



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

CRISTIANO GUSMÃO SHIMABUKURO

**REVISÃO E ANÁLISE DO PROCESSO DE PURIFICAÇÃO FOTOSSINTÉTICA DO
BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS**

SOROCABA / SP

2025

CRISTIANO GUSMÃO SHIMABUKURO

**REVISÃO E ANÁLISE DO PROCESSO DE PURIFICAÇÃO FOTOSSINTÉTICA DO
BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e
Tecnologia, Sorocaba, como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Luis Armando De
Oro Arenas

SOROCABA / SP

2025

S556r	Shimabukuro, Cristiano Gusmão Revisão e análise do processo de purificação fotossintética do biogás em aterros sanitários / Cristiano Gusmão Shimabukuro. -- Sorocaba, 2025 70 p. : il., tabs., fotos Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba Orientador: Luis Armando de Oro Arenas 1. Biogás. 2. Microalgas. 3. Fotossíntese. 4. Aterro sanitário. I. Título.
-------	---

CRISTIANO GUSMÃO SHIMABUKURO

**REVISÃO E ANÁLISE DO PROCESSO DE PURIFICAÇÃO FOTOSSINTÉTICA DO
BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 07/10/2025

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em reunião de 07 de outubro de 2025.

Dedico este trabalho à minha família, o alicerce que engendrou meu desenvolvimento profissional e pessoal.

À minha companheira, que me apoia, me inspira e ilumina o caminho a ser trilhado.

E que este estudo sirva às próximas gerações, cujo trabalho possa fomentar conhecimento para o desenvolvimento de novas tecnologias baseadas na natureza.

RESUMO

O biogás possui metano na maior parcela de sua composição, cuja acumulação na atmosfera, o configura como um dos principais gases que contribuem para as mudanças climáticas. O Brasil é o quinto maior emissor de metano do mundo, ao passo que 48% das emissões do setor de resíduos estão associadas a aterros sanitários. O biogás, pode-se configurar com um passivo ambiental quando emitido para a atmosfera, mas também é um poderoso ativo quando valorizado, visto que o metano possui um alto poder calorífico e sua combustão pode liberar grandes quantidades de energia. Em razão ao modelo atual de destinação dos resíduos, valorizar o metano proveniente dos resíduos orgânicos aterrados é um caminho sustentável para mitigar sua emissão à atmosfera. O biogás trata-se de uma matéria prima similar ao gás natural, podendo ser empregado em projetos que envolvem a queima controlada do ativo, conversão em biometano para combustíveis veiculares, injeção em redes de abastecimento, entre outras aplicabilidades. Todavia, necessita-se de um tratamento prévio para subtrair as parcelas de gases que contaminam a qualidade do biogás. Atualmente, existem várias tecnologias para purificação do biogás, em sua maioria baseados em processos físico-químicos, mas que revelam um alto consumo de produtos químicos, de energia ou possuem um alto custo operacional e de implantação em território brasileiro. Para superar tais limitações, tecnologias baseadas em processos biológicos vêm sendo desenvolvidas para remover um ou mais contaminantes presentes no biogás. O presente estudo aborda uma revisão bibliográfica acerca do método biológico de purificação do biogás promovido pela fixação do CO_2 pelas microalgas durante o processo fotossintético e concomitantemente, o sequestro do H_2S presente no biogás pelas bactérias oxidantes de enxofre decorrente do oxigênio produzido pela fotossíntese. A revisão bibliográfica realizada abrange a compreensão do sistema de melhoria do biogás fotossintético, agrega informações sobre as configurações existentes, analisa os parâmetros que influenciam no sistema de purificação biológico proposto, identifica os entraves operacionais e estima a pegada terrestre sujeita à implantação deste sistema em aterros sanitários.

Palavras-chave: biogás; microalgas; fotossíntese; aterro sanitário.

ABSTRACT

Biogas is composed mostly of methane, and its accumulation in the atmosphere makes it one of the main gases contributing to climate change. Brazil is the fifth-largest emitter of methane in the world, with 48% of emissions from the waste sector associated with landfills. While an environmental liability when emitted into the atmosphere, biogas also becomes a powerful asset when valorized, as methane has a high calorific value, and its combustion can release large amounts of energy. Given the current model of waste disposal, valorizing methane from landfilled organic waste is a sustainable path to mitigate its emission into the atmosphere. Biogas is a material similar to natural gas and can be used in projects involving controlled combustion, conversion into biomethane for vehicle fuels, injection into supply networks, among other applications. However, it requires pre-treatment to remove the portions of gases that contaminate the quality of biogas. Currently, there are several technologies for biogas purification, mostly based on physicochemical processes, but they reveal high consumption of chemicals, energy, or have high operational and implementation costs in Brazil. To overcome these limitations, technologies based on biological processes are being developed to remove one or more contaminants present in biogas. This study presents a literature review on the biological method of biogas purification promoted by the fixation of CO₂ by microalgae during the photosynthetic process and, concurrently, the sequestration of H₂S present in biogas by sulfur-oxidizing bacteria due to the oxygen produced by photosynthesis. The literature review conducted encompasses an understanding of the photosynthetic biogas upgrading system, aggregates information on existing configurations, analyzes the parameters influencing the proposed biological purification system, identifies operational challenges, and estimates the land footprint subject to the implementation of this system in landfills.

Keywords: biogas; microalgae; photosynthesis; landfill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação Energética do Biogás.....	13
Figura 2 - Produção de Biometano em TWh na Europa.....	13
Figura 3 - Número de Plantas de Biometano na Europa.....	14
Figura 4 - Evolução Anual do Número de Plantas em Operação e Produção de Biogás	15
Figura 5 - Quantidade de Biogás Aproveitado Energeticamente em Comparação ao seu Potencial de Produção Teórico em 2022	15
Figura 6 - Evolução Anual do Número de Plantas de Biometano em Operação e Produção de Biogás	16
Figura 7 - Aproveitamento do Biogás para Geração de Energia Elétrica	16
Figura 8 - Aproveitamento do Biogás para Geração de Energia Térmica	17
Figura 9 - Aproveitamento do Biogás para Produção de Combustível Veicular	17
Figura 10 - Mercado de Tecnologias de Purificação do Biogás na União Europeia ..	19
Figura 11 - Mecanismo Simbiótico Durante a Melhoria Fotossintética do Biogás por Microalgas e Bactérias Oxidantes de Enxofre.....	20
Figura 12 - Painel do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento de 2022	26
Figura 13 - Panorama das Emissões e Remoções De Gases de Efeito Estufa no Brasil para o Setor de Resíduos em 2023.....	27
Figura 14 – Método de Lavagem com Água com Regeneração	28
Figura 15 – Método de Absorção Química	29
Figura 16 - Método de Separação por Membrana.....	30
Figura 17 - Método de Adsorção por Balanço de Pressão	31
Figura 18 - Esquema de um Sistema de Melhoria do Biogás por Fotossíntese em Lagoa com Alta Taxa de Algas (HRAP) interconectado a uma Coluna de Absorção.	33
Figura 19 - Esquema do Processo Fotossintético no Cloroplasto e o Ciclo de Calvin-Benson-Bassham (CBB) para Fixação de CO ₂	35
Figura 20 - Relação entre pH e Percentual de CO ₂ "livre", HCO ₃ ³⁻ e CO ₃ ²⁻ Dissolvidos em Água.....	36
Figura 21 - Sistema de Cultivo de Lagoa Aberta ou <i>Raceway Pond</i>	39
Figura 22 - Sistema de Cultivo de Algas em Lagoa Aberta do Tipo <i>Raceway Pond</i> ..	40
Figura 23 - Sistema de Cultivo de Algas em Lagoa Aberta do Tipo <i>Raceway Pond</i> da Universidade de Valladolid (Espanha).....	40
Figura 24 - Sistema de Cultivo de Algas em Fotobiorreatores Tubulares.....	43
Figura 25 - Sistema de Cultivo de Algas em Fotobiorreatores de Coluna.....	44
Figura 26 - Sistema de Cultivo de Algas em Fotobiorreatores em placas planas	45
Figura 27 - Coluna de “Bolhas”	46
Figura 28 - Coluna “Empacotada”	47
Figura 29 - Valorização do Biogás por Microalgas em Solução Alcalina Via Ciclo Carbonato/Bicarbonato	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
EBA	Associação Europeia de Biogás
CIBiogás	Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
HRAP	Lagoa de Alta Taxa de Algas
FBR	Fotobiorreator
CA	Coluna de Absorção
ER	Eficiência de Remoção
OD	Oxigênio Dissolvido
PSA	Adsorção por Balanço de Pressão
AC	Anidrase Carbônica

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS.....	22
	Objetivos Gerais	22
	Objetivos Específicos	22
2	METODOLOGIA.....	23
2.1	Revisão Bibliográfica e Contextualização	23
2.2	Análise Comparativa de Dados da Literatura.....	23
2.3	Estimativa de Viabilidade em Escala Industrial	24
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1	Emissões de Metano no Setor de Resíduos	25
3.2	Tecnologias Físico-Químicas de Purificação do Biogás.....	27
3.2.1	Absorção Física e Química	28
3.2.2	Separação por Membrana	29
3.2.3	Adsorção por Balanço de Pressão.....	30
3.2.4	Separação por Criogenia	31
3.3	Fundamentos da Melhoria Fotossintética do Biogás.....	31
3.3.1	A Fotossíntese	33
3.3.2	O Carbono	35
3.3.3	As Microalgas	36
3.3.4	Sistema de Cultivo das Microalgas	38
3.3.5	Coluna de Absorção (CA)	46
3.3.6	Bactéria Oxidantes de Enxofre	48
3.4	Parâmetros Operacionais	49
3.4.1	Iluminação	49
3.4.2	Temperatura.....	50
3.4.3	Potencial Hidrogeniônico (pH)	51
3.4.4	Relação Líquido/Gás (L/G)	54
4	DISCUSSÃO E RESULTADOS	56
4.1	Controle do pH.....	57
4.2	Escolha da Coluna de Absorção	58
4.3	Controle da Relação L/G.....	58
4.4	Escolha das Espécies de Microalgas.....	59

4.5	Escolha das Espécies de Bactérias Oxidantes de Enxofre.....	59
4.6	Eficiência de Remoção (ER)	60
4.7	Cálculo para Perspectiva do Projeto em Escala Industrial.....	61
4.8	Design do Meio de Cultivo	62
5	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Um aterro sanitário pode ser considerado como um reator biológico no qual as principais componentes de entrada são os resíduos e a água e os principais componentes de saídas são os gases e o chorume. O metano e o dióxido de carbono são os principais gases provenientes da decomposição da fração orgânica degradável dos resíduos em condições anaeróbicas.

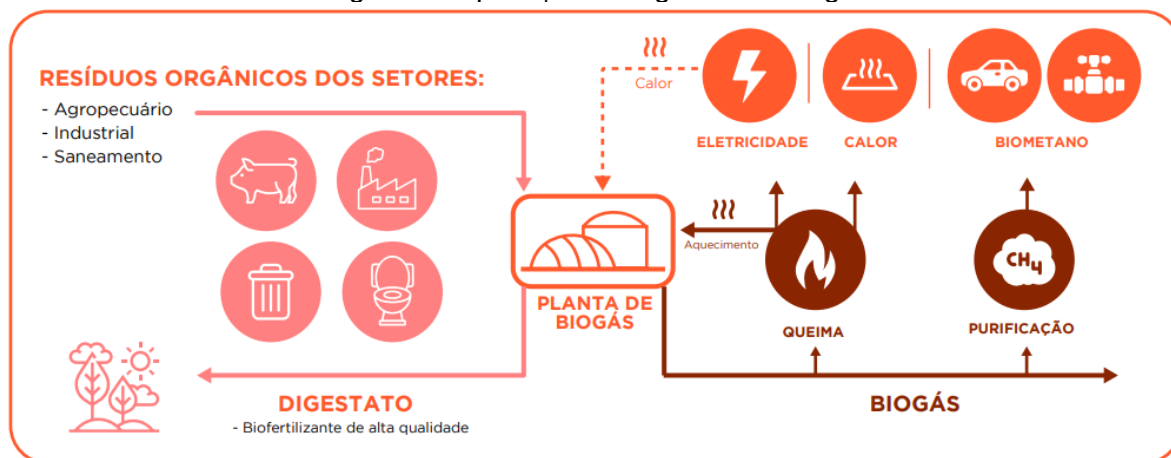
O biogás proveniente de aterros sanitários é um composto gasoso cuja composição possui metano (CH_4 , 40 – 75 % v/v), dióxido de carbono (CO_2 , 15 – 60 % v/v), e traços de sulfeto de hidrogênio (H_2S , 0,005 – 2 % v/v), oxigênio (O_2 , 0 – 2 % v/v), nitrogênio (N_2 , 0 – 3 % v/v), amônia (NH_3 , < 1 % v/v), monóxido de carbono (CO , < 0.6 % v/v), hidrocarbonetos (VOC, < 0.6 % v/v), vapor de água (5 – 10) % v/v) e siloxanos (0 – 0.02 % v/v) (Ryckebosch et al., 2011).

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o metano e dióxido de carbono são os principais gases que contribuem para a intensificação do efeito estufa. No Brasil, o CO_2 possui a maior contribuição relativa de gases de efeito estufa (GEE) emitidos para a atmosfera com 67%, seguido do CH_4 com 24% (SEEG, 2024).

A vida útil do metano na atmosfera é muito menor do que o dióxido de carbono (CO_2), mas o CH_4 é mais eficiente em capturar radiação do que o CO_2 . O potencial efeito de aquecimento global do metano num período de 100 anos (GWP-100) é equivalente a 28 vezes o do dióxido de carbono (CO_2), ou seja, uma tonelada de CH_4 equivale a 28 t CO_2 e (toneladas equivalentes de gás carbônico GWP-100) (SEGG, 2022).

No entanto, quando o metano é captado ou retido, este deixa de ser emitido à atmosfera, tornando-se em um valioso ativo como fonte energética, em razão do alto poder calorífico presente em suas propriedades físicas. Visto que o CH_4 é o principal componente do biogás, a valorização do mesmo atua em benefício da redução das emissões dos GEE, reaproveita resíduos orgânicos, promove uma fonte energia renovável, pode ser utilizado para calefação, abastecimento veicular, injetado em redes de abastecimento, geração de energia elétrica, impulsiona o mercado de carbono e substitui a utilização de fontes fósseis, corroborando com a mitigação do aquecimento global.

Figura 1 - Aplicação Energética do Biogás

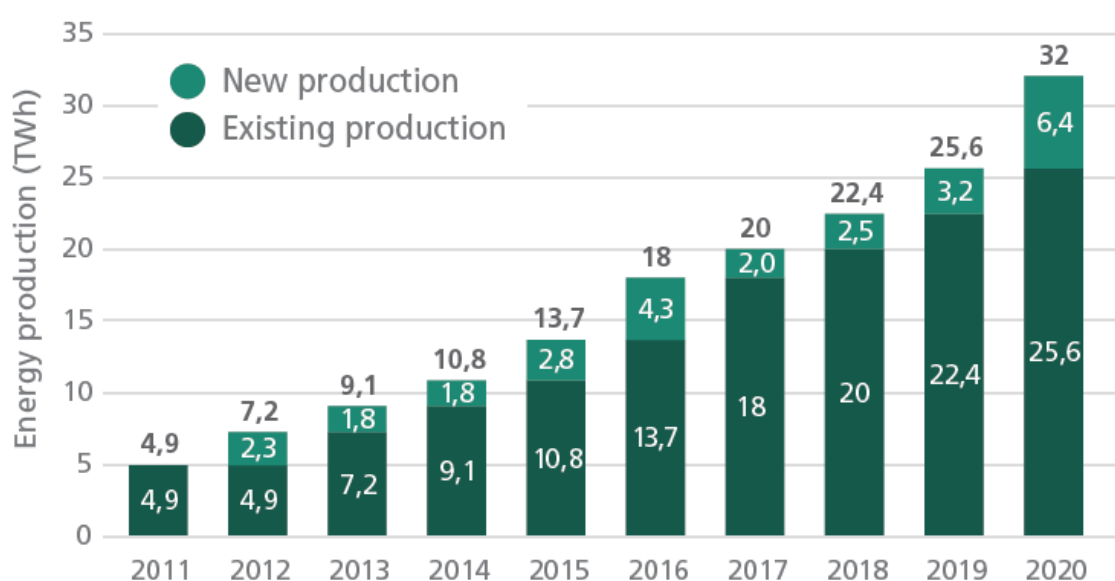


Fonte: CIBiogás (2022).

Observando por uma perspectiva eurocêntrica, de acordo com o Relatório Estatístico da Associação Europeia de Biogás (EBA, 2018), o número total de centrais de biogás na Europa atingiu 17.783 plantas em 2017. A Alemanha foi líder na produção de biogás na Europa com 10.971 plantas, seguida pela Itália e França (1.655 e 742 plantas, respectivamente).

Segundo o Relatório Estatístico da EBA de 2021, a Capacidade Elétrica Instalada (IEC) das centrais de biogás na Europa foi de 32 TWh.

Figura 2 - Produção de Biometano em TWh na Europa



Fonte: EBA (2021).

Para os dados referentes às plantas de biometano, o reporte da EBA publicado em abril de 2023, apresenta um total de 1322 plantas em operação.

Figura 3 - Número de Plantas de Biometano na Europa

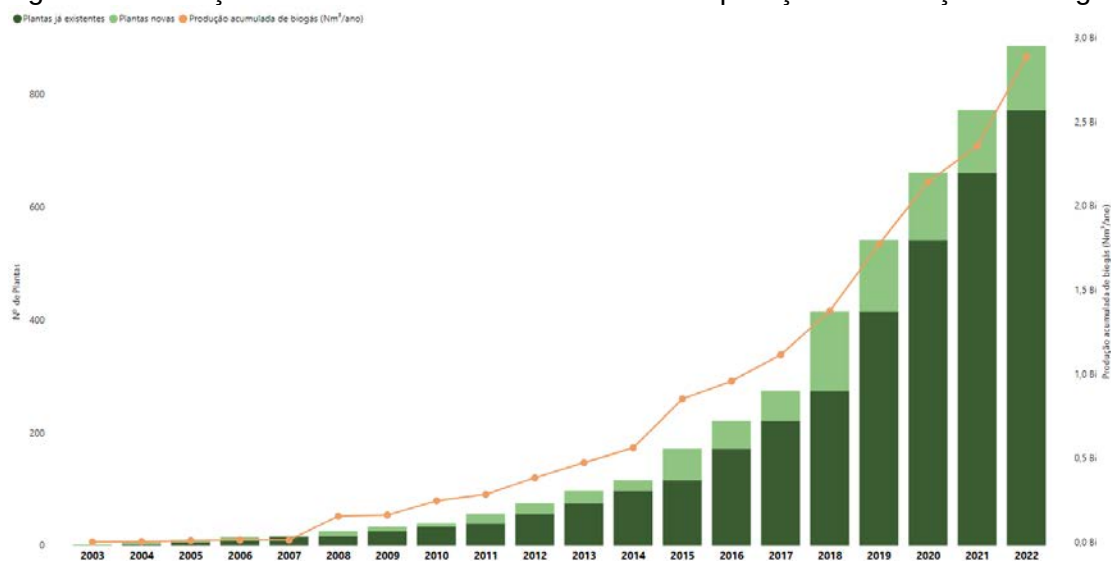


Fonte: EBA, 2023.

A produção de biometano no velho continente teve um crescimento acelerado na última década. Do total, 58% das centrais de biometano atualmente ativas na Europa estão ligadas à rede de distribuição, 19% estão ligados à rede de transportes, 9% das centrais europeias de biometano não têm ligação à rede e, para os restantes 14%, das fábricas da Europa, nenhuma informação está disponível na base de dados da Associação Europeia de Biogás (EBA, 2023).

Atualmente, de acordo com a CIBiogás (2023), o Brasil conta com 936 plantas em operação com um volume de produção de biogás equivalente a 3,45 bilhões de Nm³/ano.

