



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

**PRODUÇÃO E PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO  
BIOTECNOLOGIA DE MICROALGAS COMO  
ALTERNATIVA ENERGÉTICA RENOVÁVEL**

Aline Antonia Castro

Lajeado, dezembro de 2022

Aline Antonia Castro

**PRODUÇÃO E PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO  
BIOTECNOLOGIA DE MICROALGAS COMO  
ALTERNATIVA ENERGÉTICA RENOVÁVEL**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Taquari - Univates, dentro da linha de pesquisa de Tecnologia e Ambiente, como parte da exigência para qualificação da tese para obtenção do título de doutor.

ORIENTADOR: Prof. Dr. *Mont.* Odorico Konrad

Lajeado, dezembro de 2022

Aline Antonia Castro

**PRODUÇÃO E PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO BIOTECNOLOGIA DE  
MICROALGAS COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA RENOVÁVEL**

A Banca examinadora abaixo aprova a Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do grau de Doutor em Ambiente e Desenvolvimento, na área de concentração Tecnologia e Ambiente:

Prof. Dr. Odorico *Mont.* Konrad - Orientador  
Universidade do Vale do Taquari

Prof. Dr. Eduardo Miranda Ethur  
Universidade do Vale do Taquari

Prof. Dr<sup>a</sup>. Lucelia Hoehne  
Universidade do Vale do Taquari

Prof. Dr<sup>a</sup>. Maria Cristina da Almeida Silva  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta conquista a Deus, por sua infinita sabedoria e amor e ao mestre Jesus Cristo, Maravilhoso, Conselheiro, Deus forte, Pai da eternidade, Príncipe da paz.

Pedi, e dar-se-vos-á; buscai, e encontrareis;  
batei, e abrir-se-vos-á.

Porque, aquele que pede, recebe; e, o que busca,  
encontra: e, ao que bate, se abre.

Mateus 7:7,8

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e a Jesus Cristo pelo amor incondicional, pela direção e proteção em todos os meus caminhos, por terem me levado a lugares que jamais imaginaria alcançar.

A minhas filhas Ana Luiza e Nívia pelo amor, pelas demonstrações de carinho que me fizeram chorar, pela amizade, por me incentivarem e me apoiarem, por estarem presentes em todos os momentos e pela paciência nos momentos de ausência.

Aos meus pais Luiz e Antoinette pelo amor, apoio em todos os momentos e esforço irrestrito que sempre tiveram para que eu conseguisse realizar os meus sonhos.

As minhas irmãs e a Renan pelas palavras de motivação e pela alegria que sempre demonstraram com minhas conquistas.

Ao meu orientador Odorico Konrad pelo tempo dedicado a todas as fases deste trabalho, pela confiança, atenção, incentivo, respeito, amizade, por acreditar no meu potencial e me fazer crescer ao longo deste período.

A toda a equipe do CEPTEs, Munique, Joice, Christine, Bruna e Guilherme, pelo acolhimento, conhecimentos passados, disposição em auxiliar em todas as ocasiões e pela grande contribuição na execução deste trabalho.

Aos demais professores e funcionários do PPGAD pelos conhecimentos transmitidos, pela receptividade e pelo imperioso auxílio.

A todos os membros da banca examinadora que com sua experiência científica e conceituada qualificação enriqueceram as discussões deste trabalho através de suas sugestões.

A Universidade do Vale do Taquari pela qualidade do ensino e por ofertar a grande oportunidade na realização deste sonho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho.

## RESUMO

A fonte de energia renovável verde é uma promissora opção para superar a instabilidade energética, reduzir o lançamento na atmosfera de gases do efeito estufa e alcançar a sustentabilidade na produção de energia, e assim, cumprir os objetivos da Agenda 2030, que requer substituir as reservas de combustíveis fósseis por recursos renováveis. A geração de biogás a partir de microalgas por digestão anaeróbia é uma tecnologia que oferece vantagens sobre outras rotas de produção de biocombustíveis, como, por exemplo, a de apresentar elevada concentração de metano e baixas concentrações de enxofre quando comparado ao biogás oriundo de outros substratos. A aplicação de métodos biológicos tem se tornado uma alternativa atraente para o desenvolvimento sustentável na purificação do biogás. Suas principais vantagens são a facilidade e simplicidade de operação, baixo custo e preservação do meio ambiente. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial de geração e de purificação biológica de biogás utilizando microalgas. A purificação biológica por processo fotossintético foi realizada em protótipo de purificador em escala piloto, composto por um sistema de dois estágios, constituído um por reator interligado a uma coluna de absorção, utilizando como microrganismos um consórcio de microalgas/bactérias. A avaliação da produção de biogás foi realizada por digestão anaeróbia em escala laboratorial, utilizando a microalga *Euglena sanguinea*. Para os ensaios de dessulfurização, as análises mostraram concentrações de H<sub>2</sub>S acima de 1.000 ppm no biogás bruto e sua remoção completa (eficiência de remoção de 100%) por meio do processo biológico com microalgas/bactérias aos 180 minutos de operação do sistema. Para os ensaios de verificação dos teores de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub>, o biogás bruto apresentou concentração de CO<sub>2</sub> em torno de 32%; CH<sub>4</sub> variando de 63,08% a 64,32 %; e O<sub>2</sub> de 0,17% a 0,71%. Após a purificação biológica, o biogás apresentava concentrações de CO<sub>2</sub> variando de 9,15% a 18,46%; CH<sub>4</sub> de 71,4% a 76,2%; e de O<sub>2</sub> entre 1,24% a 3,26%. Eficiências de remoção de CO<sub>2</sub> de 42,46% a 72,02% foram registradas no biogás purificado. Na avaliação da produção de biogás, foi utilizada a biomassa da microalga *Euglena sanguinea*, que apresentou uma produção média acumulada de biogás de 1.619,63 ± 283,00 mL e o volume de metano de 746,27 ± 140,85 mL, atingindo o máximo de 65,54 ± 1,97% no 31º dia. O Potencial Bioquímico de Biogás obtido foi de 703,19 ± 127,31 mL.g<sub>VS</sub><sup>-1</sup> e o Potencial Bioquímico de Metano de 334,37 ± 63,35 mL.g<sub>VS</sub><sup>-1</sup>, o que representa um rendimento de 27,02 ± 4,89 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de microalgas e 12,85 ± 2,43 m<sup>3</sup> de metano. Assim, os resultados demonstraram que o processo biológico com microalgas se mostrou satisfatório e promissor para a purificação do biogás e que a microalga *Euglena sanguinea* apresentou potencial para uso como substrato para geração de biogás e metano.

**Palavras-chave:** Purificação de biogás, Microalga, Biofixação, Sustentabilidade energética.

## ABSTRACT

The green renewable energy source is a promising option to overcome energy instability, reduce the release of greenhouse gases into the atmosphere and achieve sustainability in energy production, and thus fulfill the goals of the 2030 Agenda, which requires replacing reserves from fossil fuels to renewable resources. The generation of biogas from microalgae by anaerobic digestion is a technology that offers advantages over other biofuel production routes, such as having a high concentration of methane and low concentrations of sulfur when compared to biogas from other substrates. The application of biological methods has become an attractive alternative for sustainable development in biogas purification. Its main advantages are the ease and simplicity of operation, low cost and preservation of the environment. This research aimed to evaluate the potential of generation and biological purification of biogas using microalgae. Biological purification by photosynthetic process was carried out in a prototype purifier on a pilot scale, consisting of a two-stage system, consisting of one per reactor connected to an absorption column, using a consortium of microalgae/bacterium as microorganisms. For the desulphurization tests, the analyzes showed H<sub>2</sub>S concentrations above 1,000 ppm in the raw biogas and its complete removal (100% removal efficiency) through the biological process with microalgae/bacterium after 180 minutes of system operation. For the verification tests of the CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and O<sub>2</sub> contents, the raw biogas presented a CO<sub>2</sub> concentration around 32%; CH<sub>4</sub> ranging from 63.08% to 64.32%; and O<sub>2</sub> from 0.17% to 0.71%. After biological purification with microalgae, the biogas presented CO<sub>2</sub> concentrations ranging from 9.15% to 18.46%; CH<sub>4</sub> from 71.4% to 76.2%; and O<sub>2</sub> between 1.24% to 3.26%. CO<sub>2</sub> removal efficiencies of 42.46% to 72.02% were recorded in the purified biogas. In the evaluation of biogas production, the biomass of the microalgae *Euglena sanguinea* was used, which presented an average accumulated production of biogas of 1,619.63 ± 283.00 mL and the methane volume of 746.27 ± 140.85 mL, reaching a maximum of 65, 54 ± 1.97% on the 31st day. The Biochemical Potential of Biogas obtained was 703.19 ± 127.31 mL.g<sub>VS</sub><sup>-1</sup> and the Biochemical Potential of Methane was 334.37 ± 63.35 mL.g<sub>VS</sub><sup>-1</sup>, which represents a yield of 27.02 ± 4.89 m<sup>3</sup> of biogas per ton of microalgae and 12.85 ± 2.43 m<sup>3</sup> of methane. Thus, the results demonstrated that the biological process with microalgae was satisfactory and promising for the purification of biogas and that the microalgae *Euglena sanguinea* showed potential for use as a substrate for the generation of biogas and methane.

