivo de avaliar a eficiência do protótipo na remoção de H₂S foram realizados dois tipos de ensaios. O primeiro deles foi feito com um gás padronizado com alto teor de H₂S (10.000 ppm) e analisado no cromatógrafo gasoso. O segundo tipo de ensaio foi realizado no Reator 2 e avaliou o comportamento do sistema em função do tempo, com as análises feitas no laboratório móvel.

4.2.1 Remoção de H₂S em mistura de gás padrão

Devido às características do cilindro de gás padronizado esse ensaio não utilizou a bomba pressurizadora do gás. O fluxo de entrada foi controlado utilizando a uma válvula controladora de pressão e um rotâmetro. O fluxo de entrada de gás foi de 0,9-1,8 L/min. Foram realizadas duas análises, uma com 5 minutos de operação e outra com 10 minutos. O período de análise foi menor do que os outros ensaios devido à baixa disponibilidade e alto custo do gás padronizado.

A média de remoção de H₂S da mistura de gás padrão foi de 39,50%, conforme apresentado na Tabela 5. É possível notar que entre as duas medidas houve uma redução considerável da taxa de remoção (de 54% para 25%), isso é um indicativo de saturação de H₂S no meio líquido. Para atenuar esse efeito, o indicado seria diminuir a taxa de vazão de gás de entrada (BAHR *et al.*, 2014; JAIUKA *et al.*, 2018).

Tabela 5 - Diferença de H₂S em mistura de gás padrão

Tempo (min)	Entrada (ppm)	Saída (ppm)	Diferença (ppm)	Diferença (%)
5	10.000	4.600	-5.400	-54,00
10	10.000	7.500	-2.500	-25,00
Média	10.000	6.050	-3.950	-39,50
Desv. Pad.	-	1.450	1.450	14,50

Fonte: Autor (2021).

4.2.2 Remoção de H₂S em função do tempo de operação

Com o objetivo de avaliar a eficiência do protótipo na remoção de H₂S ao longo do tempo de operação foram realizados 2 ensaios em que o sistema operou por 3 horas e foram feitas análises a cada 30 minutos. Ambos os ensaios foram realizados no Reator 2. Os resultados são apresentados a seguir.

Os resultados do Ensaio 1 estão apresentados na Tabela 6. A redução média de H₂S foi de 77,43%. Já a Tabela 7 contém os resultados do Ensaio 2, em que a redução média foi de 93,53%. Esses resultados são compatíveis com o observado em Bahr *et al.* (2014), que obteve uma redução de 80%, e, para chegar aos 100%, implementou um mecanismo de controle de pH do meio líquido.

Tabela 6 – Diferença de H₂S em função do tempo – Ensaio 1

Tempo (min)	Entrada (ppm)	Saída (ppm)	Diferença (ppm)	Diferença (%)
30	217	38	-179	-82,49
60	182	32	-150	-82,42
90	198	53	-145	-73,23
120	187	50	-137	-73,26
150	204	46	-158	-77,45
180	202	49	-153	-75,74
Média	198,3	44,7	-153,7	-77,43
Desv. Pad.	11,5	7,3	13,1	3,84

Fonte: Autor (2021).

Tabela 7 – Diferença de H₂S em função do tempo – Ensaio 2

Tempo (min)	Entrada (ppm)	Saída (ppm)	Diferença (ppm)	Diferença (%)
30	232	8	-224	-96,55
60	224	16	-208	-92,86
90	214	14	-200	-93,46
120	207	11	-196	-94,69
150	205	14	-191	-93,17
180	209	20	-189	-90,43
Média	215,2	13,8	-201,3	-93,53
Desv. Pad.	9,8	3,8	11,9	1,86

Fonte: Autor (2021).

A eficiência de remoção de H₂S média do protótipo, considerando os resultados dos 2 ensaios, foi de 85,48%. O resultado é compatível com o observado em Bahr *et al.* (2014), que obteve uma redução de 80%, e, para chegar aos 100%, implementou um mecanismo de controle de pH do meio líquido. No caso dos ensaios utilizando o biogás produzido no local a saída, em todas as análises, ficou abaixo de 50 ppm, semelhante aos resultados obtidos por Kao *et al.* (2012).

Nos dois ensaios é possível observar uma tendência de queda da taxa de redução. No primeiro ensaio a redução começou em 82,49% e acabou em 75,74%, representando uma queda de 6,75%. No segundo ensaio a queda foi de 6,12%. Esses resultados mostram que pode ter ocorrido uma saturação de H₂S no meio líquido, semelhante ao ocorrido com o CO₂.