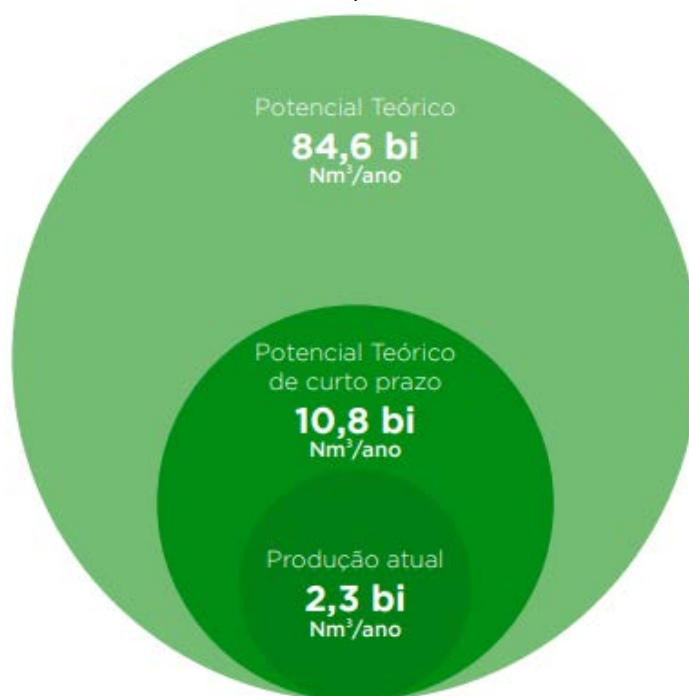
Figura 4 - Evolução Anual do Número de Plantas em Operação e Produção de Biogás



Fonte: CIBiogás (2023).

A atuação do biogás em território brasileiro vem crescendo exponencialmente nos últimos anos, porém a produção atual ainda é tímida em relação ao potencial energético que esta matriz pode oferecer.

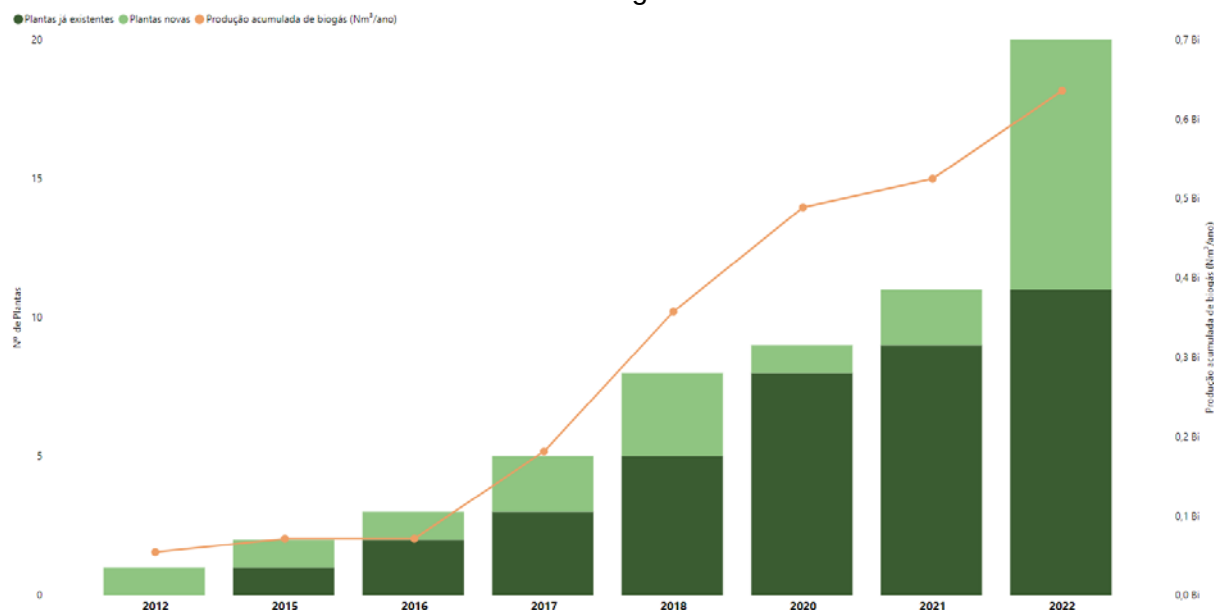
Figura 5 - Quantidade de Biogás Aproveitado Energeticamente em Comparação ao seu Potencial de Produção Teórico em 2022



Fonte: CIBiogás (2022).

A carência de tecnologias capazes de purificar e melhorar o biogás bruto, estão ainda dependentes de pesquisa e tecnologias recebidas do exterior, observada pelo número de plantas de biometano operando em território brasileiro em relação ao total de plantas instaladas.

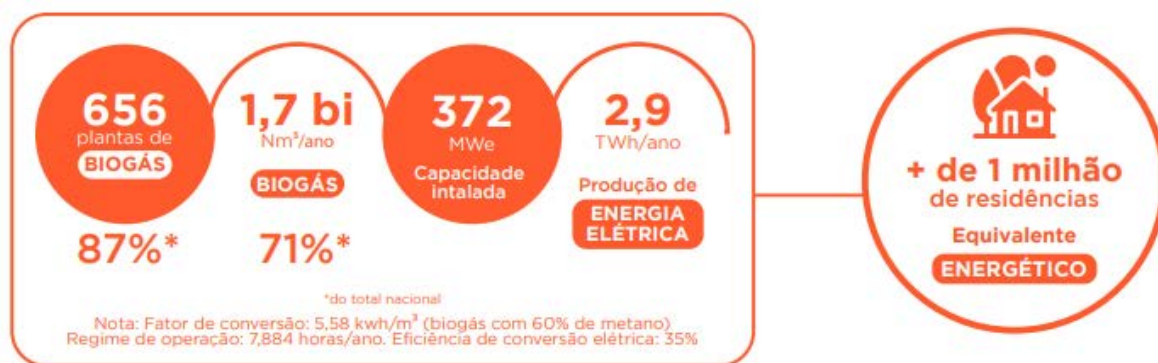
Figura 6 - Evolução Anual do Número de Plantas de Biometano em Operação e Produção de Biogás



Fonte: CIBiogás (2023).

O uso do biogás para geração de energia elétrica apresenta-se como a principal aplicação energética realizada nas plantas de biogás brasileiras. Em termos de representatividade, no ano de 2021, cerca de 87% das unidades em operação utilizaram esta fonte energética para tal finalidade, resultando no uso de 71% do volume de biogás produzido para geração de energia elétrica (CIBiogás, 2021).

Figura 7 - Aproveitamento do Biogás para Geração de Energia Elétrica



Fonte: CIBiogás, 2022.

O aproveitamento térmico do biogás é feito em 11% das unidades em operação para as mais diversas utilidades. Alguns exemplos são a queima em caldeira para produzir vapor, a secagem de grãos para produzir ração, o aquecimento de aviários e a secagem de lodo de esgoto. Em termos de volume, aproximadamente 7% do biogás produzido em 2021 teve como destino a geração de energia térmica (CIBiogás, 2021).

Figura 8 - Aproveitamento do Biogás para Geração de Energia Térmica



Fonte: CIBiogás (2022).

Unidades que possuem sistema de purificação de biogás com geração de biometano para autoconsumo ou comercialização, somam 10 plantas, o que equivale a 1% do total nacional. Entretanto, em termos de volume, tais plantas correspondem a 23% do volume total de biogás produzido em 2021 (CIBiogás, 2021).

Figura 9 - Aproveitamento do Biogás para Produção de Combustível Veicular



Fonte: CIBiogás, 2022.

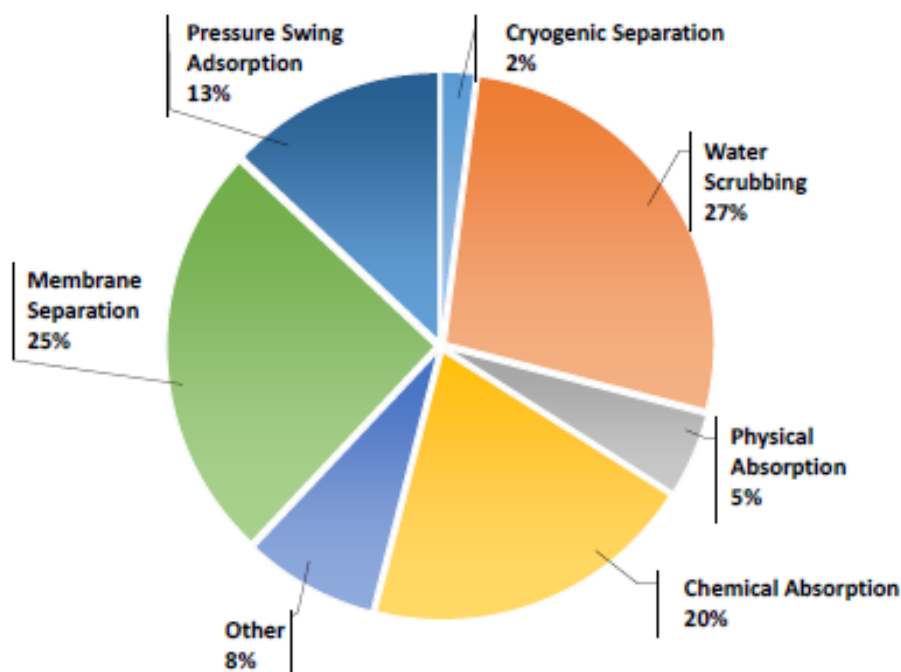
Existem obstáculos operacionais para a utilização do biogás bruto em razão das parcelas de contaminantes presentes em sua composição. Nos processos de melhoria do biogás, as tecnologias desenvolvidas visam isolar o metano e extrair os outros componentes, visto que estes são considerados impurezas no biogás. A presença de CO_2 reduz o poder calorífico do biogás, ocupando espaço na mistura. A

presença de altas concentrações de O_2 no biogás pode promover o perigo de explosão (Castro et al., 2022). O sulfeto de hidrogênio é um gás que confere mau odor, além de ser corrosivo e tóxico. Ele gera emissão de óxidos de enxofre (SO_x) durante a combustão, promovendo a intensificação de chuvas ácidas, além de causar a corrosão nos tanques de armazenamento, nas tubulações metálicas, em motores de combustão interna e, de uma forma geral, resulta na deterioração da infraestrutura de valorização do biogás (Torres et al., 2021). A água pode provocar a corrosão de compressores, tanques de armazenamento de gás e motores de combustão interna devido a sua reação com H_2S , NH_3 e CO_2 . Os siloxanos em combustão geram a formação de SiO_2 e quartzos microcristalinos que se depõem em velas de ignição, válvulas, cabeçotes de cilindro e nas superfícies dos motores de combustão interna, resultando em abrasão, superaquecimento, avarias e mau funcionamento no equipamento. Os hidrocarbonetos, cloretos e fluoretos podem ser agentes corrosivos quando submetidos a combustão, além de serem potencialmente tóxicos à saúde humana (Ryckebosch; Drouillon; Vervaeren, 2011).

Logo, a fim de promover uma melhoria do biogás bruto, é necessário realizar duas etapas principais: extração dos componentes vestigiais presentes no biogás e um processo de melhoria do poder calorífico (Ryckebosch; Drouillon; Vervaeren, 2011).

Há diferentes tecnologias de melhoria do biogás, em grande maioria, tecnologias físico-químicas que carecem de um alto custo operacional e de implantação, restringindo sua difusão e viabilidade no mercado (Torres et al., 2021).

Figura 10 - Mercado de Tecnologias de Purificação do Biogás na União Europeia



Fonte: EBA, 2018.

Como cada tecnologia de purificação de biogás tem a faixa de concentração apropriada e uma eficiência de remoção (ER) máxima para impurezas específicas, buscar cegamente uma alta ER pode incorrer em custos excessivos que reduzem significativamente o benefício de obter energia do biogás. Portanto, a eficiência de remoção deve ser deduzida com base nos requisitos da aplicação final do biogás, visando selecionar a tecnologia de remoção mais adequada e otimizar as condições operacionais (Zhang, 2021).

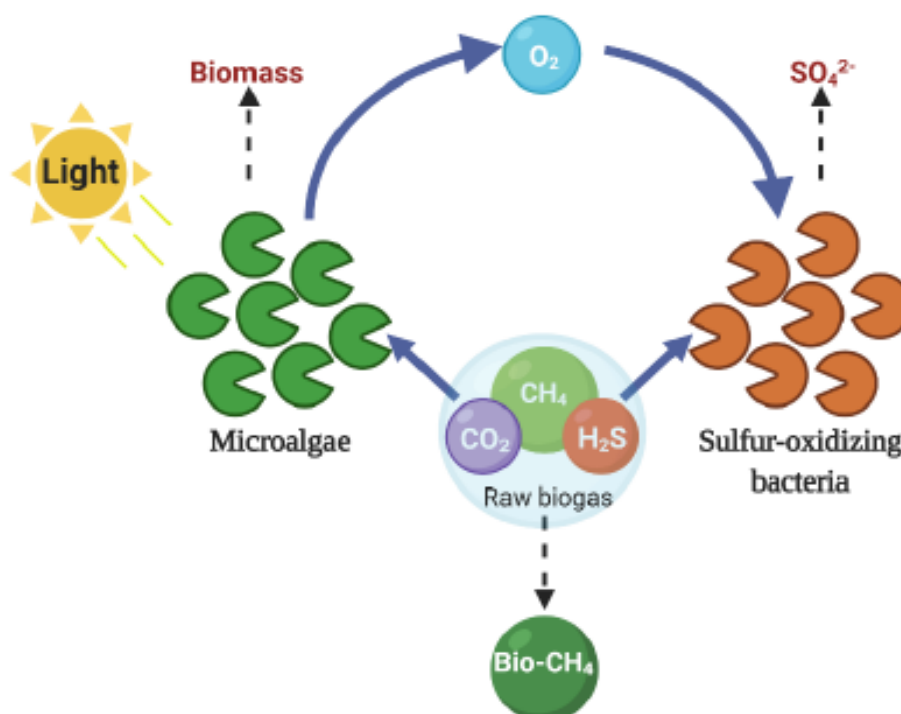
Geralmente, as tecnologias de remoção de diferentes impurezas do biogás são aplicadas separadamente, o que complica o processo de purificação do biogás e aumenta o custo de instalação. A avaliação técnico-econômica e a comparação de desempenho são cruciais para identificar tecnologias de purificação de biogás apropriadas para aplicações reais. (Zhang, 2021).

Para superar estas limitações, grandes esforços vêm sendo empregados para desenvolver e validar tecnologias biológicas capazes de eliminar os contaminantes presentes no biogás, com baixo custo operacional e menos impactos ambientais.

Uma alternativa de enriquecimento do biogás que se mostrou promissora, sustentável e respeitosa ao meio ambiente é embasada no uso de um consórcio de microalgas e bactérias que atuam no sequestro simultâneo do CO₂ e do H₂S.

Neste processo, as microalgas utilizam a luz solar incidente no sistema para fixar o gás carbônico presente no biogás em forma de biomassa por meio da fotossíntese. Paralelamente, as bactérias oxidantes de sulfeto criam uma relação simbiótica com microalgas ao oxidar o sulfeto de hidrogênio presente no biogás utilizando a concentração de oxigênio dissolvido (OD) proveniente da atividade fotossintética (Toledo-Cervantes et al., 2017).

Figura 11 - Mecanismo Simbiótico Durante a Melhoria Fotossintética do Biogás por Microalgas e Bactérias Oxidantes de Enxofre



Fonte: Torres et al. (2021).

1.1 JUSTIFICATIVA

O biogás possui grande capacidade de crescimento em razão do seu potencial energético, contudo as plantas de geração carecem de tecnologias de purificação para diversas aplicabilidades. Sua valorização atua em benefício da redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), reaproveita resíduos orgânicos, promove uma fonte energia renovável, gera receita pela comercialização de créditos de carbono e substitui a utilização de fontes fósseis, corroborando com a mitigação das mudanças climáticas, com a transição e diversificação da matriz energética. Diante deste cenário, a tecnologia de melhoria fotossintética abrange uma alternativa que se mostrou

promissora, sustentável, com baixos custos operacionais, baixo impacto ambiental, respeitosa ao meio ambiente e que incentiva a economia circular.

Este potencial, contrasta com um paradoxo ambiental e energético. Por um lado, seu principal componente, o metano (CH_4), é visto como um gás de efeito estufa, com um potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2) em um horizonte de 100 anos. Por outro lado, quando capturado e valorizado, o metano se torna um valioso ativo energético devido ao seu alto poder calorífico.

O Brasil figura como o quinto maior emissor de metano do mundo, e os aterros sanitários são responsáveis por 48% das emissões do setor de resíduos no país. Esta realidade transforma a gestão de resíduos sólidos, especialmente a destinação em aterros, em um ponto crítico para as metas climáticas nacionais.

No entanto, a utilização do biogás bruto é dificultada pela presença de contaminantes como por exemplo o CO_2 , que reduz poder calorífico do composto, assim como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), um gás tóxico e corrosivo que danifica equipamentos e causa poluição secundária (SO_x). As tecnologias físico-químicas de purificação, embora eficientes, frequentemente implicam altos custos de implantação e operação, além de elevado consumo de energia e produtos químicos, o que limita sua disseminação no Brasil.

Neste contexto, tecnologias biológicas surgem como uma alternativa promissora. O método de melhoria fotossintética, que utiliza um consórcio de microalgas e bactérias oxidantes de enxofre, destaca-se por sua capacidade de remover simultaneamente o CO_2 e o H_2S em uma única etapa. Esta abordagem sustentável não apenas purifica o biogás, mas também o faz com potenciais custos operacionais mais baixos e menor impacto ambiental. Portanto, este trabalho se justifica pela necessidade de compilar, analisar e avaliar o conhecimento existente sobre esta tecnologia emergente, investigando seus parâmetros operacionais críticos e estimando sua viabilidade de implantação em aterros sanitários, um dos principais focos de emissão de metano no Brasil.

1.2 OBJETIVOS

OBJETIVOS GERAIS

Realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre o método de enriquecimento do biogás por fotossíntese combinado à remoção do sulfeto de hidrogênio por bactérias oxidantes de enxofre, analisando os parâmetros operacionais que governam sua eficiência e estimando a área necessária para a implementação do sistema em escala industrial, no contexto de aterros sanitários.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar os fundamentos do processo de melhoria fotossintética do biogás, detalhando o mecanismo simbiótico de fixação de CO_2 pelas microalgas e a oxidação de H_2S pelas bactérias.
- Identificar e analisar, com base na literatura, os principais parâmetros operacionais que influenciam o desempenho do sistema, como o Potencial Hidrogeniônico (pH), a relação Líquido/Gás (L/G), a temperatura, as configurações de reatores e as espécies de microrganismos utilizadas.
- Comparar as vantagens e desvantagens de diferentes sistemas de cultivo de microalgas, incluindo sistemas abertos (lagoas do tipo *raceway pond*) e sistemas fechados (fotobiorreatores), no contexto da melhoria do biogás.
- Realizar um cálculo de dimensionamento para estimar e comparar a pegada territorial (*land footprint*) necessária para a implantação de um sistema de lagoa aberta e de um sistema de fotobiorreatores de placas planas, com base na demanda de biogás de uma usina elétrica hipotética de 1,5 MW.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido em três etapas metodológicas para avaliar o processo fotossintético de melhoria de biogás de aterro, como segue:

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONTEXTUALIZAÇÃO

Realizou-se uma revisão bibliográfica utilizando bancos de dados como Google Acadêmico, Scopus e Scielo. A busca concentrou-se em publicações dos últimos cinco anos, utilizando palavras-chave como "photosynthetic biogas upgrading" e "algae culture". Esta etapa teve como objetivo construir o referencial teórico sobre (a) as emissões de metano no setor de resíduos no Brasil, (b) as tecnologias físico-químicas convencionais de purificação e (c) os fundamentos biológicos e operacionais da melhoria fotossintética, incluindo o processo de fotossíntese, a química do carbono em meio aquoso, os sistemas de cultivo e o papel das bactérias oxidantes de enxofre.