Keywords: Biogas purification, Microalgae, Biofixation, Energy sustainability.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Conexões do tema de estudo com os ODS .....	22
--	----

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Estrutura da Tese .....	17
------------------------------------	----

## ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
GGE	Gases do Efeito Estufa
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial hidrogeniônico
Proálccol	Programa Nacional do Álccol
ppm	Parte por milhão
RenovaBio	Política Nacional de Biocombustíveis
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Tema .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura da Tese .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DA TESE.....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS ARTIGOS .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Artigo 1: Cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais: revisão de literatura.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Artigo 2: Panorama global da produção científica sobre microalgas no tratamento de águas residuais .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3</b>	<b>Artigo 3: Dessulfurização de biogás por processo fotossintético com microalgas e absorção por lavagem com água .....</b>	<b>57</b>
<b>3.4</b>	<b>Artigo 4: Purificação biológica de biogás por processo fotossintético utilizando microalgas .....</b>	<b>73</b>
<b>3.5</b>	<b>Artigo 5: Evaluation of Biogas and Methane Production from Microalgae .....</b>	<b>89</b>
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO GERAL .....</b>	<b>105</b>
<b>4.1</b>	<b>Discussão integrada dos artigos.....</b>	<b>105</b>
<b>4.2</b>	<b>Energias renováveis.....</b>	<b>113</b>
<b>4.3</b>	<b>Biogás de microalgas .....</b>	<b>116</b>
<b>4.4</b>	<b>Rotas biotecnológicas de purificação .....</b>	<b>117</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>122</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>124</b>

# 1 APRESENTAÇÃO

## 1.1 Introdução

O aumento da temperatura global, devido a emissões crescentes de gases do efeito estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) resultante da queima de combustíveis fósseis, configurou-se como um obstáculo para o desenvolvimento econômico e social sustentável, tornando primordial a fundamentação de meios eficientes que atenuem as emissões destes gases na atmosfera (RAZZAK et al., 2017; ADENIYI; AZIMOV; BURLUKA, 2018).

Neste sentido, diversos acordos internacionais vêm sendo realizados no intuito de controlar a emissão dos GEE. O Protocolo de Quioto instituiu orientações para que os países cumprissem os objetivos para a redução do lançamento de GEE no período de 2013 a 2020, numa faixa de 18% abaixo do índice verificado em 1990. O Protocolo contemplou dois períodos, o primeiro teve início no ano de 2008 e término no ano de 2012. O segundo período teve início em 1º de janeiro de 2013 e terminou em 2020 (RAZZAK et al., 2013; CHEAH et al., 2015).

O tratado internacional mais recente refere-se ao Acordo de Paris, realizado no período de 30 de novembro a 11 de dezembro de 2015, durante a 21ª Conferência da Organização da Nações Unidas (ONU), onde 195 países participantes comprometeram-se em reduzir as emissões de GEE. O propósito principal do Acordo de Paris foi buscar empenho global quanto à ameaça de mudanças climáticas, limitando o aumento da temperatura abaixo de 2 graus neste século (ONU, 2020).

Outra ferramenta que orienta as questões sobre mudanças climáticas é a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da ONU, firmada em setembro de 2015. A Agenda é composta por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) com 169 metas associadas, agregadas e indivisíveis, que nortearão as tomadas de decisões no período de quinze anos. O ODS 13, “tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos”, confere a mudança climática como um dos maiores desafios atuais, cujos efeitos negativos destroem a habilidade de todas as nações de atingirem o desenvolvimento sustentável (ONU, 2020).

O ODS 7 visa dobrar a incidência global de melhoria da eficiência energética, facilitar a cooperação internacional para o acesso à pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis (ONU, 2020), e desta forma contribuir para a redução do aquecimento global.

A mitigação dos gases causadores do efeito estufa e o desenvolvimento de energia renovável estão diretamente relacionados. Por isso, um dos problemas mais desafiadores para a sobrevivência da humanidade está no fato de encontrar fontes de energia limpa e renovável. Muitas nações estão tentando reduzir o lançamento de CO<sub>2</sub> na atmosfera no sentido de atingir as metas de sustentabilidade, com diferentes graus de sucesso e fases de implantação. As tecnologias na área de energia solar, fotovoltaica, eólica, biocombustíveis estão sendo implementadas com um só objetivo, que é a redução das emissões de gases poluentes, pela substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis e sustentáveis (PATEL et al., 2017).

Neste cenário, os biocombustíveis têm ocupado um lugar de destaque. O biogás é um gás inflamável e incolor, derivado de desintegração de diversos tipos de matérias-primas carbonáceas (WALL; MCDONAGH; MURPHY, 2017; SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018). O biogás tem origem na decomposição anaeróbia da matéria orgânica (KARLSSON et al., 2014). As fontes de biogás estão relacionadas às atividades humanas, como aterros sanitários, compostagem comercial de resíduos e digestão anaeróbica de lodo de esgoto, de resíduos municipais, industriais e agrícolas (ZHOU; CHAEMCHUEN; VERPOORT, 2017).

Dentre as opções de utilização do biogás, as principais que se destacam incluem geração de energia, inserção em gasodutos de gás natural e conversão em combustível veicular. Ao ser utilizado como combustível veicular, possui a grande vantagem de produzir baixas emissões de GEE (YANG et al., 2014; ABDEEN et al., 2016).

A fonte de energia renovável verde é uma promissora opção para superar com a instabilidade energética, reduzir o lançamento de GEE e alcançar a sustentabilidade na produção de energia. As microalgas possuem a capacidade de absorver o dióxido de carbono, com uma taxa de sequestro de 10 a 50 vezes, aproximadamente, maiores do que as plantas terrestres (ZHU et al., 2017). Além disso, a biomassa gerada pelas microalgas, após a absorção de CO<sub>2</sub>, tem enorme potencial para ser usada como matéria-prima para diferentes tipos de biocombustíveis, incluindo biodiesel, bioetanol e biogás (MAROUŠEK et al., 2020; TAKABE et al., 2017).

A produção de biogás a partir de biomassa microalgácea é uma técnica que confere diversas vantagens sobre outras formas de produção de biocombustíveis, como alternativa de cultivo usando águas residuais como fonte de nutrientes, e água do mar; utilização total da biomassa e consequente produção mínima de lodo; menores custos operacionais; baixo consumo de energia elétrica; e produção sustentável de biogás (ADARME et al., 2017; CARRILLO-REYES et al., 2021; SARATALE et al., 2018; XIAO et al., 2020).

O biogás é composto principalmente de metano (CH<sub>4</sub>), CO<sub>2</sub> e ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S). Esses gases, com exceção ao metano, são indesejados porque diminuem o valor calorífico do biogás, provocam corrosão nas estruturas de armazenamento ou de utilização, além de serem considerados poluentes ambientais, pelas emissões indesejadas na atmosfera (ANGELIDAKI et al., 2018a; BOSE et al., 2019).

Para que o biogás possa ser usado com eficiência e segurança, os gases poluentes precisam ser removidos. Os métodos convencionais de purificação de biogás normalmente se concentram na remoção de CO<sub>2</sub> em razão de sua alta ocorrência no biogás bruto. No entanto, mesmo em quantidades reduzidas, o H<sub>2</sub>S contido no biogás bruto, por se tratar de um gás corrosivo e tóxico, também deve ser tratado antes de aplicação final do biogás (DAS; RAVISHANKAR; LENS, 2022; NOORAIN et al., 2019).

Os processos físico-químicos usados para purificação do biogás apresentam uma eficiência de concentração de metano maior que 96%. No entanto, têm limitações devido ao alto consumo de água, elevado custo em energia (KADAM; PANWAR, 2017; NOORAIN et al., 2019) e necessidade de remoção de H<sub>2</sub>S antes dos processos (KAPOOR et al., 2019; NOORAIN et al., 2019). A purificação por lavagem com água é a técnica mais utilizada em todo o mundo, participando de 41% do mercado; seguida pela purificação química (22%),

adsorção por oscilação de pressão (21%) e por separação por membrana (10%) (DAS; RAVISHANKAR; LENS, 2022; MAURYA et al., 2019).