4.3 Incremento de O₂

A presença de O₂ é indesejada no biogás purificado. As microalgas presentes no sistema realizam fotossíntese, e o O₂ gerado pode acabar sendo transferido para o biogás. O arranjo do sistema em dois estágios é feito justamente para evitar isso. Para avaliar se essa estratégia foi

efetiva, foram realizadas análises do nível de O₂ no biogás purificado, e os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Diferença de O₂

Ensaio	Tempo (min)	Entrada (% Vol.)	Saída (% Vol.)	Diferença (% Vol.)
1	30	0,00	0,04	0,04
	60	0,00	0,00	0,00
	90	0,00	0,00	0,00
	120	0,00	0,01	0,01
	150	0,00	0,05	0,05
	180	0,00	0,03	0,03
2	30	0,00	0,00	0,00
	60	0,00	0,02	0,02
	90	0,00	0,00	0,00
	120	0,00	0,04	0,04
	150	0,00	0,01	0,01
	180	0,00	0,00	0,00
3	30	0,00	0,00	0,00
	60	0,00	0,05	0,05
	90	0,00	0,00	0,00
	120	0,00	0,03	0,03
	150	0,00	0,01	0,01
	180	0,00	0,00	0,02
	Média	0,00	0,02	0,02

Fonte: Autor (2021).

A partir dos resultados é possível verificar que o incremento de O₂ foi, em média, 0,02%. Esse valor é satisfatório, visto que está abaixo do especificado pela legislação vigente, que é de 0,8% de O₂ (ANP, 2017).

5 CONCLUSÃO

Neste estudo foi realizado o projeto e execução de um protótipo de purificador de biogás utilizando microalgas e avaliada a sua capacidade redução do CO₂ e H₂S, componentes indesejados no biogás. O sistema elaborado foi de 2 estágios, possuindo tanque de cultivo de microalgas e uma coluna de transferência de massa, onde ocorre o contato do meio de cultivo com o biogás. Além disso, o sistema contou com iluminação e aquecimento para a cultura.

A redução média de CO₂ foi de 16,98% e a de H₂S foi de 85,48% para baixas concentrações e de 39,5% para altas. Os níveis de O₂ tiveram um incremento médio de 0,02%. Os resultados das análises mostraram que o protótipo foi capaz de reduzir a quantidade tanto o CO₂ quanto o H₂S em todos os casos. A eficiência de remoção do CO₂, porém, foi abaixo do esperado, em comparação com a literatura. A redução de H₂S foi satisfatória (saída menor do que 50 ppm) para níveis baixos na entrada (~200 ppm). Para as análises utilizando a mistura de gás padrão como entrada (10.000 ppm) a redução foi menor (39,50%), porém, mostra que mesmo para níveis altos o protótipo é capaz de reduzir significativamente a quantidade de H₂S.

A baixa eficiência na remoção de CO₂ foi atribuída a pequena população de microalgas e o seu baixo crescimento. Para melhorar esse ponto deve ser feito um trabalho metódico de coleta, isolamento, identificação e preparação de inóculo de microalgas. Dessa forma é possível ter mais conhecimento sobre as características necessárias (temperatura, pH, nutrientes, saturação de CO₂) para o bom funcionamento do sistema. Acredita-se que esse trabalho também pode aumentar a eficiência na remoção de H₂S.

Vale ressaltar também que o período de funcionamento do protótipo foi curto. Entende-se que seria importante um período longo de operação do sistema, possibilitando uma melhor

adequação das microalgas ao ambiente e consequente aumento na eficiência do sistema, assim como melhorias no sistema, ajustes de variáveis e a realização de mais análises.

A tecnologia de purificação de biogás utilizando microalgas se mostrou promissora e abre um leque de estudos que podem ser realizados a partir desse trabalho. Algumas ideias são:

- Controle fino dos fluxos de gás e de água, testando outros arranjos de bombas e válvulas;
- Avaliar diferentes dimensões e formatos para a coluna de transferência;
- Avaliar a resposta de outras espécies de microalgas;
- Verificar a utilização de recheios na coluna de transferência;
- Avaliar a influência da iluminação, variando fatores como tipo de lâmpada, intensidade luminosa, ciclo claro/escuro etc.