2.2 ANÁLISE COMPARATIVA DE DADOS DA LITERATURA

Para aprofundar a análise dos parâmetros operacionais, foi elaborada uma base de dados quantitativa. Esta etapa consistiu na extração e compilação de dados de múltiplos estudos científicos, focando nos seguintes parâmetros:

- **Configuração do sistema:** Tipo e dimensões da coluna de absorção e do sistema de cultivo;
- **Condições operacionais:** Vazões de líquido e gás, relação L/G e pH do meio de cultivo;
- **Composição do biogás:** Concentrações de CH₄, CO₂ e H₂S na entrada e na saída do sistema;
- **Eficiência de Remoção (ER):** Percentual de remoção de CO₂ e H₂S alcançado em cada estudo.

Os dados compilados foram utilizados para gerar análises gráficas que permitiram visualizar a influência do pH e da relação L/G sobre a eficiência de remoção de CO₂ e a concentração de O₂ no biogás tratado.

2.3 ESTIMATIVA DE VIABILIDADE EM ESCALA INDUSTRIAL

Com base nos conhecimentos extraído das etapas anteriores, foi realizado um cálculo de dimensionamento para estimar a área necessária para implementar o sistema em escala industrial. Esta etapa seguiu o seguinte raciocínio:

- **Definição de um cenário hipotético:** Uma usina elétrica com 1,5 MW de potência instalada, operando continuamente com uma eficiência de conversão de 35%.
- **Cálculo da demanda de biogás:** Determinação do volume diário de biogás melhorado (com 90% de CH₄) necessário para alimentar a usina, utilizando o poder calorífico inferior do metano (35,8 MJ/m³).
- **Dimensionamento do sistema de cultivo:** Com base em uma relação L/G de 0,5, calculou-se o volume diário de caldo de cultivo em circulação.
- **Cálculo da pegada terrestre:** A área necessária para a implantação foi estimada para dois sistemas distintos: Uma lagoa aberta do tipo *raceway pond* (HRAP), assumindo uma profundidade de 0,3 metros e um sistema de fotobiorreatores de placas planas (FPP), utilizando sua razão superfície/volume para calcular a área ocupada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

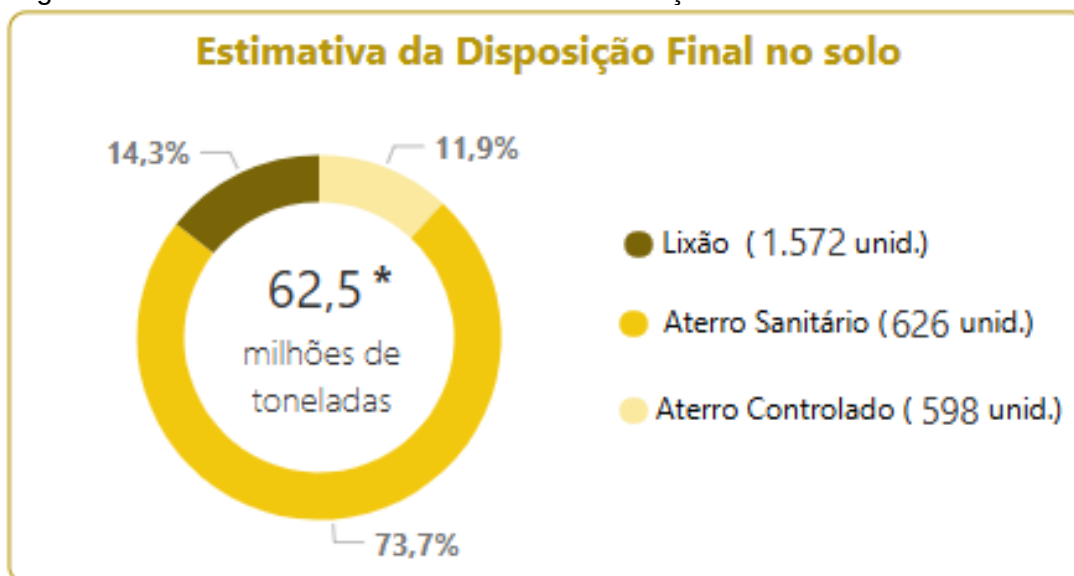
Visando um melhor entendimento acerca do assunto, a revisão bibliográfica está descrita dentre as subseções a seguir, apresentando os principais tópicos envolvidos na melhoria do biogás.

3.1 EMISSÕES DE METANO NO SETOR DE RESÍDUOS

Sancionada a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010) foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) cujo país estabeleceu regras e obrigações que incentivam a sociedade a praticar hierarquicamente a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. O Brasil sofre alguns desafios para o cumprimento das determinações da PNRS, por exemplo, a expansão da coleta seletiva, incentivo à cultura ativa da sociedade na separação dos resíduos na fonte, desenvolvimento de hábitos de consumo sustentável, destinação adequada dos rejeitos, erradicação dos lixões, além de práticas que correspondam à hierarquia de gestão, no que dizem respeito a medidas como prevenção, minimização, reutilização e reciclagem devem ser priorizadas. No entanto, essas opções ainda não são amplamente disseminadas a nível nacional.

No ano de 2022, os brasileiros alcançaram um total anual de geração aproximado de 62,5 milhões de toneladas ou 171,2 mil toneladas diárias de resíduos (SNIS, 2023). Visto que em 2022, 73,7% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados no Brasil foram dispostos em aterros sanitários (SNIS, 2023) e os RSU são compostos em média por 52% de matéria orgânica, cerca de 65,6 mil t/dia de resíduos orgânicos foram confinados em aterros sanitários.

Figura 12 - Painel do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento de 2022

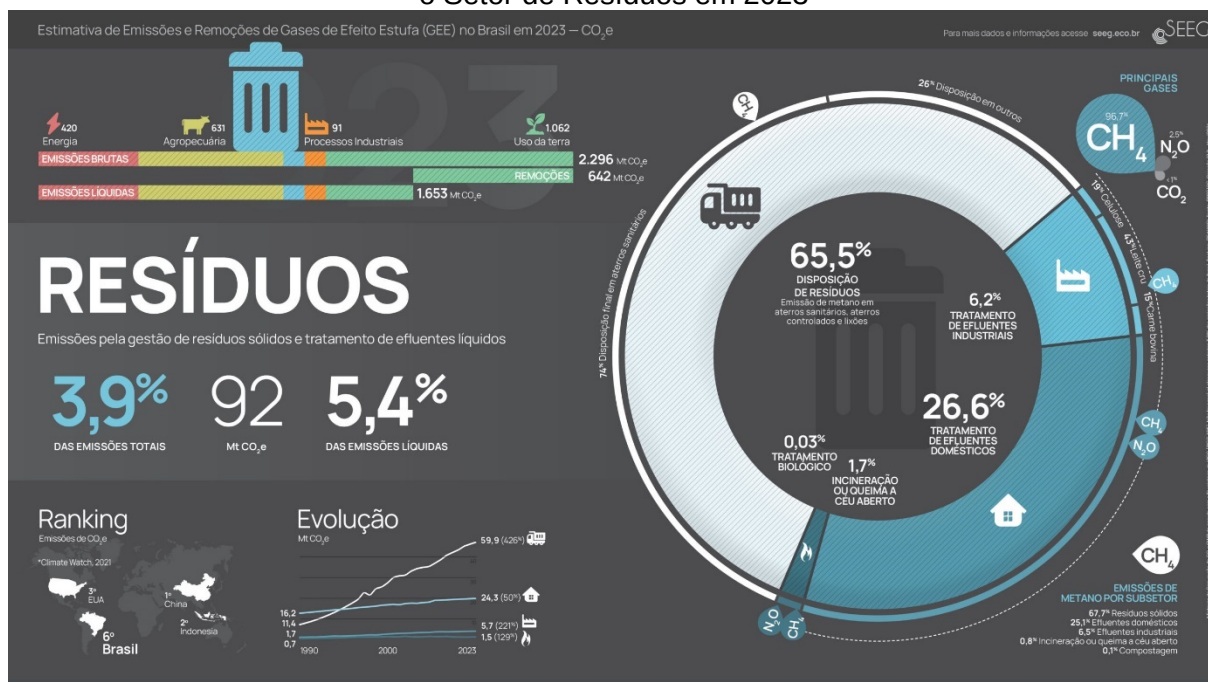


Fonte: SNIS (2023).

O Brasil é o quinto maior emissor de metano do mundo. Sozinho ele emite o equivalente a 5,5% do metano do planeta, enquanto a participação do país nas emissões gerais de gases de efeito estufa é de 3,3% (SEEG, 2022). As emissões de metano em aterros sanitários representam umas das principais atividades emissoras de gases de efeito estufa em regiões metropolitanas. A maior parte das emissões do setor de resíduos estão associadas a essa lógica de tratamento (48% das emissões totais de todo o setor) (SEEG, 2024).

Em 2023, segundo o relatório do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), a disposição final de resíduos sólidos foi responsável pela emissão de 60,2 MtCO₂e. O metano corresponde a 96,7% dos principais Gases de Efeito Estufa (GEE) emitidos pelo setor de resíduos, ao passo que 67,7% deste CH₄ emitido é proveniente da disposição de resíduos sólidos e aproximadamente 74% do RSU é disposto em aterro sanitários. Logo, cerca de 44,5 MtCO₂e de metano foram emitidas à atmosfera oriundas de aterros sanitários (SEEG, 2024).

Figura 13 - Panorama das Emissões e Remoções De Gases de Efeito Estufa no Brasil para o Setor de Resíduos em 2023



Fonte: SEEG, Observatório do Clima (2024).

O aproveitamento energético aparece como uma medida na priorização da gestão adequada de resíduos sólidos (e também se qualifica como uma importante medida de mitigação) por meio da recuperação de biogás em aterros sanitários, seja por queima em *flare* ou por recuperação energética (SEEG, 2024).

Em 2023, foram recuperadas 565 mil toneladas de CH₄ em 54 aterros sanitários, o que representou um aumento de 7% em relação ao ano anterior. A recuperação do biogás é responsável por evitar a emissão de cerca de 20% de todo metano gerado na disposição final (SEEG, 2024).

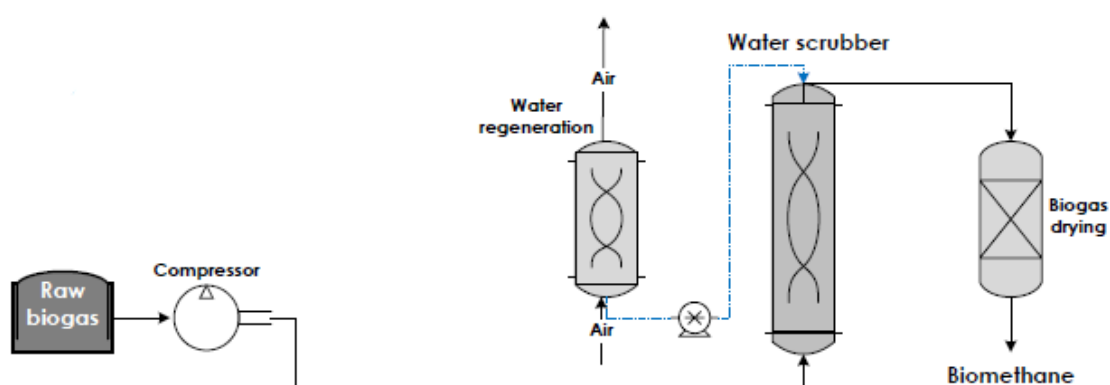
3.2 TECNOLOGIAS FÍSICO-QUÍMICAS DE PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

As tecnologias físico-químicas para a valorização do biogás são técnicas altamente eficientes e robustas, oferecendo recuperações de metano > 96%, com ampla disponibilidade comercial. No entanto, estas tecnologias apresentam um elevado consumo de energia, geram diversos impactos ambientais e demandam de altos custos operacionais e requisitos químicos, o que limita uma maior ampliação dos sistemas de valorização generalizada do biometano como fonte de energia renovável (Muñoz et al., 2015).

3.2.1 Absorção Física e Química

O método de lavagem com água¹ é a tecnologia de atualização de biogás mais comumente implementada, atingindo até 99% de pureza de CH₄ no biogás atualizado. Esta tecnologia baseia-se na separação do CO₂ e do H₂S do biogás devido à sua maior solubilidade desses gases em água em comparação com o CH₄ (de acordo com a lei de Henry, a solubilidade do CO₂ em água a 25 °C é aproximadamente 26 vezes maior em comparação com a do CH₄) (Angelidaki et al., 2018). O uso de uma solução química² (por exemplo, alcanolaminas ou soluções aquosas alcalinas) aumenta a transferência de massa gás-líquido de CO₂, reduzindo assim as taxas de reciclagem de líquido necessárias e a pressão operacional na coluna de absorção, o que também limita as perdas de CH₄. Nesta configuração, o H₂S é absorvido simultaneamente no purificador de aminas (Angelidaki et al., 2018). Todavia, apesar do elevado teor de CH₄ no biometano (até 99,8%), a utilização de uma solução química tóxica e corrosiva e a necessidade de regeneração de solvente numa unidade de dessorção, podem acarretar potenciais riscos ambientais, elevados requisitos de energia e aumento custos de investimento e operacionais (Bauer et al., 2013; Ryckebosch et al., 2011).

Figura 14 – Método de Lavagem com Água com Regeneração

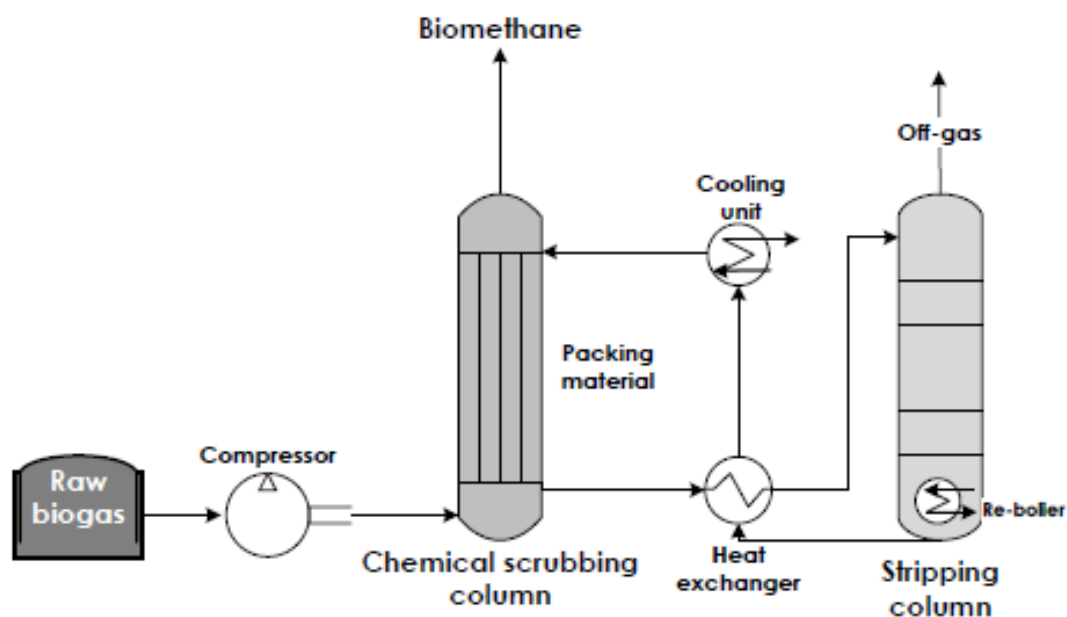


Fonte: Adaptado de Torres et al. (2021).

¹ Em inglês, o método é comumente conhecido como “water scrubbing”.

² Em inglês, o método é comumente conhecido como “amine scrubbing”.

Figura 15 – Método de Absorção Química

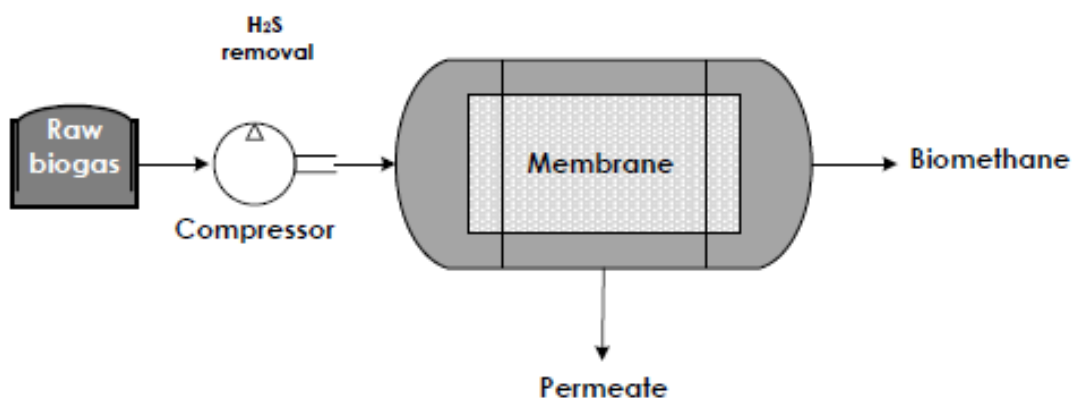


Fonte: Adaptado de Torres et al. (2021).

3.2.2 Separação por Membrana

A separação por membrana depende da permeabilidade seletiva dos componentes do biogás através das membranas sob configurações gás-gás (em alta pressão) ou gás-líquido. De acordo com a Literatura, o teor de CH_4 no biogás melhorado pode atingir até 98%. Apesar desta elevada recuperação de CH_4 , esta tecnologia apresenta grandes desvantagens, como o elevado custo das membranas, sua frequência de substituição, custo de destinação das membranas contaminadas, além do maior investimento de tecnologias específicas para remoção obrigatória de H_2S , particulados e siloxanos do biogás bruto antes da atualização, a fim de evitar problemas de corrosão ou entupimento (Bauer et al., 2013; Persson et al., 2007).

Figura 16 - Método de Separação por Membrana



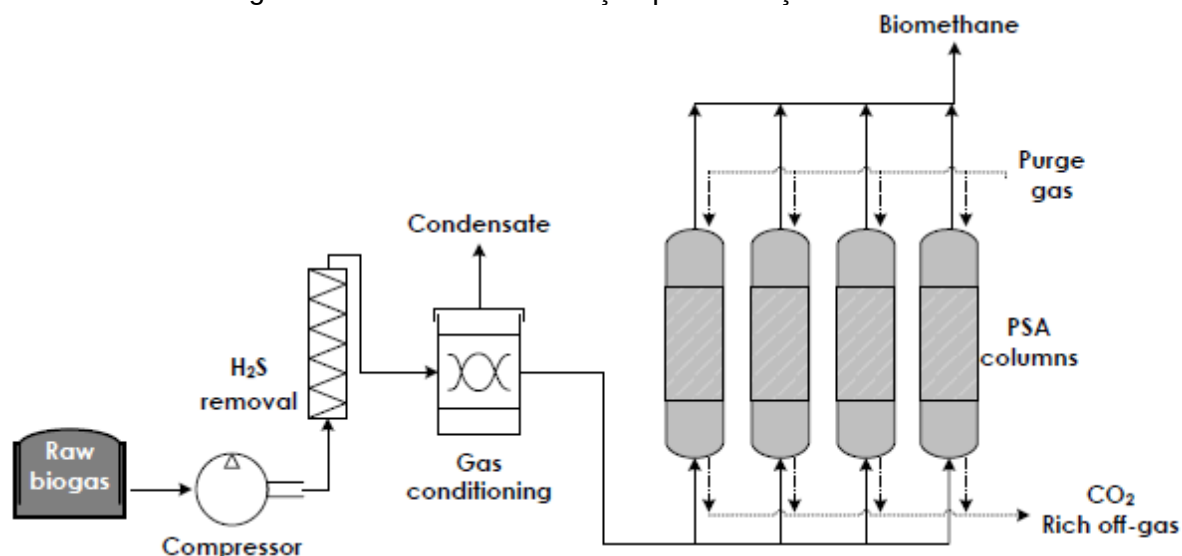
Fonte: Adaptado de Torres et al. (2021).