A aplicação de métodos biológicos tem se tornado uma alternativa atraente para o desenvolvimento sustentável na purificação do biogás. Suas principais vantagens são a facilidade e simplicidade de operação, baixo custo e preservação do meio ambiente (ANGELIDAKI et al., 2019; RYBARCZYK et al., 2019; WANG et al., 2019). Os principais métodos biológicos incluem a bioconversão de  $\text{CO}_2$  a base de  $\text{H}_2$ , processo de fermentação de gás acetogênico, processo eletroquímico microbiano e biofixação fotossintética de  $\text{CO}_2$  à base de microalgas (DAS; RAVISHANKAR; LENS, 2022).

No processo de purificação fotossintética de biogás em sistemas de microalgas, os microrganismos fotoautotróficos, como por exemplo, cianobactérias procarióticas e microalgas eucarióticas, podem capturar o  $\text{CO}_2$  contido no biogás e produzir biomassa, utilizando a luz solar como fonte de energia (ANGELIDAKI et al., 2018b; TOLEDO-CERVANTES et al., 2017; VUPPALADADIYAM et al., 2018; WU et al., 2021). O  $\text{H}_2\text{S}$  do biogás pode ser retirado de forma biológica pela coexistência de bactérias oxidantes de enxofre nos fotobiorreatores. O  $\text{O}_2$  liberado na fotossíntese para o meio de cultivo pode ser usado pelas bactérias oxidantes de enxofre para a oxidação de  $\text{H}_2\text{S}$  em sulfatos (RODERO et al., 2020).

Entre os fatores que mais oneram a produção de microalgas está a adição de dióxido de carbono às culturas. Portanto, com a utilização do  $\text{CO}_2$  produzido por diferentes processos, inclusive pela purificação do biogás, pode-se reduzir consideravelmente os custos operacionais de cultivo de microalgas. O  $\text{CO}_2$  contido no biogás bruto possui excelente potencial para utilização no cultivo de microalgas. A biomassa microalgácea resultante pode ser utilizada no processo de digestão anaeróbia para geração de biogás, fechando o ciclo, favorecendo a sustentabilidade energética.

## 1.2 Tema

O tema deste estudo está focado na geração e purificação de biogás utilizando microalgas, de forma a alcançar a sustentabilidade na produção de energia renovável.

A substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis, contribui com a redução das emissões de  $\text{CO}_2$  na atmosfera. Os biocombustíveis são renováveis e designados como

fontes de energia verde, devido à sua emissão líquida zero de CO<sub>2</sub> (RAZZAK et al., 2013). O biogás é considerado um dos biocombustíveis mais promissores, com potencial para atenuar às crescentes preocupações com combustíveis não renováveis. O biogás pode ser usado para geração de calor ou eletricidade, liquefação em metanol, compressão em combustível de carro e gás para preparo de alimentos (ZABED et al., 2019).

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de geração e de purificação de biogás utilizando microalgas, como alternativa biotecnológica na obtenção de energia renovável, limpa e sustentável.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Pesquisar o panorama atual da produção científica sobre os aspectos relacionados ao cultivo de microalgas, seu potencial de remoção de poluentes de efluentes, os métodos de cultura e os principais desafios e lacunas de conhecimento existentes;
- Projetar e construir protótipo de purificador em escala piloto, do tipo tanque interligado à coluna de absorção;
- Avaliar o potencial de purificação biológica de biogás por processo fotossintético de microalgas em escala piloto;
- Analisar a capacidade de geração de biogás e metano utilizando a biomassa de microalgas como substrato.

### **1.4 Estrutura da Tese**

A presente tese foi apresentada sob a forma alternativa para trabalho de conclusão de curso, composta por artigos científicos, de acordo com o Regimento do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento - PPGAD, aprovado pela Resolução nº 070/Consun/Univates, de 31 de agosto de 2018, especificamente no inciso II do artigo 31. De

acordo com a resolução, a estruturada alternativa do trabalho pode ser composta por título, resumo e abstract, apresentação, dois artigos aceitos ou publicados, discussões gerais, conclusões e referências (UNIVATES, 2018).

A tese, quando estruturada em artigos científicos verticais ou sequenciais, permite que cada artigo atenda a um dos objetivos específicos da tese, e que todos juntos, atendam ao objetivo geral (FRANK, 2013). Esse trabalho foi desenvolvido utilizando esse modelo, cuja estrutura está representada no Quadro 1.

Quadro 1 - Estrutura da Tese

Objetivos Específicos	Estrutura Tese	Artigos	Periódicos(Qualis)	Situação
Pesquisar o panorama atual da produção científica sobre os aspectos relacionados ao cultivo de microalgas, seu potencial de remoção de poluentes de efluentes, os métodos de cultura e os principais desafios e lacunas de conhecimento existentes.	Artigo 1	Cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais: revisão de literatura	Revista GEAMA-Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology (B1)	Publicado
	Artigo 2	Panorama global da produção científica sobre microalgas no tratamento de águas residuais	Revista Valore (A3)	Publicado
Projetar e construir um protótipo de purificador em escala piloto, do tipo tanque interligado à coluna de absorção.	Artigo 3	Dessulfurização de biogás por processo fotossintético com microalgas e absorção por lavagem com água	Research, Society and Development (A3)	Publicado
Avaliar o potencial de purificação de biogás por processo fotossintético de microalgas em escala piloto.	Artigo 4	Purificação de biogás em fotobiorreator de microalgas conectado à coluna de absorção	Research, Society and Development (A3)	Publicado
Analisar o potencial de geração de biogás e metano a partir de biomassa de microalgas.	Artigo 5	Evaluation of Biogas and Methane Production from Microalgae	BioEnergy Research (A1)	Em avaliação
<b>Objetivo Geral: Avaliar o potencial de geração e de purificação biológica de biogás utilizando microalgas.</b>				

A tese foi organizada em 5 capítulos, conforme descrito a seguir.

O Capítulo 1, referente à Apresentação, explana a introdução, o tema da pesquisa, o objetivo geral, os objetivos específicos e a estrutura da tese.

O Capítulo 2, Desenvolvimento da Tese, discute o tema da pesquisa no âmbito do desenvolvimento de prática ambientalmente sustentáveis, relacionado aos objetivos da Agenda 2030 da ONU, de forma a fazer uma conexão dos artigos com as metas propostas nos ODS.

O Capítulo 3, concernente à Apresentação dos artigos, elenca os cinco artigos científicos que foram desenvolvidos ao longo da pesquisa, que representam um conjunto de resultados necessários para atender ao objetivo principal do estudo. Os referidos artigos foram publicados ou submetidos em periódicos, de acordo com as determinações do PPGAD.

O Capítulo 4, Discussão geral, aborda os principais resultados obtidos em cada artigo, de forma a relacioná-los com os objetivos específicos e ao final, como objetivo geral deste trabalho. Além disso, este capítulo traz uma discussão sobre energias renováveis, biogás de microalgas e purificação biológica de biogás, de forma a complementar o entendimento do tema especificado neste trabalho.

Por fim, o Capítulo 5, alusivo a Conclusão, discorre sobre as conclusões finais, ressaltando os resultados obtidos nos artigos desenvolvidos e as sugestões para pesquisas futuras.

## 2 DESENVOLVIMENTO DA TESE

Segundo Diamond (2007), algumas sociedades do passado chegaram ao colapso por terem destruído inadvertidamente os recursos ambientais dos quais dependiam. Tal colapso tende a seguir cursos similares, cujas causas envolvem os mesmos temas, sendo eles, a explosão demográfica, a governança da água, a intensa produção agrícola, as mudanças climáticas, o acúmulo de produtos tóxicos no ambiente, a carência energética e a utilização total da capacidade fotossintética do planeta. Ainda de acordo com o autor, esse panorama se tornará crítico em âmbito mundial nas próximas décadas, caso não haja uma mudança na forma como a humanidade se relaciona com o planeta.

Um dos desafios mais urgentes enfrentados pela política energética está relacionado à mudança climática, que apresenta riscos cada vez maiores para os seres humanos e sistemas naturais, em virtude de sua magnitude e o ritmo dos impactos gerados. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, a ação humana sobre o clima é evidente, onde as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa são as maiores da história (JORDAAN et al., 2017).