REFERÊNCIAS

ACCIOLI, Paula Lobo. **Uso de Carvões Ativados Modificados por Soluções Alcalinas na Separação de CH₄/CO₂ para Enriquecimento do Biogás**. 2017. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 8 de jun. de 2017

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº 685, de 29 de Junho de 2017**. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2017/junho&item=ramp-685--2017>>. Acesso em: 01 jan. 2020.

ANSARI, Abeera A.; KHOJA, Asif Hussain; NAWAR, Azra; QAYYUM, Muneeb; ALI, Ehsan; Wastewater treatment by local microalgae strains for CO₂ sequestration and biofuel production. **Applied Water Science**, v. 7, n.8, p. 4551-4158, 2017.

ANDRADE, Diva Souza. FILHO, Arnaldo Colozzi. **Microalgas de águas continentais V. 1 – Potencialidades e desafios do cultivo**. Londrina: IAPAR, 2014a.

ANDRADE, Diva Souza. FILHO, Arnaldo Colozzi. **Microalgas de águas continentais V. 2 – Produção de biomassa e coprodutos**. Londrina: IAPAR, 2014b.

APHA. **Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater, 20th Ed.**: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC, 1999

ARDUINO. **Getting Started: Introduction**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>>. Acesso em: 1 jan. 2021.

BAHR, Melanie; DÍAZ, Ignacio; DOMINGUEZ, Antonio; GONZÁLEZ, Armando Sánchez; MUÑOZ, Raul. Microalgal-Biotechnology As a Platform for an Integral Biogas Upgrading and Nutrient Removal from Anaerobic Effluents. **Environment Science & Technology**, v. 48, p. 573–581, 2014.

BIANCHI, André Luiz; LIMA, Adroaldo Adão Martins de; DIAS, Sérgio Souza. Recursos Naturais, Cadeias e Setores Energéticos. In PHILIPPI JR, Arlindo; REIS, Lineu Belico dos. **Energia e sustentabilidade**. 1 ed. Barueri, SP: Manole, 2016.

BICUDO, C. E. D; MENEZES, M. **Gêneros de algas de águas continentais no Brasil Chave para identificação e descrições**. São Carlos: Rima, 2 ed. 2006

BIOPROCESS CONTROL. **Manual de operação AMPTS II**. Bioprocess Control Sweden, 2011.

CAPRA, Fritjof. **A Teia da Vida: uma nova compreensão dos sistemas vivos**. 1 ed. São Paulo: Cultrix, 1997.

CEA-BARCIA, Glenda; LÓPEZ-CAAMAL, Fernando; TORRES-ZÚÑIGA Ixbalank, HERNÁNDEZ-ESCOTO, Héctor. Biogas Purification Via Optimal Microalgae Growth: A Literature Review. **Biotechnol Progress**, 34, p. 1513-1532, 2018.

CHEMIN, Beatris F. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos**: planejamento, elaboração e apresentação. 3. ed. Lajeado: Univates, 2015. E-book. Disponível em: https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/110/pdf_110.pdf>. Acesso em: 7 mai. 2020.

CHEN, Zhijie; ZHANG, Xinru; JIANG, Zeyi; CHEN, Xuehui, HE, Hongzhou; ZHANG, Xinxin. Light/dark cycle of microalgae cells in raceway ponds: Effects of paddlewheel rotational speeds and baffles installation. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 387-391, nov. 2016.

CIFUENTES-ÁVILA, Fabiola; DÍAZ-FUENTES, Rolando; OSSES-BUSTINGORRY, Sonia. Ecología Del Comportamiento Humano: Las Contradicciones Tras El Mensaje De Crisis Ambiental. **Acta Bioethica**, v. 24, n. 1, p. 161-165, 2018.

COELHO, Mario Augusto Alexandre. **Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Como Forma de Desenvolvimento Econômico**. Tese (Doutor em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

COELHO, Suani. **Energias Renováveis**. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda., 2012.

D'AQUINO, Camila Agner. **Geração de Energia por Biogás a partir de Resíduos Orgânicos: Estudo de Caso da Cidade Universitária da USP**. 2018. Tese (Pós-Graduação em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

ELECTRONICSCOMP. **R385 6-12V DC Diaphragm Based Mini Aquarium Water Pump**. 2021. Disponível em: <<https://www.electroniccomp.com/r385-6-12v-dc-diaphragm-based-mini-aquarium-water-pump>>. Acesso em mai. De 2020.

EPE. Empresa Brasileira de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional (BEN) 2021 – Relatório Síntese 2020**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202021-ab%202020_v2.pdf>. Acesso em: 20 jun. de 2021.