3.2.3 Adsorção por Balanço de Pressão

A adsorção por balanço de pressão³ (PSA) baseia-se na diferente afinidade dos contaminantes do biogás com determinados adsorventes, tipicamente carvão ativado, zeólitas, alumina ativada ou sílica gel, permitindo sua retenção seletiva em uma coluna vertical compactada trabalhando em alta pressão. As unidades PSA convencionais consistem em 4 colunas interligadas para pressurização sucessiva, adsorção de 4 a 10 bar, despressurização e dessorção para regeneração do adsorvente (Awe et al., 2017). Esta tecnologia é simples em termos de operação e apresenta um uso moderado de energia e investimento de capital (Augeletti et al., 2017), entretanto nesta configuração, a adsorção de H₂S é irreversível, portanto, o sistema carece de uma remoção pretérita do gás sulfídrico antes da injeção do biogás na coluna PSA (Angelidaki et al., 2018).

³ Em inglês, o método é comumente conhecido como “pressure swing adsorption” ou pela sigla “PSA”.

Figura 17 - Método de Adsorção por Balanço de Pressão



Fonte: Adaptado de Torres et al. (2021).

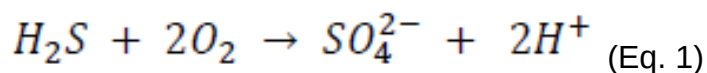
3.2.4 Separação por Criogenia

A separação criogênica pode remover CO_2 , N_2 e O_2 do biogás bruto devido às diferentes temperaturas de condensação e pressões de vapor. O biogás é inicialmente seco e comprimido até 80 bars e gradualmente resfriado até temperaturas de -110°C . Esta diminuição gradual da temperatura implica a condensação de H_2O , siloxanos, VOCs e CO_2 , o que acaba por resultar num teor de $\text{CH}_4 > 97\%$ no biometano melhorado (Ryckebosch et al., 2011; Sun et al., 2015). Contudo, a separação criogênica de CO_2 ainda se encontra numa fase embrionária, apresentando elevados custos de investimento e de operação, e com poucas instalações em funcionamento à escala comercial. As perdas de CH_4 e os problemas de entupimento derivados da solidificação do CO_2 estão entre os principais problemas operacionais desta tecnologia (Bauer et al., 2013; Muñoz et al., 2015).

3.3 FUNDAMENTOS DA MELHORIA FOTOSSINTÉTICA DO BIOGÁS

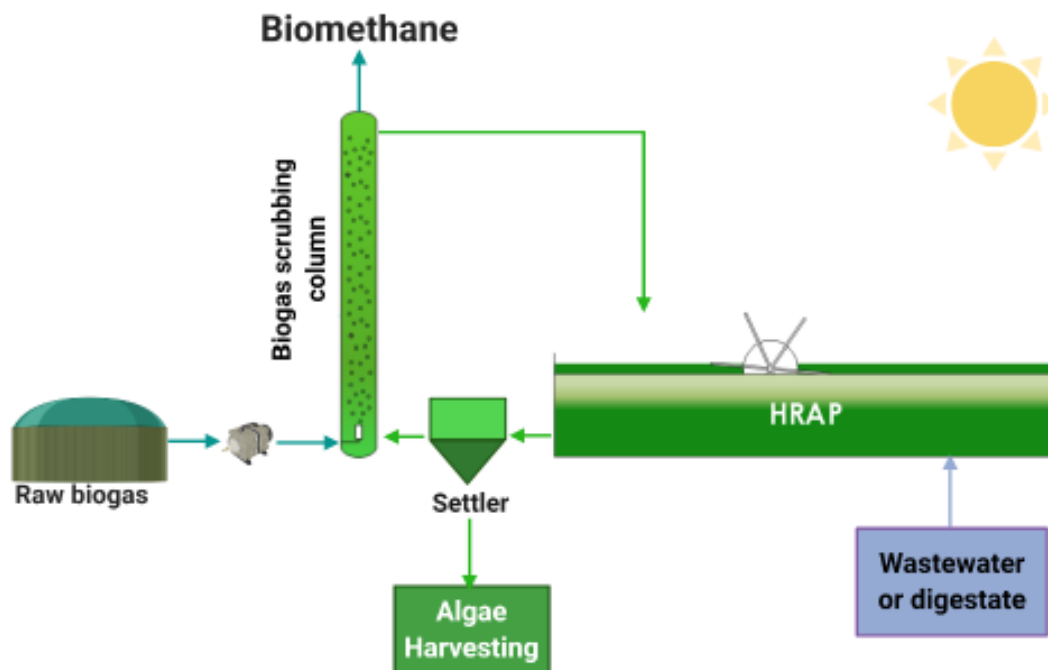
A melhoria do biogás fotossintético em reatores de algas e bactérias tem sido consistentemente comprovada como uma alternativa sustentável e ambientalmente correta para a remoção simultânea de CO_2 e H_2S do biogás bruto em um processo de estágio único. Esta tecnologia é baseada na fixação de CO_2 por microalgas via fotossíntese e na liberação concomitante de oxigênio para o caldo de cultivo, que é

posteriormente usado por bactérias oxidantes de enxofre para a oxidação de H_2S em SO_4^{2-} (Eq. 1).



Antes da conversão biológica, o CO_2 e o H_2S são transferidos do biogás bruto para o caldo de cultivo aquoso. Esta transferência ocorre em uma coluna de absorção (CA), onde o dióxido de carbono e o ácido sulfídrico são dissolvidos pelo caldo de cultivo que é reciclado na coluna. A coluna é alimentada com o biogás bruto e com o caldo de cultivo para que as algas e as bactérias possam raptar o CO_2 e o H_2S existente no biogás, respectivamente. O meio de cultura é cultivado em tanques abertos ou fotobiorreatores fechados (FBR), ao passo que existem diferentes designs que variam de acordo com a aplicabilidade do projeto. Além disso, um decantador é tipicamente implementado entre o meio de cultivo e a CA (Torres et al., 2021).

Figura 18 - Esquema de um Sistema de Melhoria do Biogás por Fotossíntese em Lagoa com Alta Taxa de Algas (HRAP) interconectado a uma Coluna de Absorção



Fonte: Torres et al. (2021).

Dentre os principais parâmetros de projeto, operacionais e ambientais, a relação L/G (Líquido/Gás) na coluna de absorção, a alcalinidade e o pH do caldo de cultivo, as espécies de microalgas, a concentração de O_2 e N_2 dissolvidos e o tipo de configuração do fotobiorreatores são os parâmetros que mais influenciam o desempenho da atualização do biogás fotossintético (Bose et al., 2019; Toledo-Cervantes et al., 2017).

O controle dos parâmetros é essencial para que o sistema desempenhe uma remoção efetiva dos contaminantes presentes no biogás.

Vários autores evidenciaram a eficiência desta tecnologia em ambientes internos e externos, tanto em escala laboratorial quanto piloto, e os parâmetros operacionais mais relevantes desta tecnologia foram otimizados para maximizar a qualidade do biogás final (Ángeles et al., 2020).

3.3.1 A Fotossíntese

Microrganismos fotossintéticos, como cianobactérias e microalgas, fixam CO_2 por meio de reações fotossintéticas de carboxilação (Ciclo de Calvin), que ocorre na membrana plasmática em cianobactérias ou nos cloroplastos em microalgas. A

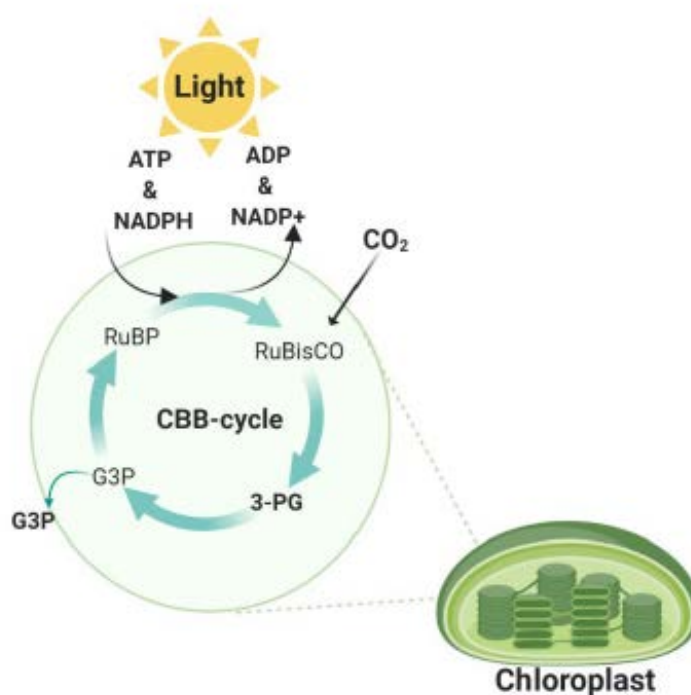
energia da luz é absorvida como fótons e convertida em trifosfato de adenosina (ATP) na membrana interna dos cloroplastos, nos tilacoides e ramos da membrana plasmática. A energia é utilizada pelo fotossistema II para a realizar a fotólise da água, liberando prótons, elétrons e moléculas de oxigênio, processo conhecido como reação de Hill. Depois, os produtos da reação de luz (isto é, nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato, mais comumente identificado como NADPH, e ATP) são usados como substratos para a fase independente de luz, ou seja, a fase escura ou Ciclo de Calvin. Nessa fase, o CO₂ é incorporado à ribulose-1,5-bifosfato (RuBP) catalisada pela enzima ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (RuBisCO), resultando na formação de um composto de seis carbonos que rapidamente se divide em duas moléculas de 3-fosfoglicerato (3-PG). O produto da fixação de CO₂ é o gliceraldeído-3-fosfato (G3P) via fosforilação e redução de 3-PG (Klemenčič et al., 2017; Severo et al., 2019). Tal que os G3Ps formados podem interagir para formar glicose e outros carboidratos ou serem utilizados para regenerar a RuBP, permitindo que ciclo recomece.

A eficiência fotossintética e a taxa de crescimento celular exibem uma dependência positiva da intensidade luminosa até o ponto de saturação. Ultrapassando esse limiar, a radiação em excesso pode acarretar em danos aos receptores luminosos das células, resultando no processo conhecido como fotoinibição. Este mecanismo caracteriza-se pela alteração e eventual inativação do fotossistema II (PSII), o que prejudica o fluxo de elétrons para o restante da cadeia transportadora que, por sua vez, compromete as reações de redução NADP⁺ para NADPH.

Para as espécies microalgas, enquanto algumas necessitam de maior intensidade luminosa para conduzir seu processo fotossintético, outras possuem um menor ponto de saturação, ao passo que dependem de menos energia da luz para seu desenvolvimento (De Andrade et al., 2021).

No período iluminado de atualização fotossintética do biogás, a alta concentração de OD resultante da atividade fotossintética desencadeia um aumento no pH do caldo de cultivo e uma rápida oxidação do sulfato na presença de bactérias oxidantes de enxofre (Franco-Morgado et al., 2017).

Figura 19 - Esquema do Processo Fotossintético no Cloroplasto e o Ciclo de Calvin-Benson-Bassham (CBB) para Fixação de CO_2



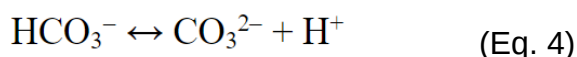
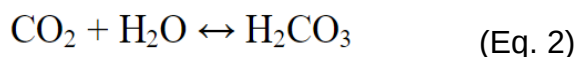
Fonte: Torres et al. (2021).

3.3.2 O Carbono

O carbono é um dos elementos essenciais para a vida na Terra, constituinte primordial da maioria das estruturas bióticas e abióticas que residem no globo, compõe grande parte da nossa atmosfera e está presente em quase todas as qualidades físicas do planeta (Souza et al., 2012).

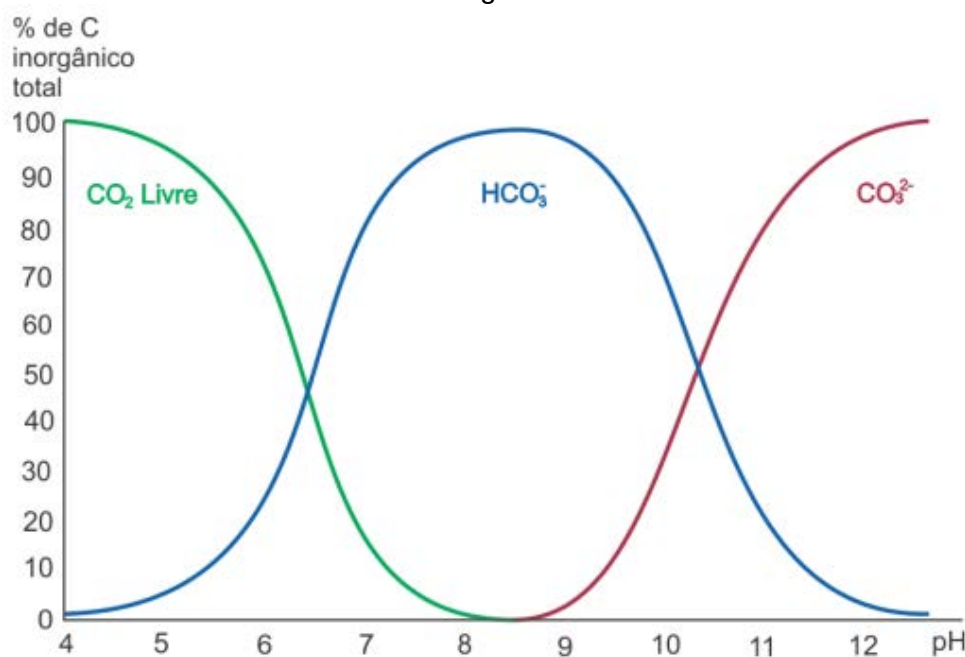
Em meio aquoso, este elemento pode ser encontrado como carbono orgânico dissolvido (COD), proveniente da decomposição de plantas e animais, assim como carbono inorgânico dissolvido (CID), oriundo das trocas cíclicas entre o meio terrestre, atmosférico e aquático (Esteves, 1998; Souza et al., 2011). Sobre este último, o CID pode se apresentar sob quatro formas, sendo elas o dióxido de carbono dissolvido (CO_2 (aq)), ácido carbônico (H_2CO_3), íons de bicarbonato (HCO_3^-) e íons de carbonato (CO_3^{2-}).

O comportamento do CO_2 em meio aquoso tende a ser como uma base fraca, passando a receber prótons do ambiente, transformando-o em H_2CO_3 . (Eq. 2). Obtendo o perfil de ácido fraco, o elemento irá se dissociar conforme a condição de equilíbrio do meio (Eq. 3 e Eq. 4).



Dessa maneira, a forma em que o elemento se encontra no meio, está diretamente ligada ao pH (potencial de hidrogeniônico). Águas com pH na faixa de 1-5 (ácido), prevalece o CO_2 dissolvido, partindo para características neutras, no intervalo de 6-8, existe uma maior tendência para o HCO_3^- , já em zonas ligeiramente alcalinas, com o pH a partir de 9, a presença de HCO_3^- é reduzida, enquanto a de CO_3^{2-} passa a ser a predominante (Mortatti et al., 2006).

Figura 20 - Relação entre pH e Percentual de CO_2 "livre", HCO_3^- e CO_3^{2-} Dissolvidos em Água



Fonte: Adaptado de Esteves et al., 2011.

3.3.3 As Microalgas

Em termos de composição química, as microalgas são compostas, majoritariamente, por lipídeos, proteínas e carboidratos em que as proporções de cada conteúdo depende forma de cultivo de cada espécie. Devido à sua capacidade

fotossintética, a produção de biomassa microalgal através da conversão de dióxido de carbono (CO_2), luz e nutrientes inorgânicos, permite que o método de cultivo possa ser realizado em sistemas abertos e fechados (De Lima et al., 2012).

As microalgas podem fixar carbono por vias fotoautotróficas (aceitam carbono inorgânico na presença de luz), heterotróficas (aceitam carbono orgânico na presença ou ausência de luz) ou mixotróficas (aceitam carbono inorgânico e orgânico). Gêneros/espécies capazes de crescer em condições mixotróficas podem fornecer uma vantagem significativa sobre outras espécies, especialmente quando o tratamento de águas residuais ou digestores é combinado com a atualização do biogás, facilitando o desenvolvimento de sistemas de economia circular. Isso pode ser argumentado a partir de uma variedade de perspectivas, incluindo; alta taxa de crescimento de microalgas decorrente da capacidade metabólica respiratória e fotossintética simultânea, capacidade de trabalhar bem com águas residuais ou digeridos anaeróbicos líquidos (em sistema de economia circular) e capacidade de manter a produtividade e a densidade celular na cultura de algas mesmo durante a fase escura. Embora a liberação de CO_2 durante o crescimento heterotrófico pareça não ideal ao remover CO_2 do biogás, operar em uma solução altamente alcalina forneceria uma capacidade tampão considerável ao dissolver CO_2 para neutralizar esse efeito. Ademais, uma escolha adequada às espécies de microalgas deve acatar alta tolerância ao pH alto, alta tolerância ao CO_2 , facilidade de colheita e se possível, atividade enzimática externa da anidrase carbônica (AC). (Bose et al., 2019).

A dinâmica populacional de microalgas resulta da interação entre fatores bióticos e abióticos. Os fatores bióticos contemplam tanto os processos metabólicos como as interações ecológicas, correspondente à competição com espécies invasoras ou contaminação por outros organismos. No que diz respeito aos fatores abióticos, os fatores reguladores são a irradiância luminosa, a temperatura, o pH e disponibilidade de substratos nutricionais, incluindo fontes de carbono, macronutrientes (nitrogênio e fósforo) e micronutrientes metálicos. É importante salientar que a escolha do meio de cultivo depende de vários fatores como o tipo da alga a ser cultivado, a finalidade para a qual essa alga está sendo cultivada e os valores por litro do meio de cultivo. Dessa forma, não existe um meio de cultivo único para todas as espécies de microalgas, uma vez que seus requerimentos são específicos (De Andrade et al., 2021).

O desenvolvimento e aprimoramento de sistemas de produção de microalgas que maximizem a captação de energia solar é um dos grandes desafios nesse campo

de estudo. A projeção no desenvolvimento de cultivos de microalgas tem evoluído para atender às necessidades de implantação em escala industrial de forma a tornar todo o processo viável.

3.3.4 Sistema de Cultivo das Microalgas

Os sistemas atualmente utilizados para cultivo de microalgas são classificados em abertos e fechados. Cada sistema apresenta particularidades e características específicas que devem ser analisadas previamente para projetar uma planta com produção de microalgas (De Andrade et al., 2021).

A escolha de um sistema de cultivo ideal está relacionada aos custos de implantação, manutenção, controle dos parâmetros operacionais, captura e distribuição de energia solar, transferência de massa, disponibilidade de nutrientes, propriedades intrínsecas das espécies de microalgas, condições climáticas locais, além da pegada terrestre que o projeto necessita. A sinergia das condições supracitadas acarreta na eficiência global do sistema, influenciando na sustentabilidade do projeto e qualidade do biogás tratado.

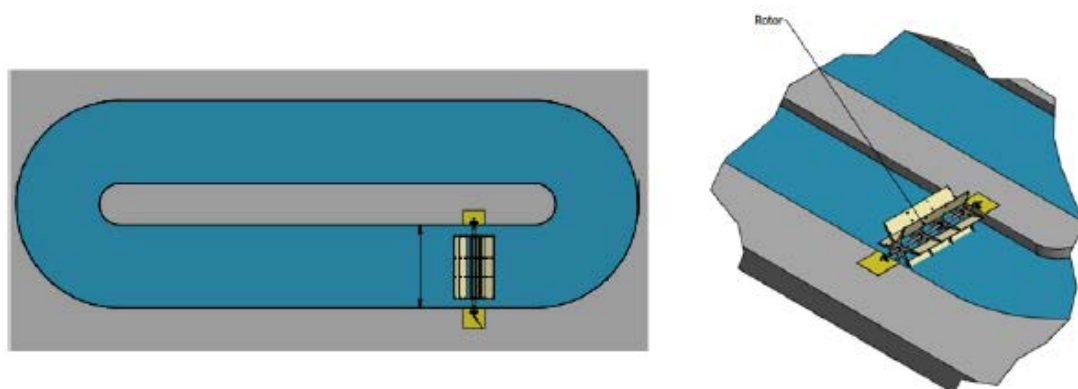
A pegada terrestre para a implantação de um sistema de cultivo deve ser levada em consideração em locais com restrição territorial. Além disso, o controle da contaminação torna-se um parâmetro crucial em sistemas dedicados à revalorização da biomassa em produtos de alto valor agregado. No contexto da valorização do biogás, o elevado pH e a alcalinidade do caldo de cultivo resultam normalmente numa baixa diversidade de algas e num menor risco de contaminação (Torres et al., 2011).