A energia e a mobilidade impulsionam o crescimento da economia mundial e o desenvolvimento humano. Porém, a atual necessidade de combustíveis fósseis para o transporte tornou-se insustentável sob a ótica econômica e ambiental. Isso em razão das constantes instabilidades do mercado de petróleo e à crescente emissão de gases do efeito estufa na atmosfera (PINTO et al., 2022). Assim, é importante que, com o aumento da demanda, a energia seja proveniente de fontes não poluentes, de forma a atender as necessidades da economia e

proteger o meio ambiente, sendo esse um dos maiores desafios do desenvolvimento sustentável, descrito na Agenda 2030.

Desta forma, os problemas ambientais decorrentes das atividades humanas estão impulsionando a sociedade a refletir sobre seus hábitos de produção e consumo, de forma a proteger os recursos ambientais (PINTO et al., 2022). Nas últimas décadas, cada vez mais as empresas, os cientistas e os produtores de políticas buscam soluções para desenvolvimento de práticas sustentáveis (SADHUKHAN et al., 2020). Essa postura foi estimulada devido aos compromissos globais referentes à redução de emissões de gases do efeito estufa, à carência dos recursos naturais e à gestão de resíduos (DANTAS et al., 2021; NERINI et al., 2019).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável são um conjunto de metas globais interligadas, estabelecidas na Agenda 2030 pela Assembleia Geral das Nações Unidas (ONU, 2020). O formato que essas metas foram apresentadas inovou a visão sobre o desenvolvimento, onde os setores sociais, econômicos e ecológicos não são mais vistos como elementos isolados. A atual abordagem determina a transformação para uma economia que, ao mesmo tempo, atenda à sociedade, preservando o meio ambiente (DANTAS et al., 2021; MODGIL; GUPTA; BHUSHAN, 2020).

Assim, o desenvolvimento sustentável definido nos ODS passa a ser uma meta compartilhada a todos os países, onde o avanço de tecnologias inovadoras, as alterações nos comportamentos e transformações sistematizadas referentes à maneira de produção e de consumo, são indispensáveis para atingir tais objetivos.

Com a adesão aos ODS, a questão das mudanças climáticas deve ser vista no contexto do desenvolvimento sustentável, de forma a não comprometer as metas de desenvolvimento sociais e econômicas, pois todas são consideradas como interconectadas e indivisíveis (BOS; GUPTA, 2019). Os 17 ODS configuram-se como um planejamento interligado para oportunizar ações e soluções sustentáveis que abarcam os principais obstáculos enfrentados pela sociedade (DANTAS et al., 2021).

O setor de energia precisa de atenção especial, pois é responsável por mais de 65% das emissões mundiais de gases de efeito estufa (MOREIRA et al., 2022). A substituição energética para as energias renováveis é a base para um modelo de bioeconomia, onde a obtenção do crescimento econômico, utilizando recursos renováveis na geração de produtos e energia,

objetiva impulsionar o progresso em direção a uma economia circular e de baixo carbono (CARBONELL et al., 2021; CARUS; DAMMER, 2018).

Nesse contexto, uma prática sustentável de economia circular seria o aproveitamento de biomassa e de resíduos para gerar energia, combustível e outros produtos de valor. Além disso, a abordagem sustentável propicia outros benefícios, como a diminuição substancial dos danos para a saúde humana e da poluição ambiental, substituindo as práticas tradicionais, como os aterros sanitários ou incineração, que são fontes de gases tóxicos (DAS; RAVISHANKAR; LENS, 2022).

Então, existe muito espaço para desenvolvimento de projetos nesse setor, onde o futuro é a busca por caminhos para promover a sustentabilidade (MOREIRA et al., 2022). Assim, cumprir os objetivos da Agenda 2030 requer transformar as reservas de combustíveis fósseis em recursos inativos (BOS; GUPTA, 2019), e seguir rumo a implementação de tecnologias que visem a utilização de energias limpas.

Nesse cenário, essa pesquisa trouxe uma importante contribuição para o alcance das metas propostas pelo ODS, de forma a alcançar a sustentabilidade na produção de energia renovável, com o tema focado na geração e purificação de biogás utilizando microalgas. Os artigos foram desenvolvidos alinhados à produção de energia sustentável, confiável, limpa e acessível.

O primeiro e o segundo artigo trouxeram informações relevantes quanto à meta 7.a. Essa meta busca reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa.

O terceiro, o quarto e o quinto artigo conectaram-se à meta 7.2, que pretende, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global. Além da meta 7.b, que visa expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos os países em desenvolvimento. Assim, essa pesquisa destaca a relevância no atendimento das metas referentes à transição energética, saindo das fontes poluidoras e não renováveis.

Além da meta 7, a presente pesquisa mantém conexões com outros ODS, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Conexões do tema de estudo com os ODS



A Figura 1 mostra o esquema que relaciona o tema do trabalho com os principais ODS correspondentes:

- ODS 1 (Erradicação da pobreza) e ODS 8 (Trabalho digno e crescimento econômico): a implantação de plantas de biogás promove o desenvolvimento socioeconômico, contribuindo para o fortalecimento da economia local, com a geração de renda e a criação de novos empregos;
- ODS 6 (Água potável e saneamento): o biogás é gerado a partir de resíduos sólidos, que é considerado um dos maiores problemas enfrentados pelos municípios em virtude do seu crescente volume, e, por isso, promove a redução dos impactos negativos ao meio ambiente e à saúde, favorecendo a gestão sustentável dos resíduos sólidos. Além disso, a digestão anaeróbia, utilizada para a geração de biogás, é a principal rota para tratamento de efluentes, o que contribui para diminuir a poluição dos corpos receptores;

- ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura): o desenvolvimento de tecnologias de produção e purificação de biogás por processo fotossintético apresenta o potencial de promoção de um modelo de indústria inovadora e sustentável;
- ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e ODS 12 (Consumo e produção responsáveis): o uso de energias renováveis, como o biogás, apresenta-se como uma solução limpa e sustentável para as cidades, pela redução das concentrações de gases poluentes na atmosfera e pela preservação dos recursos naturais;
- ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima): o biogás é uma fonte de energia renovável, e desta forma, contribui para a diminuição da poluição ambiental, da emissão de gases do efeito estufa, combatendo as mudanças climáticas e seus efeitos negativos.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, os resultados foram apresentados no formato de artigos científicos. O Artigo 1, intitulado “*Cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais: revisão de literatura*” (CASTRO et al., 2020) fez uma análise sobre o atual campo de pesquisa científica relacionado à biotecnologia de microalgas cultivadas em águas residuais, abordando conceitos como métodos de cultivo e de colheita e o potencial da remoção de poluentes presentes em águas residuais.

O Artigo 2, “*Panorama global da produção científica sobre microalgas no tratamento de águas residuais*” (CASTRO; KONRAD, 2020), avaliou a produção científica global, mostrando o status atual das tendências das pesquisas no meio científico microalgas, com foco principalmente na produção de biomassa, métodos de cultivo e desenvolvimento de biocombustíveis, sugerindo o desenvolvimento de novos estudos.

A fase experimental da pesquisa para avaliação do potencial de purificação do biogás em protótipo de fotobiorreator em escala piloto, foi apresentada no Artigo 3 e 4.

O Artigo 3, intitulado “*Dessulfurização de biogás por processo fotossintético com microalgas e absorção por lavagem com água*” (CASTRO et al., 2022a), analisou a capacidade de dessulfurização do biogás, por meio dos processos fotossintético com microalgas e de absorção por lavagem com água à pressão atmosférica.

O Artigo 4, “*Purificação de biogás em fotobiorreator de microalgas conectado à coluna de absorção*” (CASTRO et al., 2022b), avaliou o potencial de purificação do biogás por

processo fotossintético utilizando microalgas, quanto à remoção de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e a concentração de CH<sub>4</sub>.

O Artigo 5, intitulado “*Evaluation of Biogas and Methane Production from Microalgae*” (CASTRO et al., 2022c), estudou o potencial da produção de biogás e de metano via digestão anaeróbia, a partir de biomassa da microalga *Euglena sanguinea*, de acordo com as premissas da norma alemã VDI 4630 (2006), em escala laboratorial e em condições mesofílicas.

### 3 APRESENTAÇÃO DOS ARTIGOS

#### 3.1 Artigo 1: Cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais: revisão de literatura<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Artigo publicado na Revista GEAMA, Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology, 6 (2): 60-71, Agosto, 2020, Online version ISSN: 2447-0740. A revista possui *Qualis* B1 na avaliação 2017-2019. Autores: Castro, A. C.; Konrad, O.; Marder, M.; Guerini Filho, M.



## Cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais: revisão de literatura *Cultivation of microalgae for wastewater treatment: literature review*

Aline Antonia Castro<sup>1</sup>, Odorico Konrad<sup>1</sup>, Munique Marder<sup>1</sup>, Marildo Guerini Filho<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Vale do Taquari, Lajedo, Rio Grande do Sul, Brasil.

Contato: [alineantoniacaastro@yahoo.com.br](mailto:alineantoniacaastro@yahoo.com.br)

### Palavras-Chave

águas residuais  
microalgas  
tratamento

### RESUMO

O cultivo de microalgas em efluentes é considerado uma ferramenta eficaz, por ser natural e de baixo custo, para assimilação de nutrientes e outros compostos contaminantes do meio, como metais pesados e fármacos, podendo assim ser utilizado como alternativa para o tratamento terciário. Este artigo teve como objetivo apresentar o panorama atual da produção científica sobre o cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais, por meio de revisão da literatura. A base de dados usada foi o ScienceDirect. A busca foi realizada no período de julho a setembro de 2019, na presença de termos de pesquisa em palavras-chave de artigos científicos. Foram identificados 623 artigos, dos quais 84 atendiam aos critérios de exclusão e inclusão estabelecidos. Os resultados revelaram que as culturas de microalgas em efluentes mostram-se eficientes na remoção ou diminuição de nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo, promovendo redução da DBO, na inibição de coliformes fecais e na remoção de metais pesados. Um grande desafio apontado na produção de microalgas está relacionado com os processos de colheitas. Ainda existem aspectos técnicos que precisam ser desenvolvidos, como o aprimoramento dos métodos de colheita e secagem das microalgas para aproveitamento da biomassa de forma eficiente e rentável. O investimento em pesquisas para a solução desses desafios aumentará a potencialidade do cultivo de microalgas em sistemas de tratamento de águas residuais.

### Key-word

waste water  
microalgae  
treatment

### ABSTRACT

*The cultivation of microalgae in effluents is considered an effective tool, since it is natural and of low cost, for assimilation of nutrients and other contaminating compounds in the environment, such as heavy metals and drugs, and can thus be used as an alternative for tertiary treatment. This article aimed to present the current panorama of scientific production on the cultivation of microalgae for wastewater treatment, through a literature review. The database used was ScienceDirect. The search was carried out from July to September 2019, in the presence of search terms in keywords of research and review articles. 623 articles were identified, of which 84 met the established exclusion and inclusion criteria. The results revealed that the microalgae cultures in effluents are efficient in the removal or reduction of nutrients, such as nitrogen and phosphorus, promoting a reduction in BOD, in the inhibition of fecal coliforms and in the removal of heavy metals. A major challenge pointed out in the production of microalgae is related to the harvesting processes. There are still technical aspects that need to be developed, such as improving the methods of harvesting and drying microalgae to use biomass efficiently and profitably. Investing in research to solve these challenges will increase the potential of microalgae cultivation in wastewater treatment systems.*

### Informações do artigo

Recebido: 09 de abril, 2020

Aceito: 19 de agosto, 2020

Publicado: 29 de agosto, 2020

## Introdução

Frente ao avanço do crescimento global, surgem preocupações relacionadas com a indisponibilidade de recursos naturais para suprir as emergentes necessidades das sociedades (KUMAR et al., 2018).

A escassez de água é uma realidade em quase todos os países do mundo, mesmo aqueles que possuem um bom potencial hídrico, acabam enfrentando o problema devido à poluição dos mananciais, em virtude do lançamento inadequado e excessivo de águas residuais em corpos hídricos, reduzindo a sua qualidade e danificando os ecossistemas aquáticos (ABDEL-RAOUF; AL-HOMAIDAN; IBRAHEEM, 2012). Rajasulochana e Preethy (2016) relataram que uma das principais causas de mortalidade humana em todo o mundo está relacionada com as doenças infecciosas transmitidas pela água imprópria.

Diante da preocupação com a preservação do meio ambiente e com a saúde pública, surgiram os sistemas de tratamento de água residuárias. Os processos convencionais estão presentes desde os tempos mais antigos, porém, verifica-se que eles são ineficientes ou caros quando se trata de remoção de nitrogênio (N), fósforo (P), metais tóxicos, metais pesados (RAJASULOCHANA e PREETHY, 2016; LAM et al., 2018), e estes elementos acabam sendo lançados nos corpos receptores, cuja capacidade de autodepuração é inferior ao volume depositado (VAN DEN HEND et al., 2011; KUMAR et al., 2018). Assim, estes efluentes, antes do lançamento, necessitam de um tratamento complementar, como, por exemplo, a microfiltração por membrana, adsorção, etc. Estes processos são denominados de tratamento terciário e elevam o custo das instalações, muitas vezes inviabilizando a sua implantação (WALLS et al., 2019).

O cultivo de microalgas em efluentes é considerado uma ferramenta eficaz, por ser natural e de baixo custo, para assimilação de nutrientes e outros compostos contaminantes do meio, como metais pesados e fármacos, podendo assim ser utilizado como alternativa viável para o tratamento terciário (SINGH; PAVANKUMAR; LAKSHMANAN, 2012; TIWARI et al., 2017; RUAN et al., 2019). O potencial de assimilação dá-se por meio do processo de fotossíntese realizado pelas microalgas, que necessitam de compostos presentes nas águas residuais para o seu crescimento (HENKANATTE-GEDERA et al., 2015; RAJASULOCHANA e PREETHY, 2016).

Para Lam et al. (2018), o cultivo de microalgas em águas residuárias tem-se destacado muito no meio científico porque apresenta elevada eficácia na remoção de nutrientes e produção de biomassa para geração de biocombustíveis de terceira geração. As microalgas possuem um elevado potencial para substituir o uso de combustíveis fósseis e, ao mesmo tempo, mitigar o efeito estufa, pela sua capacidade fotossintética de absorver o gás carbônico presente no ar (ZHOU et al., 2012; LAM e LEE, 2012; CHEAH et al., 2018).

Neste contexto, a cultura de microalgas em efluentes vem sendo apontada como uma das formas mais promissoras para o tratamento de efluentes, e geração de produtos, como a produção de biomassa para

biocombustíveis, aliando os aspectos técnicos, econômicos e ambientais (PITTMAN; DEAN; OSUNDEKO, 2011; ZHOU et al., 2014; ROGERS et al., 2014; ROOSTAEI e ZHANG, 2017 HAN et al., 2019).

Este artigo teve como objetivo apresentar o panorama atual da produção científica sobre o cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais. Por meio de revisão da literatura, foram abordados temas como o potencial de remoção de poluentes, bem como os métodos de cultivo e colheita, e ainda, os principais desafios e lacunas de conhecimento existentes, para orientação de investigações científicas futuras.

## Material e Métodos

Uma revisão da literatura foi realizada por meio de busca eletrônica de artigos científicos, no do Portal Capes/MEC, usando o acesso através da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe). A base de dados usada foi o ScienceDirect ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)), na presença de termos de pesquisa em palavras-chave de artigos.

A busca foi realizada no período de julho a setembro de 2019, utilizando como estratégia o operador booleano AND, com a finalidade de aumentar a qualidade dos resultados. Os termos usados para a pesquisa foram “microalgas AND sewage treatment”, resultando em 623 artigos recuperados até o ano de 2019.

Como critérios de inclusão foram considerados o período das publicações de 10 anos (2009 a 2019) e a modalidade de estudos compreendendo artigos de pesquisas e artigos de revisão, resultando em 493 artigos recuperados.

Como critério de exclusão, por meio da leitura do resumo, foi realizada uma triagem para seleção de artigos que abordavam exclusivamente tratamento de efluentes pelo cultivo de microalgas, excluindo aqueles trabalhos que falavam da cultura de microalgas com fins exclusivos para produção de biocombustíveis, resultando então em 84 artigos selecionados.

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foi realizada uma leitura integral em todos os documentos selecionados, levantando-se os aspectos relevantes sobre a utilização de culturas de microalgas para tratamento de águas residuárias, bem como os principais resultados revelados nas pesquisas científicas, dentro do universo pesquisado e das restrições devido à própria base de dados, destacando as vantagens, as limitações quanto aos aspectos técnicos e de custo, os processos de produção e ainda as lacunas existentes no meio acadêmico sobre a temática.