HOME BIOGAS. **Homebiogas**, Beit Yanai, Israel. Disponível em: <<https://www.homebiogas.com/product/homebiogas-2/>>. Acesso em 20 jun. de 2021.

JAIKUA, Mathin; THONGSAN, Sahataya; CHAIJAMRUS, Sirilux; Development of a microalgae based System for Biogas Upgrading and Oil Production from Waste Biomass. **International Energy Journal**, v. 18, p. 231-242, 2018.

JOHNSON, Tylor J.; KATUWAL, Sarmila; ANDERSON, Gary A.; GU, Liping; ZHOU, Ruanbao; GIBBONS, William R. Photobioreactor Cultivation Strategies for Microalgae and Cyanobacteria. In: **Biotechnology Progress**, v. 34, n. 4, p. 811-827, 2018.

KAO, Chien-Ya; CHIU, Sheng-Yi; HUANG, Tzu-Ting; DAI, Le; HSU, Ling-Kang; LIN, Chih-Sheng. Ability of mutant strain of the microalga *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide for biogas upgrading. **Applied Energy**, v. 93, p. 176-183, 2012.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C.; et al. **Manual Básico de Biogás**. 1. ed. Lajeado: Ed. da Univates, 2014.

KHAN SA, MALLA FA, RASHMI, CHAND Malav L, GUPTA N, KUMAR A, Potential of wastewater treating *Chlorella minutissima* for methane enrichment and CO₂ sequestration of biogas and producing lipids, **Energy**, v. 150, p. 153-163, 2018.

KONRAD, O.; GUERINI FILHO, M.; LUMI, M.; HASAN, C. **Atlas das biomassas do RS para produção de biogás e biometano**. 1. ed. Lajeado: Ed. da Univates, 2016.

LEFF, Enrique. **Epistemologia Ambiental**. 5. ed. São Paulo, SP. Editora Cortez, 2000.

MALMBERG. **Malmberg biogas water scrubbing process**, 's-Hertogenbosch. Disponível em <<https://www.malmberg.se/portals/malmbergs/Malmberg%20biogas%20water%20scrubbing%20process.PNG>>. Acesso em: 15 jun. de 2020.

MAMANI, Leonardo Ariel Benavidez. **Desenvolvimento De Um Reator Para Geração De Biogás A Partir De Biomassa De Microalgas Como Alternativa Energética Nas Áreas Rurais**. 2015. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, jun. de 2015.

MATHEZ, Edmond A.; SMERDON, Jason E. **Climate change: the science of global warming and or energy future**. 2. ed. Nova Iorque, Columbia University Press, 2018.

MEIER, L.; BARROS, P.; TORRES, A.; VILCHES, C.; JEISON, D. Photosynthetic biogas upgrading using microalgae: Effect of light/dark photoperiod. **Renewable Energy**, v. 106, p. 17-23, 2017.

MEIER, L.; PÉREZ, R.; AZÓCAR, L.; RIVAS, M.; JEISON, D. Photosynthetic CO₂ uptake by microalgae: An attractive tool for biogas upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 73, p. 102-109, 2015.

MEIER Leslie, STARÁ Dana, BARTACEK Jan, JEISON David. Removal of H₂S by a continuous microalgae-based photosynthetic biogas upgrading process. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 119, p. 65-68, 2018.

MUÑOZ, Raúl; MEIER, Leslie; DIAZ, Israel. JEISON, David. A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 15, n. 4, p. 727-759, 2015.

NASCIMENTO, Elimar Pinheiro do; LAGE, Cíntia Alvim. As Inovações Tecnológicas Podem Mudar a Natureza da Crise Ambiental? **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v.8, n.2, p. 212-226, mai.-ago 2019.

ORGANIZAÇÃO das Nações Unidas - ONU. **Agenda 2030 | Onu Brasil**. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em; 15 jun. de 2020.

ORGANIZAÇÃO Meteorológica Mundial – OMM. **Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2017**, n. 14, nov. 2018

OUYANG, Yan; ZHAO, Yongjun; SUN, Shiqing; HU, Changewi; PING, Lifeng. Effect of light intensity on the capability of different microalgae species for simultaneous biogas upgrading and biogas slurry nutrient reduction. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 104, p. 157-163, 2015.

PATTERSON, Tim; ESTEVES, Sandra; DINSDALE, Richard; GUWY, Alan. An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogás upgrading for transport fuel use in the UK. **Energy Policy**, v. 39, p. 1806-1816, 2011.