3.3.4.1 Sistemas abertos

Cultivos abertos de microalgas podem ser divididos em sistemas naturais (lagos e lagoas) e artificiais geralmente chamados de lagoas de pista ou pelo termo em inglês, “*raceway ponds*”. As lagoas não agitadas são mais econômicas e fáceis de gerenciar, entretanto são propensas à predação das microalgas pelo zooplâncton, comunidades mistas e crescimento potencial de patógenos; assim estes fatores bióticos podem afetar o crescimento algal e, conseqüentemente, a produção de biomassa (Chaumont, 1993).

Em sistemas de lagoa de pista (*raceway pond*), a circulação do meio (microalgas, água e nutrientes) é realizada utilizando um rotor com pás giratórias. Essas pás proporcionam um fluxo em torno de uma pista circular, fazendo com que as células de microalgas sejam mantidas em suspensão na água e frequentemente circuladas de volta para a superfície, em uma frequência regular que auxilia as microalgas na captação por energia luminosa e evitam a sedimentação.

Figura 21 - Sistema de Cultivo de Lagoa Aberta ou *Raceway Pond*



Fonte: De Andrade et al. (2021).

Este método possui vantagens relativas ao baixo custo de produção, construção dos tanques, manutenção acessível, como, por exemplo, a limpeza da superfície (De Lima *et al.*, 2021), além da facilidade de operação e altamente eficaz para o cultivo de microalgas em larga escala. Porém, apresentam como desvantagens: uma elevada pegada terrestre, dificuldade em manter condições ótimas de operação, contaminação do meio por espécies invasoras (Goli *et al.*, 2016, Huang *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2017) e a evaporação da água pela livre exposição com a atmosfera. Além disso, as características sazonais da região também podem interferir na produtividade da biomassa (De Lima *et al.*, 2021).

Além disso, a profundidade das lagoas é um parâmetro importante ligado tanto à incidência luminosa adequada para o desenvolvimento fotossintético das microalgas, como na manutenção de uma profundidade de água suficiente para o coibir efeitos negativos da evaporação, cuja ocorrência pode provocar mudanças na composição do meio. Dessa forma, a maioria das lagoas tem entre 20 e 30 cm de profundidade (De Andrade *et al.*, 2021).

Figura 22 - Sistema de Cultivo de Algas em Lagoa Aberta do Tipo *Raceway Pond*



Fonte: De Lima et al. (2021).

Figura 23 - Sistema de Cultivo de Algas em Lagoa Aberta do Tipo *Raceway Pond* da Universidade de Valladolid (Espanha)



Fonte: Bose et al. (2019).

3.3.4.2 Sistemas fechados

A produção de microalgas também pode ser obtida através de sistemas conhecidos como fotobiorreatores (FBRs). Os FBRs são definidos como sistemas fechados desenvolvidos com o objetivo de superar as limitações dos sistemas abertos de cultivo.

Os fotobiorreatores são sistemas que necessitam de maior investimento inicial na sua construção e operação. Por outro lado, uma série de vantagens podem ser citadas sobre esses sistemas, como por exemplo, maior controle dos parâmetros do cultivo (pH, concentração de nutrientes, luminosidade), risco reduzido de contaminação, maior produtividade por unidade de área por volume e melhor adaptação de espécies aos sistemas.

A eficiência dos fotobiorreatores é determinada pela integração de diversas variáveis, como por exemplo, a captura, transporte e distribuição da energia luminosa, a transferência dos gases (CO_2 e O_2) e a utilização dos nutrientes pelos microrganismos para a realização da fotossíntese (De Andrade et al., 2021).

Para otimizar o sequestro do carbono capturado, um FBR ideal deve ser capaz de fornecer um tempo de residência suficiente do carbono dissolvido por meio da correspondência dos parâmetros de crescimento de microalgas com a taxa de absorção de CO_2 . A intensidade de luz adequada deve ser controlada em função da manutenção da concentração da cultura de microalgas, evitando assim o aumento da dispersão da luz e a criação de zonas mortas. A otimização simultânea da intensidade da luz e da frequência dos ciclos de luz e escuridão para cada espécie de microalga é crucial para melhorar sua taxa de crescimento. (Bose et al., 2019). Além disso, cada espécie possui um domínio preferencial de temperatura e pH (Vasumathi et al., 2012), bem como a exigência de nutrientes essenciais incluindo macroelementos (como C, N, P, S e Cl), elementos minerais (K, Ca, Mg, Na), microelementos (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Si, Se, V, Co, Ni e I) e/ou outros aditivos para garantir taxas efetivas de crescimento (Zhou et al., 2017).

Os fotobiorreatores têm características gerais vantajosas comparadas aos sistemas abertos, visto que há maior produtividade de biomassa das microalgas, bem como uma produção em larga escala. As paredes do reator impedem a troca direta dos gases no meio com a atmosfera, a contaminação com agentes exteriores (como poeira e microrganismos), além de evitar a evaporação e perdas de CO_2 . Como

desvantagens, destacam-se: maior custo de produção, operação, desafios de controle de temperatura, transferência de massa, limpeza, alta demanda energética (BOSE et al., 2019), além de danificação do aparato por bioincrustação e superaquecimento (De Lima et al., 2021).

Uma variedade de FBRs têm sido desenvolvidos nas últimas três décadas, todavia dois designs se destacam dos demais, sendo mais comumente utilizados os fotobiorreatores tubulares e planares.

Dispositivos de transporte aéreo tipo *airlift* também podem ser utilizados, reduzindo danos às células, estes causados pelo atrito nos sistemas de bombeamento. Por outro lado, cultivos com maiores volumes podem ser prejudicados pelo tempo de circulação do líquido dentro do sistema devido ao acúmulo de oxigênio produzido pelas microalgas.

Os fotobiorreatores tubulares estão entre as configurações mais populares para grandes produções de microalgas devido à facilidade para aumento da escala, fácil operação e baixa contaminação. Esses sistemas consistem em uma estrutura formada por tubos transparentes produzidos em vidro ou plástico e que apresentam padrões de construção variados.

Uma característica importante dos fotobiorreatores tubulares é a grande área de superfície em relação ao volume devido à possibilidade de diminuir o diâmetro dos tubos sem se preocupar com a integridade estrutural do sistema. Colunas verticais, por exemplo, devem necessariamente ter um diâmetro mínimo para suportar o peso do sistema, enquanto sistemas tubulares dispostos na posição horizontal podem ultrapassar esse requisito (De Andrade et al., 2021).

Os reatores tubulares horizontais e helicoidais diferem apenas na disposição em que os tubos são posicionados, sendo o horizontal de maneira paralela ao chão ou dispostos verticalmente e ocupando maior área, enquanto o helicoidal é mantido enrolado em uma estrutura circular aberta, a fim de ocupar maior espaço no sentido vertical (Carvalho et al., 2006). Apesar de apresentarem uma grande área de exposição solar e boa produtividade de biomassa, os fotobiorreatores tubulares possuem como risco o acúmulo de biofilme na parede dos tubos, dada a sua dificuldade de limpeza, o que impede a penetração da luz (Placzek et al., 2017).

Figura 24 - Sistema de Cultivo de Algas em Fotobiorreatores Tubulares



Fonte: De Lima et al. (2021).

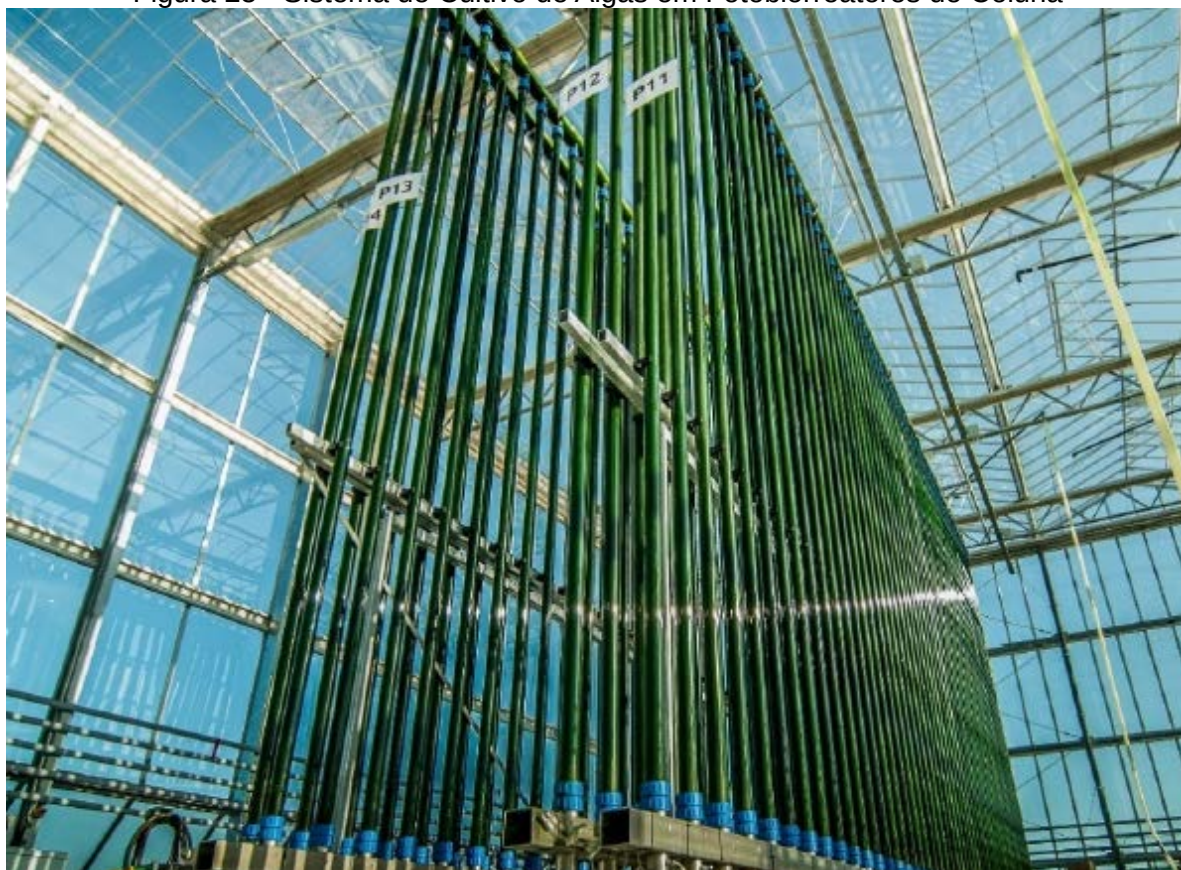
Os sistemas tubulares dispostos verticalmente são denominados de fotobiorreatores de colunas, com construções usualmente utilizadas do tipo coluna de bolhas e *airlifts* (ARLs).

O primeiro basicamente constitui uma estrutura de vasos verticais simples, onde o gás é injetado na parte inferior do tubo, enquanto a mistura e homogeneização da cultura é produzida por microbolhas ascendentes.

O segundo grupo abrange reatores dotados de canais projetados para promover a circulação cíclica do fluido. Nesses sistemas, a agitação é realizada pneumaticamente pelo fluxo de ar ou por outro gás, responsável também por facilitar a transferência de material entre a fase gasosa e o meio líquido. Os *airlifts* classificam-se em dois tipos estruturais principais: de circulação externa, com circuitos em vasos distintos, e de circulação interna, que utiliza defletores internos para formar os canais

de circulação. Modificações em ambos os modelos podem alterar alguns parâmetros como a dinâmica de escoamento, a dispersão gasosa e as taxas de fluxo das fases. (De Andrade et al., 2021).

Figura 25 - Sistema de Cultivo de Algas em Fotobiorreatores de Coluna



Fonte: De Andrade et al. (2021).

Os fotobiorreatores de placa plana (FPP) estão dentro da classificação de sistemas fechados e são caracterizados por grande superfície iluminada em relação ao volume. Os FPPs consistem basicamente em um reservatório retangular feito de um material transparente com dimensões passíveis de variação, no entanto as estruturas com altura e largura menores que um metro são as mais estudadas. Em razão à sua geometria, sua estrutura promove uma boa relação superfície/volume, ao passo que os fotobiorreatores de placa plana garantem uma excelente capacidade de luminosidade e coleta de energia solar, proporcionando uma alta eficiência fotossintética. Além disto, o acúmulo de concentrações de oxigênio dissolvido em fotobiorreatores de placa plana é relativamente baixo em comparação com os tubulares (Miyawaki et al., 2021).

Um dos pontos importantes no desenvolvimento de reatores de placa plana é a espessura da placa pois determina a relação de área de superfície/volume e irradiação luminosa no sistema. Uma pequena espessura permite uma melhor difusão e distribuição de luz. Logo, quanto menor for o caminho da luz, ou a espessura, maior será a produtividade de biomassa e densidade de células (De Andrade et al., 2021). No entanto, a exigência de espaçamento ideal das placas planas é necessária a fim de minimizar o sombreamento entre os reatores, o que consequentemente aumenta o custo e a área ocupada, podendo ser um limitante de escalabilidade de tais reatores (Bose et al., 2019).

Outros desafios que tangem à concepção de fotobiorreatores de placa plana residem na deficiência de controle do fluxo do cultivo e nos problemas de engenharia encontrados na construção de painéis com baixo custo (Miyawaki et al., 2021).

Figura 26 - Sistema de Cultivo de Algas em Fotobiorreatores em placas planas



Fonte: Miyawaki et al. (2021).

Novas configurações estão em curso visando o desenvolvimento de FBRs mais versáteis, economicamente viáveis e eficazes para o cultivo em grande escala de

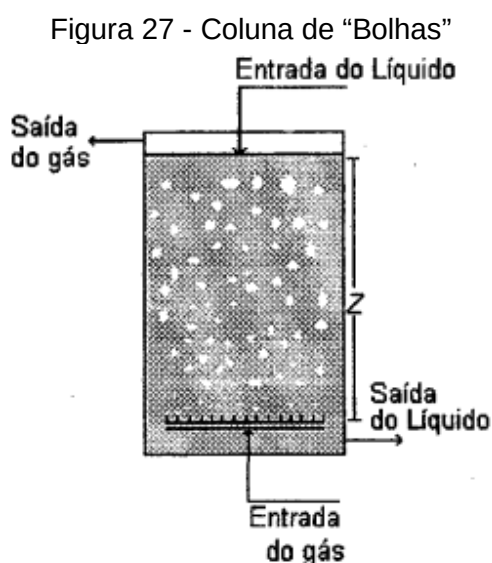
microalgas. A indústria emergente de biocombustíveis, bioprodutos provenientes da bioassa algal, tratamentos e projetos envolvendo fixação de CO_2 indicam o crescimento deste mercado viabilizando novas tecnologias de fotobiorreatores.

3.3.5 Coluna de Absorção (CA)

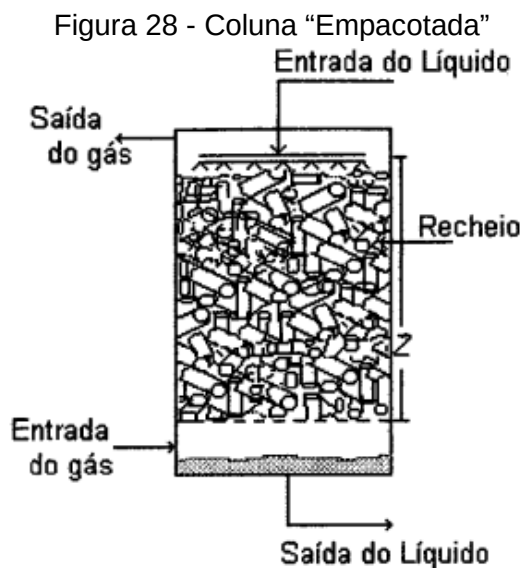
A coluna de absorção trata-se de uma estrutura amplamente utilizada na purificação e atualização do biogás. Ela suporta o meio de cultivo de microalgas provenientes dos fotobiorreatores (FBR), projetada para maximizar a transferência de massa dos gases presentes no biogás para o meio líquido, pelo contato direto do biogás aspergido na coluna.

A área de contato gás-líquido nas colunas de absorção permite uma dissolução eficiente do CO_2 e do H_2S , ao passo que a eficiência da transferência de massa também depende de fatores como a vazão do biogás e as condições do meio (pH, temperatura e alcalinidade) (Muñoz, Guieysse, 2006).

As colunas podem ser do tipo de “bolhas”, no qual as espécies de gases de interesse são pouco solúveis no líquido e a resistência da fase líquida controla a velocidade de reação; ou do tipo empacotadas, cujo “recheio” auxilia no contato líquido-gás, aumenta a pressão dentro da coluna e maximiza a transferência massa entre o biogás e o caldo de cultivo.



Fonte: Revello et al. (1998).



Fonte: Revello et al. (1998).

Determinar o uso de uma coluna depende em grande parte da solubilidade dos componentes de interesse da fase gasosa na fase líquida ou vice-versa, e da resistência à transferência de massa imposta pelas fases.

Apesar das elevadas eficiências de remoção de CO_2 e H_2S alcançadas na melhoria do biogás fotossintético, melhorias adicionais devem centrar-se na redução da concentração de N_2 e O_2 no biogás melhorado.

A solubilidade dos gases em um líquido é diretamente proporcional à pressão parcial do gás na fase gasosa, conforme a Lei de Henry. Em uma coluna de absorção pressurizada, o aumento da pressão no sistema favorece a dissolução dos gases no líquido, incluindo CO_2 e H_2S , que são os principais alvos da purificação do biogás. No entanto, a pressão também afeta a solubilidade de N_2 e O_2 , reduzindo sua tendência a desorver para a fase gasosa, permanecendo dissolvidos no líquido em maior proporção (Rittmann, Mccarty, 2001).

Nesse sentido, o uso de uma CA pressurizada aumentará a solubilidade destes gases na fase líquida, minimizando a dessorção de N_2 e O_2 do caldo de cultivo para o biogás atualizado. Por outro lado, uma pressão operacional mais alta também poderia resultar em uma solubilização de CH_4 ligeiramente maior (Bahr et al., 2014; Serejo et al., 2015).

Não obstante, é importante ressaltar que manter uma coluna de absorção pressurizada requer energia para compressão do biogás, o equipamento deve ser projetado para suportar pressões mais altas e é necessário controlar a pressão e a composição do gás para garantir que a dessorção de N_2 e O_2 seja minimizada sem

comprometer a eficiência do processo, o que pode aumentar os custos operacionais e de investimento inicial (Muñoz, Guieysse, 2006).

O regime de fluxo homogêneo proporciona condições operacionais preferenciais para absorção de CO₂. Fluxo mais uniforme e bolhas menores desenvolvidas neste regime permitem uma área superficial maior e um desempenho melhorado (Cheng et al., 2013; Leonard et al., 2015).

Para um regime de fluxo homogêneo, assumindo semelhança com sistemas ar-água, a velocidade superficial do gás deve estar sempre abaixo de 4 cm/s na temperatura e pressão ambiente (Kantarci et al., 2005; Rollbusch et al., 2015).

3.3.6 Bactéria Oxidantes de Enxofre

A concentração de sulfeto de hidrogênio no biogás pode atingir valores muito significativos variando de 500 ppmv a 20.000 ppmv (2%). Nessas concentrações, ele causa não apenas sérios problemas sensoriais e tóxicos, mas também corrói o concreto e estruturas de aço em usinas de biogás, danifica tubulações e bombas e encurta significativamente a vida útil dos motores a gás de unidades de cogeração, onde degrada o óleo lubrificante. A queima de biogás com maiores concentrações de sulfeto de hidrogênio também causa problemas com emissões excessivas de SO_x. Além do efeito inibitório direto no processo de fermentação, essas são as principais razões pelas quais é necessário remover o sulfeto de hidrogênio do biogás antes de seu uso para produção de energia (Pokorna, Zabranska, 2015).