## Resultados e Discussões

### Microalgas

A produção de microalgas atraiu o interesse comercial devido ao seu potencial de ser uma matéria-prima de biocombustível ecologicamente correta, possuindo diversas vantagens em comparação com outras fontes: não competem com outras culturas por terras

produtivas e água doce; podem crescer rapidamente e obter elevado teor de lipídeos (cerca de 20 a 50% em peso seco); possuem a capacidade de fixar dióxido de carbono, reduzindo assim as emissões de gases de efeito estufa e melhorando a qualidade do ar; podem ser usadas como fonte de proteína em ração animal; e podem ser usadas como fertilizante para a agricultura (RUIZ-MARIN; MENDOZA -ESPINOSA; STEPHENSON, 2010; CAI; PARK; LI, 2013).

Para Kumar et al. (2015) e Zhou et al. (2019), o cultivo de microalgas em efluentes residuais apresenta muitos benefícios, dentre os quais pode-se citar a redução de custos extras com remoção de nutrientes e, no caso de produção de biocombustíveis, redução de custos relacionados ao fornecimento de água e nutrientes para o crescimento das culturas microalgais. Segundo Christenson e Sim (2011), os custos da remoção de fósforo em águas residuais por microalgas foram estimados em US \$ 24/ kgP<sub>removido</sub>, na Flórida. Já os custos de remoção de fósforo pelo processo de precipitação química convencional, foram estimados em aproximadamente US \$ 105 por kg de fósforo removido. No caso de remoção por meio de precipitação utilizando o alumínio, o custo foi estimado em US \$ 87 por kg de fósforo removido.

Ashok et al. (2019) comprovaram a eficiência de remoção de nutrientes de águas residuárias domésticas tratadas secundariamente em fotobiorreatores de microalgas *Chorella vulgaris* e *Chlamydomonas reinhardtii* em diferentes intensidades físico-químicas e de luz. Delanka-Pedige et al. (2019) confirmaram a redução de patógenos com o tratamento de águas residuárias com a microalga *Galdieria sulfuraria*. Os resultados da análise apontaram uma redução de 98% do total de bactérias e remoção completa de *Enterococcus faecalis* e *Escherichia coli*.

Vários estudos verificaram a capacidade de remoção de nutrientes por microalgas em efluentes (ANSARI et al, 2019; LING et al., 2019; HAN et al., 2014; TANG et al., 2018b; NOVOVESKÀ et al., 2016). Três microalgas, *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus obliquus*, foram as espécies que mais se destacaram. Resultados apontaram uma eficiência na remoção de nitrogênio e fósforo, respectivamente, de: 98,54% e 97,99% para a *S. obliquus*; 86,93% e 68,24% para a *Chlorella sorokiniana* (GUPTA et al., 2016); e 89,1% e 80,9% para a *Chlorella vulgaris* (LIE et al., 2011).

## Métodos de cultivo de microalgas

Segundo Wayne et al. (2018), o êxito no cultivo e produtividade de microalgas, em larga escala e em efluentes sanitários, para produção de biocombustíveis, deve-se a uma variedade de fatores, como taxa de crescimento rápido, tolerância à salinidade, boa capacidade de sedimentação, boas propriedades estruturais, como a resistência ao cisalhamento, além de apresentar características como a elevada concentração de óleos e ácidos graxos saturados.

A seguir estão apresentadas as modalidades aplicadas ao processo de produção de microalgas.

### a) Quanto ao sistema de cultura

Quanto ao sistema de cultura, as microalgas podem ser produzidas em culturas suspensas ou culturas imobilizadas. As do tipo suspensas são aquelas formadas por culturas mistas de microalgas que se desenvolvem de forma natural, que ficam em suspensão no meio. A maioria dos processos de produção de microalgas para fins de biocombustíveis utiliza este método (POURKARIM et al., 2019). As culturas suspensas podem desenvolver-se em lagoas abertas ou reatores fechados, denominados de fotobiorreatores.

Galès et al. (2019), estudaram o cultivo de microalgas em condições ao ar livre usando efluentes de águas residuais municipais, em lagoa de alta concentração de algas. Os resultados mostraram que a clarificação da água através do consumo de matéria orgânica por bactérias heterotróficas, nematoides, amebózoos, presentes nos efluentes residuais é um pré-requisito para o rápido crescimento das microalgas. As microalgas em conjunto com as bactérias participaram do esgotamento completo da amônia. A competição resultante pelo amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) aumentaria o nível de eficiência de remoção de carbono orgânico dissolvido (COD) por bactérias e fosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) por microalgas.

O cultivo de microalgas em suspensão tem sido muito utilizado no tratamento de águas residuais. Porém, existe a necessidade de separação da biomassa, que contribui para a DBO do meio em um percentual de 60 a 90%. A colheita neste tipo de cultivo é considerada como um processo demorado e oneroso devido aos gastos com energia (ZHUANG et al., 2018). Uma alternativa promissora para superar esta situação, são os sistemas de culturas imobilizadas de microalgas (GONÇALVES; PIRES; SIMÕES, 2017; KARAGOZ; BILL; OZKAN, 2019).

As culturas imobilizadas são aquelas onde as microalgas são impedidas de se moverem para todos os lados dentro do sistema, aplicando-se técnicas naturais ou artificiais. Os processos usualmente utilizados são a imobilização por matriz ou imobilização por biofilme de algas. Na imobilização por matriz, as microalgas são confinadas dentro da matriz, normalmente o alginato ou a carragenina, onde ocorre o crescimento das células microalgais através dos poros presentes na matriz (PETER; SCHNURRD; GRANT, 2015).

Os biofilmes de microalgas são estruturas formadas pelo ajuntamento de micro-organismos interligados, principalmente algas, cianobactérias e bactérias heterotróficas, vivendo em simbiose, cujo crescimento dá-se na presença de um substrato sólido (TING et al., 2017; MORENO OSORIO et al., 2019).

Para Tran et al. (2015), os processos que utilizam células imobilizadas são capazes de redução de custos quanto ao cultivo, pois exigem menores volumes de reação, aumentando a produtividade no reator, facilitando a separação da biomassa no meio e as operações de cultivo por um período maior.

Suparmaniam et al. (2019) relatam como vantagens para sistema de microalgas imobilizadas em matriz: remoção eficiente de nutrientes em aplicações de águas residuais; maior produção de hidrocarbonetos, além de aumento do pigmento celular, conteúdo lipídico e

variedade lipídica; e como limitação, relataram o alto custo da matriz de imobilização e projetos ainda em escala laboratorial.

Sukacová; Trtílek; Rataj (2015) estudaram um biofilme de microalgas durante diferentes intensidades de luz, em um fotobiorreator, nove meses por ano, por dois anos, sem interrupção e inoculação. O objetivo do estudo foi avaliar a capacidade de remoção de fósforo. O biofilme de algas foi capaz de remover  $97 \pm 1\%$  do fósforo total das águas residuais durante 24 horas de iluminação artificial contínua.

#### b) Quanto ao modo de crescimento

Quanto ao modo de crescimento, as microalgas podem assumir diferentes tipos de metabolismos e são capazes de uma mudança metabólica como resposta a alterações nas condições ambientais. As principais formas de crescimento são o fotoautotrófico, heterotrófico, mixotrófico e o foto-heterotrófico (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; ZHAN; RONG; WANG, 2017).

No crescimento fotoautotrófico, as culturas utilizam a luz como a única fonte de energia, que é convertida em energia química através de reações fotossintéticas (CESÁRIO et al., 2018). No cultivo heterotrófico, as microalgas utilizam apenas compostos orgânicos como fonte de carbono e energia. No modo mixotrófico, tem-se a fotossíntese como principal fonte de energia, porém os compostos orgânicos e  $\text{CO}_2$  são essenciais para o crescimento. Por fim, no modo foto-heterotrófico, a luz é necessária para usar compostos orgânicos como fonte de carbono (CHEN; ZHAO; QI, 2015; SUPARMANIAM et al., 2019).

Kumar et al. (2018) estudaram o cultivo da *Chlorella vulgaris* utilizando esgoto e gás de combustão. Os resultados mostraram que os nutrientes e poluentes foram removidos até 80%, e que a densidade celular no cultivo em batelada mixotrófica foi maior do que no modo fotoautotrófico. Henkanatte-Gedera et al. (2015) apresentaram resultados que confirmam que o sistema mixotrófico pode reduzir os custos de energia associados ao suprimento de oxigênio nos atuais sistemas de tratamento, e tem o potencial de gerar biomassa com composição mais adequada para a produção de bioenergia.

#### c) Quanto ao regime de cultura

Os tipos de regimes de crescimento mais utilizados em culturas de microalgas são os cultivos em batelada e o contínuo. No cultivo em batelada, no início do processo de crescimento das microalgas, os nutrientes são depositados no ambiente, e não ocorrem adições posteriores ao cultivo. Neste regime, as microalgas permanecem no meio até o final do processo, até que haja o esgotamento dos nutrientes (GEADA et al., 2017).