PIRES, J.C.M; ALVIM-FERRAZ, M.C.M.; MARTINS, F.G.; SIMÕES, M. Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 3043-3053, 2012.

PRANDINI, Jean Michel; SILVA, Márcio Luís Busi da; MEZZARI, Melissa Paola; PIROLI, Mateus; MICHELON, William; SOARES, Hugo Moreira. Enhancement of nutrient removal from swine wastewater digestate coupled to biogas purification by microalgae *Scenedesmus* spp. **Bioresource Technology**, v. 202, p. 67-75, 2016.

RIPPLE, William J. *et al.* World Scientists' Warning to Humanity: A Second Notice. **BioScience**, v. 67, n. 12, p. 1026-1028, 2017.

ROSA, Aldo Vieira da. **Processos de energias renováveis**. Elsevier, 3. ed., Rio de Janeiro, 2015.

SACHS, Ignacy. **Desenvolvimento includente, sustentável e sustentado**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

SACHS, Ignacy. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

SALAFUDIN; SETYOBUDI, Roy Hendroko; WAHONO, Satriyo Krido; NINDITA, Anggi; ADINURANI, Praptiningsih G.; NUGROHO, Yogo Adhi; SASMITO, Andi; LIWANG, Tony. Biological Purification System : Integrated Biogas from Small Anaerobic Digestion and Natural Microalgae. **Procedia Chemistry**, v. 14, p. 387-393, 2015.

SCARLAT, Nicolae; DALLEMAND, Jena-François; FAHL, Fernando. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, v. 129, p. 457-472, 2018.

SHOW, Pau Loke; TANG, Malcolm S. Y.; NAGARAJAN, Dilliriani; LING, Tau Chuan; OOI, Chien-Wei; CHANG, Jo-Shu. A Holistic Approach to Managing Microalgae for Biofuel Applications. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 18, 2017.

SILVA, Margane da; MARTINS, Danielli Paula. A Educação Ambiental e a Sua Importância Para a Implementação de um Sistema de Gestão Ambiental. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n.44, p. 40-57, jun. 2017.

SKJÅNES, Kari; REBOURS, Céline; LINDBLAD, Peter. Potential for green microalgae to produce hydrogen, pharmaceuticals and other high value products in a combined process. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 33, n. 2, p. 172-215, 2013.

SOFFIATI, Arthur. Fundamentos filosóficos e históricos para o exercício da ecocidadania e da ecoeducação. In LOUREIRO, C.F.B.; LAYRARGUES, P.P.; CASTRO, R. S. de. (Orgs.). **Educação ambiental: repensando o espaço da cidadania**. São Paulo: Cortez, p. 26-67. 2011.

SOLER, Antônio; DIAS, Eugênia Antunes. A educação ambiental na crise ecológica contemporânea. **Acesso Livre**, v. 5, p. 146-164, 2016.

SOUZA, Sueder Santos de; FERNANDES, Valdir. Análise e Caracterização das Ciências Ambientais no Brasil. **Caderno PAIC**, v. 14, n. 1, p. 511-524, 2013.

SRINUANPAN, Sirasit; CHEIRSILP, Benjamas; PRASERTSAN, Poonsuk. Effective biogas upgrading and production of biodiesel feedstocks by strategic cultivation of oleaginous microalgae. **Energy**, 148, p. 766-774, 2018.

TUCCI, A.; SANT'ANNA, C. L.; AZEVEDO, M. T. P.; MALONE, C. F. S.; WERNER, V. R.; ROSINI, E. F.; GAMA, W. A.; HENTSCHEKE, G. S.; OSTI, J. A. S.; DIAS, A. S.; JACINAVICIUS, F. R.; SANTOS, K. R. **Atlas de Cianobactérias e Microalgas de Águas Continentais Brasileiras**. Publicação eletrônica, Instituto de Botânica, Núcleo de Pesquisa em Ficologia. Instituto de Botânica, Núcleo de Pesquisa em Ficologia. 2019.

VDI 4630. **Fermentation of organic materials. Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests**. 92 p. Germany: Verein Deutscher Ingenieure – VDI, 2006.

YAN, Cheng; MUÑOZ, Raúl; ZHU, Liandong; WANG, Yanxin. The effects of various LED (light emitting diode) lighting strategies on simultaneous biogas upgrading and biogas slurry nutrient reduction by using of microalgae *Chlorella* sp. **Energy**, v. 106, p. 554-561, 2016.



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09