Métodos químicos e físico-químicos de precipitação, lavagem ou absorção já são amplamente utilizados e aplicados com sucesso há muito tempo. No entanto, eles estão sempre associados a altos custos operacionais de energia e produtos químicos e, às vezes, à produção de resíduos que devem ser tratados posteriormente. Além disso, certos produtos químicos agressivos usados causam uma rápida corrosão do equipamento e catalisadores, adsorventes ou produtos químicos exaustos devem ser regenerados ou substituídos periodicamente (Henshaw, Zhu, 2001).

Os métodos biológicos são menos dispendiosos, não requerem produtos químicos caros e não causam poluição ambiental secundária. É necessário apenas lavar o sulfeto de hidrogênio gasoso do biogás para a água, colocá-lo em contato com a cultura bactérias oxidantes de enxofre (BOS) e garantir a demanda de nutrientes. No entanto, também é possível utilizar propriedades favoráveis de bactérias oxidantes

de enxofre para dessulfuração externa. Os produtos finais da biooxidação de sulfetos não são mais perigosos; o enxofre elementar pode ser removido completamente do sistema devido à sua baixa solubilidade em água e usado na indústria ou como fertilizante. Os sulfatos podem ser descarregados diretamente na água da superfície (Pokorna, Zabranska, 2015).

O sulfeto de hidrogênio é capturado do biogás para um meio aquoso por lavagem ou depuração. A composição e o pH do meio usado dependem do tipo de população de BOS, que pode ser acidófila ou alcalofílica. Devido à melhor e mais rápida absorção de sulfeto de hidrogênio no meio alcalino, sistemas com pH mais alto são predominantes (Henshaw, Zhu, 2001).

A remoção biológica de sulfetos é baseada nas atividades de bactérias fotoautotróficas ou quimiolitotróficas oxidantes de enxofre. As BOS fotoautotróficas obtêm energia para seu metabolismo a partir da energia luminosa, e as BOS quimiolitotróficas diretamente das reações oxidantes, onde o oxigênio (espécies microbianas aeróbicas) ou nitratos ou nitritos (espécies microbianas anóxicas) servem como aceptadores de elétrons liberados durante a oxidação de sulfetos (Janssen, 1998).

O gênero mais comum e mais estudado é *Thiobacillus sp.* Muitas espécies são acidófilas com pH ótimo de 1–6 (*T. thiooxidans* pH 2,0–3,5 ou *Thiobacillus ferrooxidans* pH 1,3–4,5). *T. thiooxidans* também pode crescer em condições extremas de pH<1. *Thiobacillus denitrificans* e *Thiobacillus novellus* são neutrofílicos e sua faixa de pH ótimo é de 6–8. *T. thioparus* cresce na ampla faixa de pH 5–9 e seu ótimo é 7,5 a 28°C. Além dos sulfetos, ele também pode oxidar tiosulfatos. *Thioalkalispira micro-aerophila* é um microrganismo alcalofílico com pH ótimo de 10 (Pokorna, Zabranska, 2015).

3.4 PARÂMETROS OPERACIONAIS

3.4.1 Iluminação

A iluminação utilizada em cultivos de microalgas pode ser de oriunda de uma fonte natural ou derivada de lâmpadas fluorescentes. Tanto em sistemas de cultivo externos (outdoor) como nos cultivos internos e laboratoriais (indoor), a fonte e a intensidade luminosa são fatores críticos que afetam o desempenho do crescimento

fotoautotrófico das microalgas. Enquanto a principal fonte de iluminação para sistemas de cultivo externo é a luz solar, em ambientes internos, predominam-se as fontes de luz artificial, embora seja possível utilizar sistemas de captação e transmissão de luz natural para iluminar fotobiorreatores fechados. (De Andrade et al. 2021).

Consórcios de algas-bactérias alcalinos submetidos a períodos de iluminação ininterrupta comparados a alternância de períodos de claro/escuro nos revelam a capacidade de melhoria do biogás em ambas as condições. As condições alcalinas se mantiveram constantes em iluminação contínua em concordância com a alta capacidade tampão e alta atividade fotossintética, por outro lado, houve uma pequena variação do pH sob condições de claro/escuro como resultado da acidificação periódica do meio durante o período escuro em razão à absorção de CO_2 e H_2S . A recuperação de carbono e nutrientes ocorreu em função da produtividade da biomassa, que por sua vez dependia do regime de iluminação do fotobiorreator e da temperatura (Franco-Morgado et al., 2017).

Ademais, é importante avaliar a concentração de O_2 do biogás melhorado em condições de iluminação contínua por conta da alta atividade fotossintética, algo que é compensado pela respiração em regimes de alternância claro/escuro.

Sob tais condições de alternância, o crescimento das microalgas atinge um limite estacionário, provavelmente responsável pela respiração endógena durante o período escuro que consumira seu carbono inorgânico intracelular para manutenção celular, evidenciado pela redução da biomassa produzida (Franco-Morgado et al., 2017).

Em ambas as condições analisadas, houve uma oxidação completa do H_2S em sulfato, garantindo a remoção do contaminante com o processo biológico empregado.

3.4.2 Temperatura

A temperatura é analisada sob duas frentes de influência acerca do escopo proposto, ela é responsável pelo equilíbrio entre as fases líquida e gasosa, influenciando no índice de absorção e dessorção dos componentes presentes no biogás (Toledo-Cervantes et al., 2017) e, ela pode afetar a taxa metabólica das microalgas, logo é interessante que a temperatura seja constata em cultivos de microalgas de forma que seja proporcionada uma melhor estabilidade, reprodutibilidade e previsibilidade nos experimentos (De Andrade et al., 2021).

No que diz respeito sobre a interação do biogás com o caldo de cultivo, entende-se que temperaturas mais baixas promovem melhor diluição do biogás no meio líquido, ajudando a biofixação do CO_2 pelas microalgas, visto que a solubilidade do CO_2 é inversamente proporcional à temperatura.

No entanto, a atividade fotossintética cresce em temperaturas mais elevadas, elevando a taxa de crescimento da biomassa algal e, conseqüentemente, aumenta a capacidade de remoção do CO_2 do biogás pelas microalgas (Jacob et al., 2021; Toledo-Cervantes et al., 2017).

É importante levar em consideração que a maioria das espécies de microalgas comumente utilizadas para cultivo, correspondem melhor em uma faixa de temperatura entre 20°C e 30°C , visto que para muitas espécies, temperaturas extremas podem ocasionar a morte celular da cultura. Embora câmaras climatizadas ofereçam controle térmico facilitado, a manutenção de temperatura constante é complexa em escala comercial. Em determinados fotobiorreatores, a implementação de trocadores de calor internos é vantajosa para regular a temperatura do cultivo ou fornecer aeração em sistemas externos, potencializando assim a taxa de crescimento das microalgas (De Andrade et al., 2021).

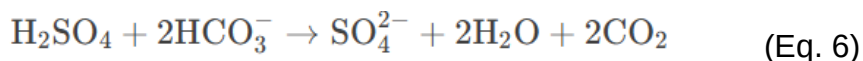
Não obstante, a temperatura não produz um efeito significativo na eficiência de remoção (ER) dos contaminantes em condições de alta e média alcalinidade. A alta alcalinidade em baixas temperaturas, promove uma maior eficiência de remoção em comparação com a baixa alcalinidade em altas temperaturas. Porém, uma baixa alcalinidade do caldo de cultivo pode ser parcialmente compensada com a diminuição da temperatura. (Bose et al., 2019; Toledo-Cervantes et al., 2017).

3.4.3 Potencial Hidrogeniônico (pH)

As microalgas são organismos fotossintéticos que utilizam CO_2 como fonte de carbono. No entanto, a dissolução excessiva de CO_2 no meio de cultivo pode levar à formação de ácido carbônico (H_2CO_3), levando a acidificação do meio de cultivo, reduzindo o pH e prejudicando o crescimento das microalgas. A alcalinidade atua como um tampão, neutralizando o ácido carbônico (H_2CO_3) formado pela dissolução do CO_2 na água (Richmond, 2004).

Com relação as bactérias oxidantes de enxofre, estas oxidam o H_2S presente no biogás, gerando ácido sulfúrico (H_2SO_4). Esse ácido pode reduzir o pH do meio,

inibindo a atividade bacteriana. A alcalinidade neutraliza o ácido sulfúrico, evitando a queda do pH e mantendo as condições ideais para as bactérias oxidantes de enxofre (Rittmann, Mccarty, 2001), conforme as reações a seguir:



A alcalinidade refere-se à capacidade de uma solução aquosa de neutralizar ácidos, ou seja, de manter um pH estável frente à adição de ácidos. Ela é geralmente medida em termos de concentração de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) e hidróxidos (OH^-). No contexto do tratamento de biogás, a alcalinidade atua como um tampão, mantendo o pH do meio em uma faixa adequada para o crescimento e atividade das microalgas e bactérias oxidantes de enxofre (Rittmann, Mccarty, 2001).

Em sistemas integrados, microalgas e bactérias oxidantes de enxofre atuam de forma sinérgica. As microalgas produzem oxigênio durante a fotossíntese, que é utilizado pelas bactérias para oxidar o H_2S . Por outro lado, o CO_2 liberado pelas bactérias durante a oxidação do H_2S pode ser utilizado pelas microalgas. A alcalinidade é essencial para manter o equilíbrio químico e biológico nesse sistema, garantindo que ambos os organismos funcionem de maneira eficiente (Torres et al., 2021).

Vários processos microbiológicos e de transferência de massa são afetados pelo pH do caldo de cultivo durante a atualização fotossintética do biogás: a atividade e o crescimento das microalgas, a remoção de nutrientes e a transferência de massa de CO_2 e H_2S do biogás para o caldo de cultivo na coluna de absorção.

Um pH mais alto no caldo de cultivo aumenta a taxa de transferência de massa dos gases ácidos (CO_2 e H_2S) do biogás para a fase líquida, o que resulta na melhoria do desempenho de remoção dos contaminantes (Rodero et al., 2018).

É importante ressaltar que o coeficiente global de transferência de massa para O_2 e N_2 também aumenta com o pH. Além destes, um pH alto também resulta na deposição de fósforo como fosfato, causando deficiência deste nutriente no cultivo de microalgas. Vale ressaltar que, baixos nutrientes levam a taxas de crescimento de microalgas diminutas, implicando em menor fixação de carbono, diminuindo a estabilidade de um sistema de atualização de biogás fotossintético. Logo, é essencial

manter uma boa qualidade de nutrientes no caldo de cultivo a fim de potencializar a sustentabilidade do sistema.

O uso de valores elevados de pH também promove a estabilidade das populações de microalgas, evitando a contaminação do meio de cultivo com predadores ou concorrência com outros microrganismos fotossintéticos (Lee et al., 2001).

O uso de meios de cultivo alcalinos carbonatados em fotobiorreatores de algas e bactérias pode dar suporte a uma melhoria eficiente de biogás a longo prazo. Nesses sistemas, a acidificação do meio induzida pela absorção de CO_2 e H_2S é contrabalançada pela absorção de CO_2 por microalgas na presença de luz e pela remoção de CO_2 em condições de escuridão (Franco-Morgado et al., 2017).

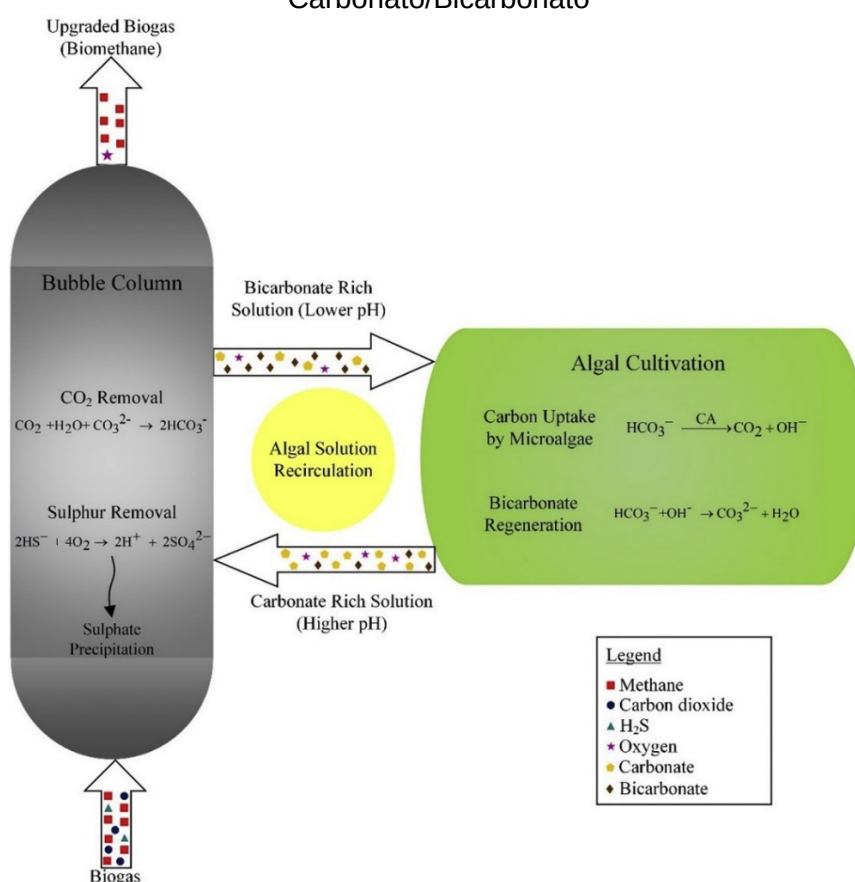
A utilização de soluções de carbonato com $\text{pH} > 9$ em uma coluna de bolhas permite que o CO_2 seja transferido para o meio aquoso na forma de bicarbonato (HCO_3^-). A formação de bicarbonato por absorção de CO_2 e subsequente regeneração de carbonato a partir da atividade de algas, leva a uma manutenção natural do ciclo carbonato/bicarbonato e à regulação do pH. Isso economiza a necessidade de equipamentos caros e grandes gastos de energia para regeneração de carbonato (Bose et al., 2019; Chi et al., 2011).

O controle do pH do meio de cultivo dentro da zona ótima da espécie utilizada é essencial para permitir a assimilação do carbono (como CO_2 e HCO_3^-). A acidificação via injeção de CO_2 é um método empregado para baixar e estabilizar o pH, prevenindo assim variações abruptas deste parâmetro (De Andrade et al., 2021).

Aumentar a taxa de absorção de CO_2 em meio alcalino pela aplicação de catalisadores pode fornecer benefícios distintos. Isso não apenas reduziria o tempo de contato entre o biogás e a solução de algas para reduzir a remoção de O_2 , mas também potencialmente permitiria que níveis de pH mais baixos fossem empregados com benefícios semelhantes. A anidrase carbônica (AC) recentemente ganhou muito interesse de pesquisa como um catalisador orgânico devido à sua capacidade de catalisar a reação reversível de hidratação do CO_2 de maneira ambientalmente correta; influência limitada no CO_2 equilíbrio vapor-líquido e calor de absorção; e compatibilidade com substratos convencionais absorvedores de CO_2 incluindo carbonatos, aminas, bem como com processos de separação por membrana (Bose et al., 2019).

O efeito catalítico hipotético de espécies de microalgas que exibem atividade da anidrase carbônica externa em relação à absorção de CO_2 em uma solução de carbonato pode melhorar significativamente a eficiência geral de captura de CO_2 . Assim, o pH operacional e o tempo de contato entre o biogás e a solução alcalina na coluna de bolhas podem ser reduzidos para diminuir o teor de oxigênio no biogás resultante, garantindo a remoção suficiente de CO_2 . Todas as espécies de cianobactérias possuem atividade AC externa, embora sejam variantes diferentes de cepas de AC (Bose et al., 2019).

Figura 29 - Valorização do Biogás por Microalgas em Solução Alcalina Via Ciclo Carbonato/Bicarbonato



Fonte: Bose et al. (2019).

3.4.4 Relação Líquido/Gás (L/G)

A relação líquido/gás (L/G) é calculada como a razão entre a vazão volumétrica do líquido (L) e a vazão volumétrica do gás (G) na coluna de absorção. Matematicamente, é expressa como:

$$\text{Relação L/G} = \frac{\text{Vazão do líquido (L)}}{\text{Vazão do gás (G)}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Esta relação diz respeito a eficiência de transferência de massa de gases para o meio líquido. Corresponde a capacidade do líquido em absorver os gases sem saturar (Richmond, 2004).

Um maior volume de líquido em contato com o gás, aumentará a capacidade de absorção (Muñoz, Guieysse, 2006). De maneira oposta, aumentar a concentração de gases no líquido, pode levar à saturação e reduzir a eficiência da transferência de massa (Rittmann, Mccarty, 2001).

Uma relação L/G alta pode aumentar os custos operacionais devido ao maior consumo de líquido e energia para bombeamento (Muñoz, Guieysse, 2006). Todavia, uma relação L/G baixa, tende a ser mais econômica em termos de consumo de líquido, mas pode comprometer a qualidade do biogás atualizado (Rittmann, Mccarty, 2001).

A transferência de massa biogás-líquido na coluna de absorção impacta fortemente a qualidade do biogás purificado, que é de fundamental importância para o cumprimento das especificações legais para cada tipo de aplicação. A relação L/G na coluna de absorção deve ser otimizada para fornecer uma qualidade satisfatória do biogás tratado.

Uma relação L/G adequada garante que o CO_2 seja absorvido e convertido em bicarbonato (HCO_3^-), cuja forma de carbono é preferível para muitas espécies de microalgas. Além disto, a relação L/G também afeta a oxidação do H_2S pelas bactérias presentes no meio de cultivo, garantindo que o pH não caia a níveis que inibam sua atividade (Torres et al., 2021).

4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Baseado nos dados consultados na Literatura, fomentou-se a Tabela abaixo a fim de comparar as estruturas dos estudos analisados e equiparar as variações dos principais parâmetros que inferem na melhoria fotossintética do biogás.