No regime contínuo de crescimento, é necessário que se faça a substituição contínua do meio de cultura ao biorreator, igualando à vazão de retirada com a de adição, de forma que o volume se mantenha constante. Nesse tipo de cultivo, as microalgas teoricamente permanecem no estado exponencial de crescimento, se bem operado.

No modo de regime contínuo, a produtividade é de 2,3 a 5 vezes maior que no regime de batelada.

Porém, devido a fatores técnicos e econômicos, o regime em batelada ainda é o mais usado para produção de microalgas em larga escala (WAYNE et al., 2018).

#### d) Quanto ao método de cultivo

Com relação ao método de cultivo, as microalgas são normalmente cultivadas em sistemas abertos, fechados, escuros e offshore (CHENG et al., 2013; LIU et al., 2013).

As lagoas abertas são o tipo de produção em larga escala mais comumente utilizado na prática. As lagoas de pistas possuem uma roda de pás para permitir a circulação das microalgas e nutrientes em diferentes profundidades. Sua principal vantagem é o baixo custo e a facilidade de construção e operação. Como desvantagens, podem apresentar baixa produtividade devido à mistura ineficiente, zonas escuras, deficiência na assimilação de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), além de contaminação por outras espécies de microalgas ou bactérias (FARIED et al., 2017).

Os principais benefícios dos sistemas abertos são o baixo investimento, baixa necessidade de energia para a mistura, e uso de energia solar (BALDEV et al., 2018). Segundo Lam et al. (2018), os principais problemas relacionados aos sistemas abertos, é a falta de controle da temperatura, baixa produtividade de biomassa, necessidade de grandes áreas para implantação e a competição das microalgas com outras espécies ou parasitas. Em sistemas abertos, existem basicamente três tipos de processos, que são as lagoas rasas sem agitação, as lagoas circulares e as lagoas de pista de corrida, e sua escolha dependerá do tipo de espécie a ser cultivada, do clima e do custo de terras e água necessárias para o desenvolvimento das culturas (OZKAN et al., 2012).

No sistema fechado os tipos de fotobiorreatores mais usuais são os de tubo vertical, de tubo horizontal ou de tela plana. Os fotobiorreatores apresentam muitas vantagens em relação aos sistemas abertos, como a melhoria no controle de pH, de temperatura, da circulação do efluente, além de propiciar uma melhoria na proteção de contaminação da cultura e aumentar a densidade das células das microalgas (LING et al., 2019). Suas desvantagens estão relacionadas com a acumulação tóxica de oxigênio ( $\text{O}_2$ ), valores impróprios do pH e  $\text{CO}_2$ , aquecimento elevado, incrustação biológica nas paredes, além dos custos elevados do equipamento e da operação (TAN et al., 2018; FULBRIGHT et al., 2018).

Para o sistema escuro de crescimento de microalgas, alguns requisitos devem ser requeridos: ausência total de luz; mistura constante a uma taxa de 200 a 480 rotações por minuto; adição de glicose ou acetato; adição de carbono e nutrientes (fósforo e nitrogênio); pH variando de 6,1 a 6,5. Este tipo de cultivo dá-se por metabolismo heterotrófico e possui a vantagem de obter-se maior massa celular de microalgas, devido ao constante fornecimento de carbono em comparação ao  $\text{CO}_2$  atmosférico (WAYNE et al., 2015).

Para o sistema de cultivo offshore, usa-se um fotobiorreator flutuante, que é implantado em meio marinho, para onde os efluentes residuais da terra são encaminhados. Os fotobiorreatores flutuantes são ancorados no mar por meio de baias.

O movimento das ondas melhora a turbulência do meio e à exposição à luz. Este método elimina a necessidade de terra e água para o cultivo das microalgas. Uma limitação seria a ocorrência de biocomponentes encrustados nas paredes do fotobiorreator (NOVOVESKÁ et al., 2016).

### Métodos de colheita de microalgas

A colheita de microalgas envolve o processo de remoção da biomassa do meio de cultura e representa um custo de 20 a 30% do total de produção. Quando se trata de grandes volumes de biomassas, várias etapas são empregadas e são usados métodos físicos, químicos ou biológicos para proceder com a separação das microalgas da fase líquida (KURNIAWATI; ISMADJI; LIU, 2014)

Dentre os modos de colheitas mais utilizados, têm-se os que incluem a sedimentação, a centrifugação, a filtração, a ultrafiltração, e ainda, caso haja necessidade, etapas adicionais de floculação ou a floculação-flotação.

A finalidade da floculação é a de juntar as células e agregá-las, de forma a facilitar a sedimentação, a centrifugação e a filtração (GERARDO et al., 2015; MUBARAK; SHAIJA; SUCHITHRA, 2019).

A técnica de colheita adequada depende de características de microalgas, como densidade de cultura, tamanho da célula e finalidade da produção. No entanto, nenhum deles foi caracterizado como econômico e apropriado para a produção de microalgas em larga escala (ZHUANG et al., 2016; MANTZOROU; VERVERIDIS, 2019).

Segundo Christenson e Sims (2011), as operações químicas, mecânicas e elétricas, e suas combinações, são os métodos de colheita atualmente mais utilizados. Estão sendo pesquisados métodos biológicos, com a finalidade de redução de custos (KUMAR et al., 2015). Existem polímeros naturais, como a quitosana e o amido catiônico, que podem ser usados como floculantes, com a vantagem de não causar poluição secundária (KURNIAWATI; ISMADJI; LIU, 2014). O Quadro 1 apresenta os principais métodos de colheita, o processo utilizado e as vantagens e desvantagens para cada tipo.

Quadro 1. Método de colheita de microalgas

Método	Tipo	Processo	Vantagens	Desvantagens
<b>Base Química</b>	Floculação e Coagulação Química	Aplicação de Sulfato de alumínio e/ ou Cloreto férrico	Confiabilidade	Inibição da atividade metanogênica específica de bactérias metanogênicas e acetogênicas alimentadas com lodo de águas residuais. Aumento da captação de metais pesados e podendo causar deficiências de fósforo nas plantas.
<b>Base Mecânica</b>	Centrifugação	Centrífugas de disco do tipo bico	Rápido, Confiável, com alto teor de sólidos.	Intensivo em energia, alto custo de investimento e operação (proibitivo em custos para qualquer uso em larga escala).
	Filtração Tangencial	Filtragem por membranas de fluxo tangencial	Confiável, com alto teor de sólidos.	Incrustação de membrana levando a alto custo; requisitos de energia são altos.
	Sedimentação por gravidade		Baixo custo	Lento (grande parte da biomassa pode se deteriorar durante o tempo de decantação).
<b>Base Elétrica</b>	Flotação por ar dissolvido	Incremento de ar dissolvido	Comprovado em larga escala	Floculantes geralmente necessários, causando problemas na fase de produção/ crescimento da biomassa( <i>upstream</i> ).
	Eletroforese	As células de algas podem ser concentradas pelo movimento em um campo elétrico.	Nenhuma adição química é necessária	Os altos requisitos de energia e os custos dos eletrodos; não indicado para larga escala.
<b>Base Biológica</b>	Autofloculação	Ocorre em altos níveis de pH	Não causa poluição secundária	Pode não ser possível sua aplicação em todas as águas.
	Biofloculação	Floculação causada por biopolímeros secretados	Não causa poluição secundária	Condições de luz e temperatura também afetem a biofloculação.
	Floculação microbiana	Adição de micróbios floculantes	Não causa poluição secundária	Condições de cultivo (culturas imobilizadas).

Fonte: Adaptado por Christenson; Sim (2011)

As microalgas podem flocular-se espontaneamente sem que haja adições químicas. Estes processos são denominados de autofloculação ou biofloculação. Neste sentido, surge um campo de pesquisas para suprir esta lacuna, uma vez que este processo ajuda a reduzir os custos de colheita. A autofloculação ocorre pelo aumento do pH (8,5 a 9), devido ao consumo de dióxido de carbono dissolvido no meio. A biofloculação é causada por biopolímeros secretados, sendo que as condições de luz e temperatura também podem influenciá-la (SUPARMANIAM, 2019).

Um grande desafio na produção de microalgas está relacionado com os métodos de colheitas (ZHUANG et al., 2016). Como as células das microalgas apresentam um tamanho muito reduzido, a sua recuperação torne-se difícil e onerosa. Por isso, as técnicas de colheita são consideradas como um fato relevante para a determinação dos custos envolvidos no processo de produção

Para evitar que a fotossíntese seja limitada, tendo em vista o rápido crescimento da biomassa, recomenda-se que a colheita seja realizada de forma repetida, em intervalos de tempo menores (ZHOU et al., 2014). Para Shuba e Kifle (2018), encontrar um método de colheita ideal para a recuperação altamente concentrada de biomassa, aliado a custos operacionais moderados, especialmente ligados à energia e manutenção, seria o caminho mais promissor.