Tabela 1 - Base de dados da Literatura

Referência	Título da Referência	Tipo da Coluna	Dimensões da Coluna				Dimensões Lagoa (HRAP)				Espécies de microalgas	Fluxo Líquido		Fluxo Gás		L/G	pH	Biogás Entrada			Eficiência de Remoção (ER)		Biogás Saída				
		Coluna de bolhas	Altura da Coluna (cm)	Diâmetro da Coluna (cm)	Ac/Dc	Volume da Coluna (L)	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Profundidade (cm)	Volume (L)		Taxa Fluxo, L (ml/s)	Velocidade Superficial do Líquido (cm/s)	Taxa Fluxo, G (ml/s)	Velocidade Superficial do Gás (cm/s)			CH ₄ no Biogás Bruto	CO ₂ no Biogás Bruto	H ₂ S no Biogás Bruto	ER do CO ₂ (%)	ER do H ₂ S (%)	CH ₄ no Biogás Melhorado	CO ₂ no Biogás Melhorado	H ₂ S no Biogás Melhorado	O ₂ no Biogás Melhorado	N ₂ no Biogás Melhorado
(Marín et al., 2018)	Seasonal variation of biogas upgrading coupled with digestate treatment in an outdoors pilot scale algal-bacterial photobioreactor.	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	170	82	15	180	Leptolyngbya lagerheimii (54%), Chlorella vulgaris (28%), Parachlorella kessleri (9%), Tetradismus obliquus (5%) e Mychonastes homosphaera (2%)	0,867	0,057	0,867	0,057	1	9,4	70,00%	29,50%	0,50%	96%	100,00%	97,80%	1,18%	0,00%	N.E	N.E
(Posadas et al., 2017)	Simultaneous biogas upgrading and centrate treatment in an outdoors pilot scale high rate algal pond.	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	170	82	15	180	Chorella sp.	0,867	0,057	0,867	0,057	1	9,94 ± 0,09	70,00%	29,50%	0,50%	86%	100,00%	89,5 ± 2,5%	7 ± 2%	0,00%	0,5 ± 0,5%	2 ± 1%
(Posadas et al., 2017)	Simultaneous biogas upgrading and centrate treatment in an outdoors pilot scale high rate algal pond.	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	170	82	15	180	Chorella sp.	0,867	0,057	0,867	0,057	1	10,06 ± 0,13	70,00%	29,50%	0,50%	86%	100,00%	89 ± 4%	8 ± 4%	0,00%	1 ± 1%	2 ± 1%
(Posadas et al., 2017)	Simultaneous biogas upgrading and centrate treatment in an outdoors pilot scale high rate algal pond.	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	170	82	15	180	Chorella sp.	1,734	0,114	0,867	0,057	2	9,65 ± 0,95	70,00%	29,50%	0,50%	95%	100,00%	94,00%	2,75 ± 0,95%	0,00%	1 ± 1%	2 ± 1%
(Toledo-Cervantes et al., 2017b)	Influence of the gas-liquid flow configuration in the absorption column on photosynthetic biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors.	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	170	82	15	180	Mychonastes homosphaera (Skuja) Kalina & Puncovářová (sinônimo taxonômico de Chlorella minutissima Fott & Nováková)	0,667	0,044	0,667	0,044	1	10,2 ± 0,5	70,00%	29,50%	0,50%	99%	100,00%	96,2 ± 0,7%	0,4 ± 0,3	0,00%	0,03 ± 0,04%	2,4 ± 0,2%
(Toledo-Cervantes et al., 2017b)	Influence of the gas-liquid flow configuration in the absorption column on photosynthetic biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors.	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	170	82	15	180	Mychonastes homosphaera (Skuja) Kalina & Puncovářová (sinônimo taxonômico de Chlorella minutissima Fott & Nováková)	0,334	0,022	0,667	0,044	0,5	10,2 ± 0,5	70,00%	29,50%	0,50%	97%	100,00%	98,5 ± 0,2%	0,8 ± 0,0%	0,00%	0,01 ± 0,0%	0,7 ± 0,2%
(Toledo-Cervantes et al., 2016)	Photosynthetic biogas upgrading to bio-methane: Boosting nutrient recovery via biomass productivity control.	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	170	82	15	180	Gelatinema sp. (61,5%), Staurosira sp. (1,5%) e Stigeoclonium tenue (37%)	Varies	Varies	Varies	Varies	1	10 ± 0,3	70,00%	29,50%	0,50%	99%	98,60%	95%	0,40%	0,01%	0,20%	3%
(Posadas et al., 2015b)	Minimization of biomethane oxygen concentration during biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors.	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	202	63	15	180	Planktolyngba brevicularis (81%), Stigeoclonium tenue (14%) e Limnithrix planktonica (5%)	5,499	362	0,514	34	10,7	8,0 ± 0,1	70,00%	29,50%	0,50%	79%	100,00%	81 ± 2	6,8 ± 0,9	0,00%	1,2 ± 0,2	7,2 ± 2,8
(Posadas et al., 2015b)	Minimization of biomethane oxygen concentration during biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors.	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	202	63	15	180	Planktolyngba brevicularis (81%), Stigeoclonium tenue (14%) e Limnithrix planktonica (5%)	5,499	362	0,514	34	10,7	7,9 ± 0,2	70,00%	29,50%	0,50%	77%	100,00%	81 ± 2	8,0 ± 0,16	0,00%	1,2 ± 0,2	6,1 ± 0,6
(Posadas et al., 2015b)	Minimization of biomethane oxygen concentration during biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors.	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	202	63	15	180	Planktolyngba brevicularis (81%), Stigeoclonium tenue (14%) e Limnithrix planktonica (5%)	5,499	362	0,514	34	10,7	8,1 ± 0,1	70,00%	29,50%	0,50%	78%	100,00%	81 ± 2	6,6 ± 0,7	0,00%	1,1 ± 0,4	5,9 ± 1,1
(Posadas et al., 2015b)	Minimization of biomethane oxygen concentration during biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors.	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	202	63	15	180	Planktolyngba brevicularis (81%), Stigeoclonium tenue (14%) e Limnithrix planktonica (5%)	5,499	362	0,514	34	10,7	8,0 ± 0,1	70,00%	29,50%	0,50%	72%	100,00%	81 ± 2	9,2 ± 0,5	0,00%	0,7 ± 0,2	6,0 ± 0,5
(Serejo et al., 2015)	Influence of Biogas Flow Rate on Biomass Composition During the Optimization of Biogas Upgrading in Microalgal-Bacterial Processes	Coluna de bolhas	165	4,4	37,5	2,5	202	63	15	180	Chlorella vulgaris	Varies	Varies	Varies	Varies	10	7,9	70,00%	30,00%	0,00%	80%	100,00%	N.E	6,00%	0,00%	2,00%	N.E
(Meier et al., 2017)	Photosynthetic biogas upgrading using microalgae: Effect of light/dark photoperiod	Coluna de bolhas	3000	1,2	2500	NR	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	347	307	579	512	0,6	7,3	65,00%	32,0 ± 1,9%	2%	91%	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
(Franco-Morgado et al., 2017)	A study of photosynthetic biogas upgrading based on a high rate algal pond under alkaline conditions: Influence of the illumination regime	Coluna de bolhas	80	1,9	42,1	NR	N.E	N.E	N.E	N.E	Picochlorum sp. e Halospirulina sp.	1,274,00	449	2,545,00	89	5	9,5	70,00%	29,50%	0,50%	93%	99,50%	N.E	N.E	N.E	2,60%	N.E
(Meier et al., 2015)	Photosynthetic CO ₂ uptake by microalgae: an attractive tool for biogas upgrading	Coluna de bolhas	220	2	110	0,7	1	50	15	75	Nannochloropsis gaditana	0,55	0,14	0,24	0,6	2,33	7,5 ± 0,3	70,00%	30%	0,00%	95%	N.E	N.E	2,00%	N.E	N.E	1,20%
(Bahr et al., 2014)	Microalgal-Biotechnology As a Platform for an Integral Biogas Upgrading and Nutrient Removal from Anaerobic Effluents	Coluna de bolhas	50	4,5	11,1	0,8	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E		0,027 -0,106	833	52	1	9,9	70,00%	30%	1,00%	89%	100,00%	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
(Castro et al., 2022)	Purificação biológica de biogás por processo fotossintético utilizando microalgas	Coluna de bolhas	100	10	10	8,54	50	50	35	87,5	N.E	14,58		4,16		3,5	7,56± 0,5	63,08% a 64,32%	32%	N.E	42,46% a 72,02%	N.E	71,04% a 76,2%	9,15% a 18,46%	N.E	1,24% a 3,26%	N.E

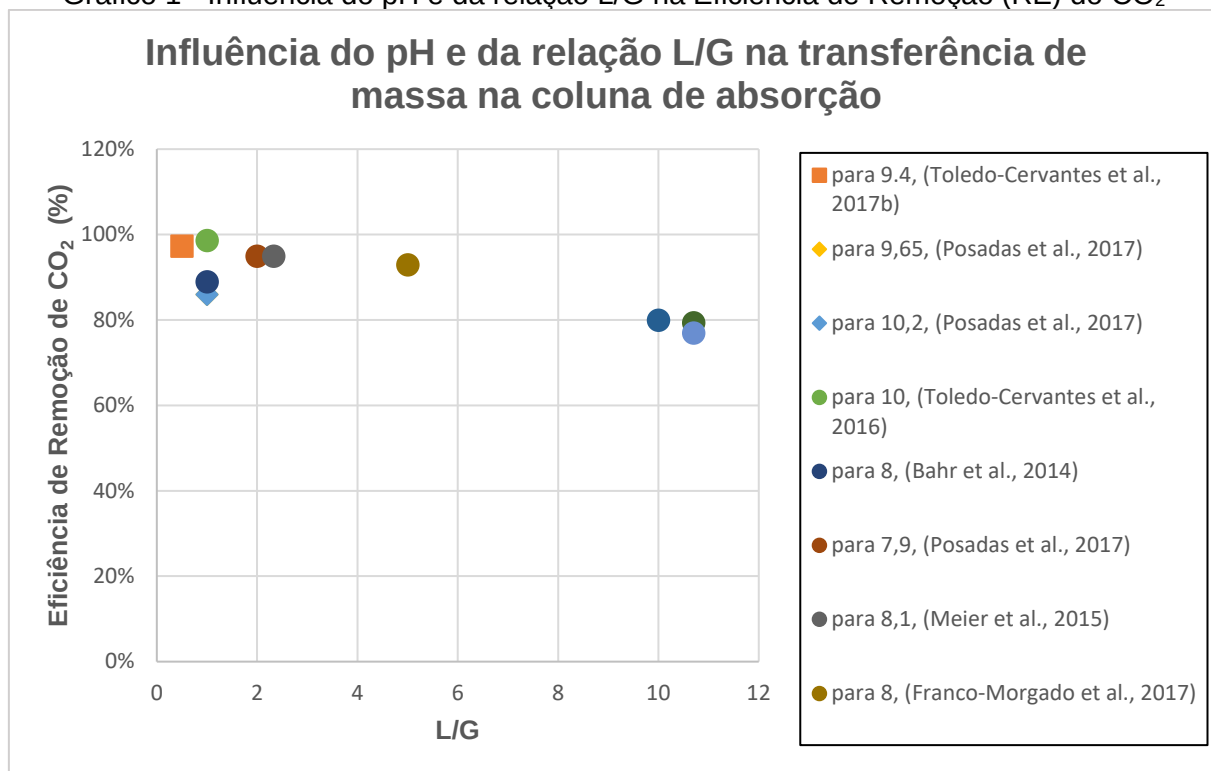
Fonte: Autoria Própria.

4.1 CONTROLE DO PH

A alcalinidade do caldo de cultivo tem efeito positivo na remoção de gases ácidos como CO_2 e H_2S . Realizar a manutenção do caldo de cultivo com um $\text{pH} > 9$ resulta numa maior capacidade tampão, minimizando a diminuição de fortes variações do pH ao longo da coluna de absorção (CA). Dito isto, o efeito da alcalinidade promove um menor estresse microbiológico, o que beneficia a cinética de crescimento das microalgas. Logo, alcalinidades mais elevadas promovem a solubilidade aquosa de ambos os gases ácidos e aumentam as taxas de transferência de massa entre o biogás e a fase líquida.

Um aumento significativo na remoção de CO_2 , juntamente com a garantia de um menor teor de O_2 no biogás atualizado, pode ser alcançado otimizando o pH do líquido recirculante (solução de algas) e a proporção de fluxo de líquido para gás (L/G). Como pode ser observado, a eficiência de remoção de CO_2 apresentou valores satisfatórios mesmo em baixas relações L/G com $\text{pH} > 9$.

Gráfico 1 - Influência do pH e da relação L/G na Eficiência de Remoção (RE) do CO_2



4.2 ESCOLHA DA COLUNA DE ABSORÇÃO

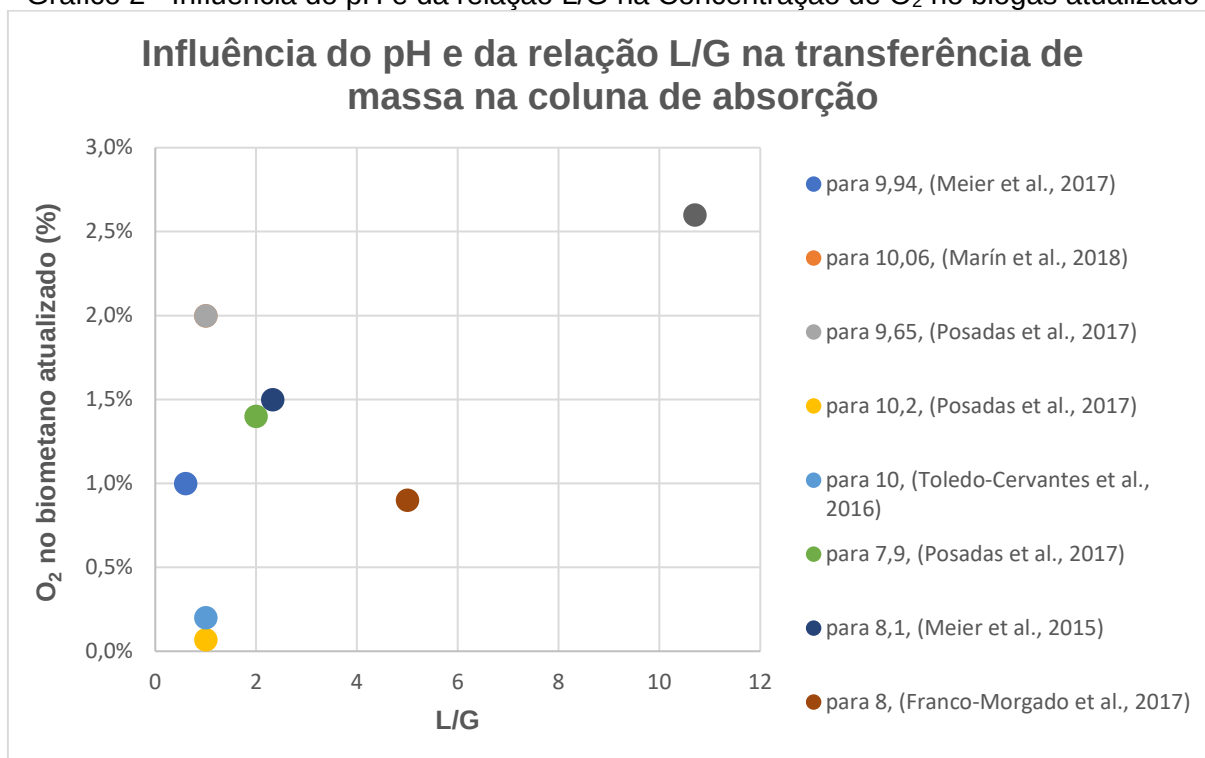
As colunas empacotadas promovem um aumento na pressão operacional da coluna de absorção (CA), melhorando a solubilidade dos contaminantes na fase líquida, potencializando a transferência de massa do CO₂ e do H₂S do biogás para o caldo de cultivo. Entretanto, a presença do recheio nestas colunas provoca o entupimento de biomassa nos meandros da coluna e de enxofre nos aspersores de gás.

Por conta disto, a coluna de bolhas é preferencialmente escolhida como mais adequada para a melhoria do biogás fotossintético.

4.3 CONTROLE DA RELAÇÃO L/G

Tratando-se do fluxo de gás-líquido, os maiores gradientes de concentração globais e taxas de transferência de massa resultam da operação em fluxo contracorrente na coluna de absorção, todavia provocam o aumento da remoção de O₂ e N₂, juntamente com o acúmulo de enxofre no difusor de biogás devido ao esgotamento de oxigênio no fundo da coluna. Logo, a operação co-corrente se torna a configuração preferida durante a atualização fotossintética do biogás (Torres et al., 2021).

Tratando-se da proporção quantitativa entre líquido do meio de cultivo e biogás de entrada na CA, entende-se que uma relação $L/G \leq 1$ geralmente implica em um aumento significativo na remoção de CO₂ e H₂S, juntamente com um menor teor de N₂ e O₂, no biogás atualizado (Toledo-Cervantes et al., 2017).

Gráfico 2 - Influência do pH e da relação L/G na Concentração de O₂ no biogás atualizado

Fonte: Autoria própria.

4.4 ESCOLHA DAS ESPÉCIES DE MICROALGAS

Em concordância com a Literatura avaliada, as microalgas/cianobactérias dos gêneros *Chlorella*, *Pseudanabaena*, *Scenedesmus* e *Spirulina* foram identificadas como os microrganismos mais comuns durante a atualização fotossintética do biogás. Essas microalgas/cianobactérias possuem a capacidade de crescer mixotroficamente, além de apresentarem alta tolerância ao pH e à concentração de CO₂ (Angelidaki et al., 2019; Bose et al., 2019).

4.5 ESCOLHA DAS ESPÉCIES DE BACTÉRIAS OXIDANTES DE ENXOFRE

Do ponto de vista tecnológico, para a remoção biológica de sulfetos, as mais apropriadas são as bactérias quimiolitotróficas oxidantes de enxofre (*Thiobacillus*, *Sulfolobus*, *Thermothrix*, *Beggiatoa* e *Thiothrix*), também conhecidas como bactérias incolores oxidantes de enxofre (Janssen, 1998).

Bactérias oxidantes quimiolitotróficas conhecidas como bactérias oxidantes de enxofre incolores usam a energia de compostos de enxofre inorgânicos reduzidos (sulfeto de hidrogênio, tiosulfatos, sulfitos, enxofre elementar), mas em alguns casos

também de compostos de enxofre orgânicos (por exemplo, metanotiol, dimetilsulfeto, dimetildissulfeto). O dióxido de carbono é geralmente utilizado como fonte de carbono para a construção de novo material celular. Bactérias oxidantes de enxofre incolores são Gram-negativas e, em termos de requisitos de crescimento, diferem muito mesmo nas diferentes espécies de um gênero. Suas temperaturas ótimas são de 4 a 90°C e os valores de pH estão na faixa de 1 a 9. A maioria das bactérias quimiolitotróficas estudadas prosperam melhor em condições mesofílicas ou termofílicas (*Thiobacillus*, *Sulfolobus*, *Thermothrix*) (Pokorna, Zabranska, 2015).

As bactérias do gênero *Thiobacillus* apresentam melhor eficiência de remoção que outras espécies oxidantes de enxofre em razão das modestas exigências nutricionais, afinidade extremamente alta por sulfetos e oxigênio, além da habilidade de crescer utilizando H_2S como fonte de energia e o CO_2 como fonte de carbono (Araújo, 2013).

4.6 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO (ER)

O método biológico de melhoria do biogás por meio da fotossíntese combinada com a oxidação de enxofre, mostrou-se efetiva em extrair o CO_2 e o H_2S em uma única etapa. A Eficiência de Remoção (ER) dos contaminantes propostos obteve boa porcentagem de purificação pelo sistema biológico em questão.

As ERs encontradas, variaram em sua maioria, de 72,0% a 99,0% de remoção do CO_2 presente no biogás e 98,6% a 100,0% para o H_2S .

Os estudos se discerniram em estrutura dos reatores, das colunas de absorção, relação L/G, pH do meio, além de outras diferenciações de acordo com o escopo do projeto. Todavia, com exceção de Meier (2015) e Meier (2017), nota-se que em pesquisas com $pH \leq 8$ indicaram uma $ER \leq 80\%$ para uma porcentagem de 30% de CO_2 na composição do biogás de entrada. As demais pesquisas cujo pH esteve maior ou igual a 9,4, a eficiência de remoção fora de 86% ou mais.

Conforme apontado anteriormente, ainda que o H_2S presente no biogás bruto possua menor expressão na composição total do gás ($H_2S \leq 1\%$), a ER encontrada obteve resultados muito satisfatórios, corroborando com a qualidade de atuação das bactérias oxidantes de enxofre no consórcio de cultivo, como uma tecnologia promissora no sequestro do sulfeto de hidrogênio presente no biogás bruto.

4.7 CÁLCULO PARA PERSPECTIVA DO PROJETO EM ESCALA INDUSTRIAL

Assumindo hipoteticamente, que o biogás gerado em um aterro sanitário alimente uma usina elétrica com potência instalada de 1,5 MW, operando de forma contínua e a taxa de conversão do biogás em energia elétrica para motores-geradores em Ciclo-Otto seja de 35%, temos que:

$$Energia\ de\ Entrada = \frac{1500 * 24}{0,35} = 102857,1 \frac{kWh}{dia} = 3,7 \times 10^5 \frac{MJ}{dia}$$

Adotando o Valor Calorífico Inferior do metano como 35,8 MJ/m³, o biogás melhorado contendo 90% de CH₄ e uma relação L/G de 0,5, temos:

$$Biogás\ Gerado = \frac{3,7 \times 10^5}{35,8 * 0,9} = 11.492,4 \frac{m^3}{dia}$$

$$Caldo\ de\ Cultivo\ Circulando\ no\ Sistema = 11.492,42 * 0,5 = 5746,2 \frac{m^3}{dia}$$

Em um sistema de lagoa aberta (HRAP) com 0,3 m de profundidade, temos que a área necessária em hectares (ha) para a implantação do sistema corresponde:

$$Área\ da\ Lagoa = \frac{5746,2}{0,3 * 10000} = 1,9\ ha$$

Em um sistema de um fotobiorreator em placas planas (FPP) foi adotado 2,5m de altura das placas, 1,5m de largura e 0,1m de espessura. Para o cálculo da área de implantação deste sistema é necessário calcular a razão entre superfície e volume e assumir a necessidade de um décimo da área de superfície dos reatores como requisito de terra dos FBRs de placa plana (Płaczek et al., 2017).

$$Razão\ entre\ superfície\ e\ volume\ do\ FPP = \frac{2 * (2,5 * 1,5)}{2,5 * 1,5 * 0,1} = 20 \frac{m^2}{m^3}$$

$$Área\ do\ FPP = \frac{5746,2 * 20}{10 * 10000} = 1,15\ ha$$

Logo, para uma operação contínua de uma usina de biogás de 1,5 MW, seria necessária uma pegada terrestre total estimada em 1,9 hectares para meios de cultivo em lagoas de pista ou 1,15 hectares para culturas em fotobiorreatores de placa plana.

4.8 DESIGN DO MEIO DE CULTIVO

Lagoas abertas são a configuração mais comum para o cultivo de microalgas em grande escala. O uso generalizado de tanques abertos é atribuído principalmente ao seu design, construção e operação simples, aos seus baixos requisitos de energia e, portanto, aos menores custos associados. Contudo, lagoas abertas apresentam grande necessidade de espaço e a exposição da cultura à atmosfera aberta facilita a contaminação microbiana e a evaporação da água (Chang et al., 2017; Chisti, 2007; Posten, 2009).

Por outro lado, fotobiorreatores de placa plana apresentam várias vantagens, incluindo uma alta relação superfície/volume, fácil controle de temperatura, transferência de massa e mistura eficientes com baixa tensão de cisalhamento nas células., controle eficaz de pH, eficiência superior, fácil operação e robustez (Bose et al. 2019).

Tratando-se da implantação do sistema em um aterro sanitário, entende-se que pegada terrestre deve ser levada em consideração em razão da restrição territorial do espaço cuja operação é direcionada à disposição de resíduos. Logo, a utilização de FBRs de placa plana são mais adequados para o escopo proposto em virtude da melhor proporção superfície/volume em relação às lagoas do tipo *raceway pond*.

5 CONCLUSÃO

O Brasil possui muitas dificuldades em difundir uma cultura que preze pelas opções ambientalmente mais favoráveis acerca da hierarquia de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. A existência de lixões e aterros sanitários sem recuperação energética compõem a maior parcela na lógica de disposição dos RSU. O Brasil é o quinto maior emissor de metano do mundo, ao passo que 48% das emissões do setor de resíduos estão associadas a aterros sanitários.

Não obstante, compreendendo a lógica brasileira de destinação de resíduos atual e tratando este problema de forma objetiva, o incentivo em tecnologias que promovam a valorização do biogás produzido em aterros sanitários, propõe a transformação de um passivo, quando emitido à atmosfera, em um importante ativo na indústria e ferramenta de diversificação e transição energética.

As tecnologias físico-químicas de melhoria do biogás carecem de um alto custo operacional e de implantação, além da necessidade de aplicação separada, em sua maioria, de tecnologias que removam diferentes impurezas do biogás, o que dificulta o processo de purificação do biogás e aumenta o custo do projeto.

O método biológico de melhoria do biogás por meio da fotossíntese combinada com a oxidação de enxofre é uma tecnologia nova, promissora, sustentável, ambientalmente correta e capaz de sequestrar o CO₂ e o H₂S em uma única etapa.

Todos os documentos que fomentaram a base de dados apresentada, utilizaram as lagoas abertas para o cultivo do consórcio de microalgas e bactérias oxidantes de enxofre. Entende-se que os estudos analisados, ainda estão em estágio de desenvolvimento experimental, logo não foram direcionados investimentos em estruturas mais robustas e complexas.

Existem diferentes designs de sistemas de cultivo para microalgas, logo o tipo de reator empregado no cultivo de microalgas dependerá do objetivo a ser atingido, pois os sistemas abertos e fechados possuem vantagens e desvantagens, cabendo ao projetista avaliar diante das necessidades e limitações do local.

Com base nos resultados descritos neste trabalho, uma usina elétrica com potência instalada de 1,5 MW, alimentada por biogás proveniente de um aterro sanitário, necessita de uma pegada territorial de 1,9 hectares para cultivar microalgas em um sistema de lagoa aberta ou 1,15 hectares para realizar o processo em

fotobiorreatores de placa plana, considerando uma relação L/G de 0,5, no atual nível tecnológico.

Tratando-se de um aterro sanitário, cuja pegada territorial é um limitante ao avanço do projeto em escala industrial, a escolha de fotobiorreatores de placa plana, seja uma escolha mais assertiva, visto que este tipo de sistema fechado apresentou uma área 40% menor em relação ao sistema aberto proposto.

Tratando-se de uma tecnologia em progressão, é indispensável a formulação de novas pesquisas acerca do tema, visando aprimorar o conhecimento atual e alavancar a otimização do sistema para proporções de escala industrial.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Gabriele Mônego et al. Remoção biológica de gás sulfídrico concentrado para tratamento do biogás. 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7970/ARAUJO%2C%20GABRIELE%20MONEGO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 de março de 2025.

ANGELIDAKI, Irini et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology advances*, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018. Disponível em: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/190081841/BiogasUpgrade_Review.pdf. Acesso em: 13 de novembro de 2023.

AWE, Olumide Wesley et al. A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies. *Waste and Biomass Valorization*, v. 8, p. 267-283, 2017. Disponível em: <https://hal.science/hal-01619254/file/a-review-of-biogas-utilisation.pdf>. Acesso em: 13 de novembro de 2023.

BAUER, Fredric et al. Biogas upgrading-Review of commercial technologies. 2013. Disponível em: <https://lup.lub.lu.se/search/files/5465492/4580054.pdf>. Acesso em: 13 de novembro de 2023.

BOSE, Archishman et al. How to optimise photosynthetic biogas upgrading: a perspective on system design and microalgae selection. *Biotechnology advances*, v. 37, n. 8, p. 107444, 2019. Disponível em: <https://cora.ucc.ie/server/api/core/bitstreams/18543680-cbaa-4b44-9473-8be9c1d480bd/content>. Acesso em: 2 de maio de 2023.

CARVALHO, Ana P.; MEIRELES, Luís A.; MALCATA, F. Xavier. Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. *Biotechnology progress*, v. 22, n. 6, p. 1490-1506, 2006. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/30497640/microalgal_reactors_a_review_of_enclosed_system_designs_and_performances-libre.pdf?1391845356=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMicroalgal_reactors_a_review_of_enclosed.pdf&Expires=1760825306&Signature=HHifJNuXKDGGrJt0wgchR~iP7nSnPONo~luK9fRMRC~9mG9FhZakdg8Cup0wk0NJ3Vcih7YNqj3sMEV6m-HLdSaeBrBf0LVkOlnF7p-cxGxPJDwAl2CGIhG1sIOMzLKqyZrBY~EtHixtUY2Jx00tiFAwjBxxpWYJUR0WixjyOyx9NOTzHL2ztYQXLpz6clsWLjY0-vgk8FUqD3lqPMJ0JnpcdjUCqnP~obebZf0E-a9TpPIK7hDjWjWIS-N6H4QF6r80mG-NZpqKWY6KO8JhCd7BvRb6YON6iwa42-GmUDzleKF--TRCcf710QMxaPgKaGnfkphWXcw3gRxHfoOQJmw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 22 de março de 2025.

CASTRO, Aline Antonia et al. Purificação biológica de biogás por processo fotossintético utilizando microalgas. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 13, p. e228111335327-e228111335327, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/35327>. Acesso em: 27 de abril de 2023.

CHI, Zhanyou; O'FALLON, James V.; CHEN, Shulin. Bicarbonate produced from carbon capture for algae culture. *Trends in biotechnology*, v. 29, n. 11, p. 537-541, 2011. Disponível em: [https://www.cell.com/trends/biotechnology/fulltext/S0167-7799\(11\)00110-7?large_figure=true](https://www.cell.com/trends/biotechnology/fulltext/S0167-7799(11)00110-7?large_figure=true). Acesso em: 7 de junho de 2023.

DEL ROSARIO RODERO, María et al. Influence of alkalinity and temperature on photosynthetic biogas upgrading efficiency in high rate algal ponds. *Algal research*, v. 33, p. 284-290, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926417310366>. Acesso em: 4 de junho de 2023.

DEL ROSARIO RODERO, María et al. Performance evaluation of a control strategy for photosynthetic biogas upgrading in a semi-industrial scale photobioreactor. *Bioresource technology*, v. 307, p. 123207, 2020. Disponível em: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/46775/Performance-evaluation-control-strategy.pdf?sequence=1>. Acesso em: 11 de junho de 2023.

FRANCO-MORGADO, Mariana et al. A study of photosynthetic biogas upgrading based on a high rate algal pond under alkaline conditions: influence of the illumination regime. *Science of The Total Environment*, v. 592, p. 419-425, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717305892>. Acesso em: 29 de abril de 2023.

FRANCO-MORGADO, Mariana et al. A study of photosynthetic biogas upgrading based on a high rate algal pond under alkaline conditions: Influence of the illumination regime. *Science of The Total Environment*, v. 592, p. 419-425, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717305892>. Acesso em: 02 de outubro de 2024.

FRANCO-MORGADO, Mariana et al. Strategies for decreasing the O₂ content in the upgraded biogas purified via microalgae-based technology. *Journal of Environmental Management*, v. 279, p. 111813, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720317382>. Acesso em: 10 de maio de 2023.

HENSHAW, Paul F.; ZHU, Wei. Biological conversion of hydrogen sulphide to elemental sulphur in a fixed-film continuous flow photo-reactor. *Water Research*, v. 35, n. 15, p. 3605-3610, 2001. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/46440073/s0043-1354_2801_2900082-320160613-113322-1c5138u-libre.pdf?1465829197=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DBiological_conversion_of_hydrogen_sulphi.pdf&Expires=1760897509&Signature=TW6AdE5anwdNmqlUjrI68LEUkEJHdxR2fPajMul4sGBfgRrZKifvLcn6MAeAqS~mylaaZhMX-SiiWIsW8SNLXYZ9TiXmyrNfNb2r0HVVWzYr3sTekl6pm1ERXW9RUeZZrXfWs9nW8SZ4qGbpvs94NYxbIlgTUwPMcb-UqBKaSmy2Dd6zv57yE~A7tyaE9kn~kdimFnVg2stdV75VXgHGxOVXrbFyqDGdjlWpJAdwCFLcybLLIQPjhgKAAMg~XRjuf0wlkFBqLLx5t1cDCahrIpMmMpkUgn3Q4sK-

hk2lMgCJnPwUp9SYz7HB5p5AtobMMCuU4mc9ZBB3JfHSrPJ3Q__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 17 de março de 2025.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso em: 27 de junho de 2023.

JANSSEN, A. J. H. et al. Application of the redox potential for controlling a sulfide oxidizing bioreactor. *Biotechnology and bioengineering*, v. 60, n. 2, p. 147-155, 1998. Disponível em: [https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19981020\)60:2%3C147::AID-BIT2%3E3.0.CO;2-N](https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/(SICI)1097-0290(19981020)60:2%3C147::AID-BIT2%3E3.0.CO;2-N). Acesso em: 17 de março de 2025.

KANA, EB Gueguim et al. Modeling and optimization of biogas production on saw dust and other co-substrates using artificial neural network and genetic algorithm. *Renewable energy*, v. 46, p. 276-281, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Agbaje-Lateef/publication/245191583_Modeling_and_optimization_of_Biogas_production_on_Saw_dust_and_other_co-substrates_using_Artificial_Neural_Network_and_Genetic_Algorithm/links/59dbf43ca6fdcc1ec89fa9c0/Modeling-and-optimization-of-Biogas-production-on-Saw-dust-and-other-co-substrates-using-Artificial-Neural-Network-and-Genetic-Algorithm.pdf. Acesso em: 29 de junho de 2023.

KLEMENČIČ, M. et al. Synthetic biology of cyanobacteria for production of biofuels and high-value products. In: *Microalgae-based biofuels and bioproducts*. Woodhead Publishing, 2017. p. 305-325. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081010235000133>. Acesso em: 29 de junho de 2023.

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; DO AMARAL, André Cestonaro. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. 2022. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1141618>. Acesso em: 13 de junho de 2023.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E. A. Analysis of an innovative process for landfill gas quality improvement. *Energy*, v. 109, p. 1107-1117, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216306880>. Acesso em: 20 de abril de 2023.

MEIER, Leslie et al. Evaluation of the feasibility of photosynthetic biogas upgrading: Simulation of a large-scale system. *Energy*, v. 189, p. 116313, 2019. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/99015912/j.energy.2019.11631320230223-1->

42ka8l.pdf?1677123631=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEvaluation_of_the_feasibility_of_photosy.pdf&Expires=1760899385&Signature=JVlkKkhrry5CJQkduSVUnQbTBr4UFj2XGXw0fC7gtwrX5KfiAgewxEfkYn1WrMv61JUONMCDbm-V10e-q-0rh-4oGxqSXVmSXP5eL-DbUUMG6Qy4Rm9gyP4y9h9CEpFN5FDws2bTgLQJbSTTTSXGGTg9Tr3fLs4ZtT60-hxtfSf2Vod3leQsPIK6ioIS4zwbPJOCsz4rJ4N0PxJimRKWhiyZOprxdPfe7J3vFS83BNdLrA-GLrdsE01PdFh103dExQhA3l5SGffBndQYiaNSWR6F0euy24dEzaBb9xMtzYDW07G7A3flizo4qA7euF613Lfl5FMZxCHfU2rbVOFjFw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 12 de junho de 2023.

MONTEIRO, Sílvia Daniel da Silva Carvalho et al. Produção de biometano: análise de mercado e estudo da Separação por PSA. 2011. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/69219/1/000150475.pdf>. Acesso em: 25 de abril de 2023.

MUÑOZ, R.; GUIEYSSE, B. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Research*, v. 40, n. 15, p. 2799-2815, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135406003605>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

PERSSON, Margareta; JÖNSSON, Owe; WELLINGER, Arthur. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. In: IEA Bioenergy task. 2006. p. 1-34. Disponível em: [http://213.229.136.11/bases/ainia_agrobiomet.nsf/0/0AD612EE29B0C370C1257554003E8A10/\\$FILE/upgrading_report_final.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_agrobiomet.nsf/0/0AD612EE29B0C370C1257554003E8A10/$FILE/upgrading_report_final.pdf). Acesso em: 13 de novembro de 2023.

POKORNA, Dana; ZABRANSKA, Jana. Sulfur-oxidizing bacteria in environmental technology. *Biotechnology Advances*, v. 33, n. 6, p. 1246-1259, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Dana-Pokorna/publication/272624231_Sulfur-oxidizing_Bacteria_in_Environmental_Technology/links/5a71a3d5a6fdcc33daaa9310/Sulfur-oxidizing-Bacteria-in-Environmental-Technology.pdf. Acesso em: 17 de março de 2025.

PROBST, Jean Luc et al. Fluxo de carbono inorgânico dissolvido no Rio Piracicaba (São Paulo): partição e reações de equilíbrio do sistema carbonato. *Geosciences = Geociências*, v. 25, n. 4, p. 429-436, 2006. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/491>. Acesso em: 13 de novembro de 2023.

RASI, Saija; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, Jukka. Upgrading landfill gas using a high pressure water absorption process. *Fuel*, v. 115, p. 539-543, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113006819>. Acesso em: 21 de abril de 2023.

RICHMOND, A. (Ed.). *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Oxford: Blackwell Science, 2004. Disponível em:

<https://alगतex.org/ebook/Handbook%20of%20microalgal.pdf>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

RITTMANN, B. E.; MCCARTY, P. L. *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. New York: McGraw-Hill, 2001. Disponível em: https://www.academia.edu/28898814/Environmental_Biotechnology. Acesso em: 30 de novembro de 2024.

RYCKEBOSCH, Eline; DROUILLON, Margriet; VERVAEREN, Han. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and bioenergy*, v. 35, n. 5, p. 1633-1645, 2011. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/85520316/j.biombioe.2011.02.03320220505-1-1xqmier-libre.pdf?1651743641=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTechniques_for_transformation_of_biogas.pdf&Expires=1760899714&Signature=aGC30SierLxHSEZHlaxxxjEJQ8rS6ShPVPEiYMKNkGvX7dpPFgutO77If5kGgo-DpJNJEmIjfflYooNrmOx9cJdb2FgdHnNbyXwW2CjHBjy~oi5P4NkY3VvGXKY82SR4Xk2HoYlIRpUUz2QnZJvdhPtBjYzh52X21pAzQZC4Ad1u4ax7R-DEtLf-POFE3xs1jnos6blRuTxge6fcVdspMZVNhv6j4LYNG30amYeoYnULST5kRCoSKJEz85p-jbUDI7nu9~hKaERVXhrEU3gHbO1Kj1iupr99WWFF8NteTHJxQ4estyZ5tifMypHt8mg8dPHMJPFuMexlQyIK7sUmQg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 28 de junho de 2023.

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Observatório do Clima. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 15 de março de 2025 – seeg.eco.br.

SEVERO, Ihana A. et al. Carbon dioxide capture and use by microalgae in photobioreactors. In: *Bioenergy with carbon capture and storage*. Academic Press, 2019. p. 151-171. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128162293000089>. Acesso em: 29 de junho de 2023.

STAUDT, Tiago Bauermann. Predição do volume de biogás produzido em sistemas de biodigestão utilizando redes neurais artificiais. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/6122/TCC%20Tiago%20Bauermann%20Staudt.pdf?sequence=1>. Acesso em: 29 de junho de 2023.

TOLEDO-CERVANTES, Alma et al. Influence of the gas-liquid flow configuration in the absorption column on photosynthetic biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors. *Bioresource technology*, v. 225, p. 336-342, 2017. Disponível em: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/23547/Toledo%20et%20al.%202016%20Bioresoruce%20Technol..pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 30 de maio de 2023.

TORRES, Roxana Angeles et al. Optimization of photosynthetic biogas upgrading in closed photobioreactors combined with algal biomass production. *Journal of Water*

Process Engineering, v. 38, p. 101554, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714420304323>. Acesso em: 28 de maio de 2023.

TORRES, Roxana Angeles. Optimization of photosynthetic biogas upgrading combined with algal biomass valorization: assessing alternative operating strategies and photobioreactor configurations. 2021. Tese de Doutorado. Universidad de Valladolid. Disponível em: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/48598/Tesis1879-210906.pdf?sequence=1>. Acesso em: 13 de novembro de 2023.

VASUMATHI, K. K.; PREMALATHA, M.; SUBRAMANIAN, P. Parameters influencing the design of photobioreactor for the growth of microalgae. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 7, p. 5443-5450, 2012. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/91286512/j.rser.2012.06.01320220920-1-zg1sx9-libre.pdf?1663658075=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DParameters_influencing_the_design_of_pho.pdf&Expires=1760899968&Signature=epgO23sTZKZBqQxR~O6fuwypg18lgn8tAfbRgt-UQMPDswtdKI0phxwcsYpJRxCaD4D0BLQeLOfapxtbeYZmng6FnyzvFgMy97t6iY5YGGsc3dJIY~KXeHFhSbPSIMKMUZ0qKS726rYMhlsjQQSG5ADKzwftGWKK2HlFnlg1N499TGMd0w7YrtW1EEJOp-QPOcG3MJziMoNArTK2SIfBiPZJ62jq1RMNZI8Vtcv6gD8OKQkGXm6cxhBxV1RHaWQx59QQ80FLHQuMp~tvF5WHt8Z~3Wf6DaLYeF2vWZsLkHoTJ4pNufPJPdcF~HZG~71zCMNdkBbcPcb2IYH8szB6lw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 13 de novembro de 2023.

ZHANG, Yuyao et al. Economic assessment of biogas purification systems for removal of both H₂S and siloxane from biogas. Renewable Energy, v. 168, p. 119-130, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120319960>. Acesso em: 24 de abril de 2023.