Neste sentido, segundo afirmam Barros et al. (2015), o uso de microalgas torna-se não sustentável economicamente devido ao elevado custo associado à colheita. Apesar dos grandes esforços em pesquisa, para Salana et al. (2016), isso se dá pela existência de barreiras na etapa de escolha do método de cultivo e de colheita da biomassa adequadas para cada espécie. Deconinck et al. (2018) relatam que até o momento não foi descrito nenhum processo de colheita que fosse possível sua utilização em larga escala comercial. Para os autores, tal fato é resultado da relevância adotada pelos diferentes aparatos tecnológicos, financeiros e ambientais dispendidos por cada tipo de método, referente à cada uso destinado à biomassa como produto final.

### Potencial de remoção de poluentes das águas residuais por microalgas

Nos últimos 30 anos, vários estudos foram desenvolvidos com a finalidade de obter informações envolvendo o cultivo eficiente de microalgas em efluentes, com muitos resultados positivos (CHEN et al., 2011).

O Quadro 2 elenca resultados de pesquisas desenvolvidas que demonstram que as microalgas são capazes de promover a degradação de poluentes ambientais. No tratamento convencional, o fósforo não é removido e isso o torna um método pouco sustentável (BASHAN; BASHAN, 2010).

Mas, no caso do tratamento com microalgas, o fósforo fica incorporado à estrutura da biomassa e totalmente removido dos efluentes residuais (LAM e LEE, 2011; HUANG et al., 2012; LEITE; ABDELAZIZ; HALLENBECK, 2013).

Outra vantagem das microalgas é que o processo não gera lodo, que muitas vezes se torna um desafio a sua disposição (CHEN; ZHAO; QI, 2015).

As culturas de microalgas também são capazes de remover de forma eficiente os metais pesados existentes nos efluentes residuais.

A acumulação de metais nas estruturas das células das microalgas está sendo apontada como um método viável para biorremediação de águas residuais contaminadas. Segundo Abdel-Raouf; Al-Homaidan; Ibraheem (2012), várias espécies de microalgas são eficientes na remoção de quantidades expressivas de íons de metais pesados tóxicos. Vários estudos apontaram a remoção de cobalto, molibdênio, cálcio, magnésio, cobre, zinco, cromo, chumbo e selênio (YUCE; NAZIR; DONMEZ, 2010; TUZEN; SARI, 2010; SINGH; PAVANKUMAR; LAKSHMANAN, 2012).

Os produtos farmacêuticos descartados em esgotos sanitários acabam indo para as estações de tratamento municipais, e os tratamentos convencionais são ineficazes em remover este tipo de poluente, apresentando taxa de remoção na ordem de 5 a 40% (RIGOBELLO et al., 2013; TIWARI et al., 2017).

As pesquisas sobre a remoção de fármacos em águas residuárias ainda se encontram em fase inicial e carece de estudos para desenvolvimento de soluções sustentáveis. A biotecnologia de microalgas para tratamento de efluentes com presença de medicamento tem surgido como uma alternativa viável (ESCAPA, et al., 2015; MATAMOROS, et al., 2015; RUAN et al., 2019).

Escapa et al. (2016) verificaram que a capacidade de remoção de nutrientes por microalgas foi afetada pela presença de diclofenaco.

Três microalgas, *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus obliquus*, foram cultivadas em fotobiorreatores sob as mesmas condições controladas, com adição de diclofenaco como forma de nutriente.

Os resultados apontaram que a *S. obliquus* apresentou uma maior eficiência na remoção do diclofenaco, maior que 79%, apontando para a potencial utilização de microalgas para a remoção de fármacos de água residuárias.

Quadro 2. Resultados de pesquisas baseadas no cultivo de microalgas para remoção de nutrientes de águas residuais

Espécie de Microalgas	Nitrogênio %	Fósforo %	Tipos de efluente	DBO	Referência
<i>Golenkinia</i> sp.- SDEC-16	100	100	Esgoto sanitário do campus		Nie et al., 2018
<i>Scenedesmus obliquus</i>	99,0	99,0	Esgoto tratado secundariamente		Ling et al., 2019
<i>Scenedesmus obliquus</i>	81,9 ± 3,8% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , 100,0% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	94,1±4,7	Esgoto sanitário	71,2 ± 3,5%	Ansari et al., 2019
<i>Scenedesmus obliquus</i>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (86,16%)	100	Águas residuais municipais	87,86	Ansari et al., 2018
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	70,0	100	Esgoto sanitário		Han et al., 2015
<i>Chlorella</i> sp., <i>Chlorella ellipsoidea</i> , <i>Scenedesmus bijuga</i> e <i>Scenedesmus quadricauda</i>	41%, 54%, 36%, 56%, , 28%, 63%, 37%, 65%	100	Esgoto sintético		Han et al., 2014
<i>Chlorella thermophila</i> (MF179624)	Amônia (98,48 ± 1,52%), Nitrato (86,37 ± 3,73%)	Fosfato (73,83 ± 4,28%)	Águas residuais de esgoto com baixo conteúdo em nutrientes		Gebremedhin; Mishra; Mohanty, 2018
Microalgas Mistas e culturas de bactérias	72% (15°C); 83% (25°C)	100	Águas residuais municipais		Delgadillo-Mirquez et al., 2016
Biofilme de algas		97 ± 1%	Águas residuais terciárias		Sukacová; Trtílek; Rataj, 2015
Sistema algas-bacteriana	65,8%	89,3%	Águas residuais domésticas		Tang et al., 2018a
Sistema algas-bacteriana ( <i>Chlorella</i> e <i>Scenedesmus</i> e <i>Flavobacterium</i> , <i>Micropruina</i> e <i>Comamonadaceae</i> )	69,91%	94,78%	Águas residuais domésticas		Tang et al., 2018b
Consórcios de bactérias e algas	88%	89%	Águas residuais municipais		Lee et al., 2015
Flocos de <i>Chlorella</i> sp., <i>Pediastrum</i> sp., <i>Phormidium</i> sp. e <i>Scenedesmus</i> sp	87 ± 5%	99 ± 1%	Tratamento secundário de águas residuais		Van Den Hendt et al., 2011
Comunidades bacterianas, microalgal, protozoária e metazoária	>80%	50%	Águas residuais orgânicas e inorgânicas	> 80%	Galès et al., 2019
<i>Galdieria sulphuraria</i> ( <i>G. sulphuraria</i> )	94 a 96%	77 a 98%	Águas residuais urbanas (efluente primário)		Henkanatte-Gedera et al., 2015
<i>Galdieria sulphuraria</i> ( <i>G. sulphuraria</i> )	46 a 72%	63-89%	Águas residuais urbanas	71-95%	Herkanatte-Gedera et al., 2017
<i>Galdieria sulphuraria</i>	88,3 a 90,5%	95,5 a 98,1%	Águas residuais primárias		Selvaratnam et al., 2014
<i>Scenedesmus obliquus</i> e <i>Chlorella sorokiniana</i>	98,54 ± 3,30% ; 86,93 ± 3,49%	97,99 ± 3,59% ; 68,24 ± 11,69%	Esgoto doméstico bruto	76,13 ± 1,59; 69,38 ± 1,81%	Gupta et al., 2016
<i>Chlorella</i> , <i>Cryptomonas</i> e <i>Scenedesmus</i> .	75%	93%	Águas residuais municipais	92%	Novoveská et al., 2016
<i>Chlorella</i> sp.	93,9% (amônia), 89,1% (nitrogênio)	80,9%	Águas residuais municipais	90,8%	Li et al., 2011

Fonte: Autores (2020)

## Conclusão

O presente estudo fez uma análise, por meio de revisão de literatura, sobre o atual campo de pesquisa científica relacionado à biotecnologia de microalgas, cultivadas em águas residuais. A base de dados usada foi o ScienceDirect (www.sciencedirect.com). Os termos usados para a busca foram “microalgas AND sewage treatment”. Após aplicação de termos de exclusão e inclusão, foram selecionados 84 artigos.

Com base nos resultados de pesquisas científicas publicadas, as culturas de microalgas mostram-se eficientes na remoção ou diminuição de nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo, na redução da DBO, na inibição de coliformes fecais e na remoção de metais pesados. Outra vantagem das microalgas é que o processo não gera lodo, que muitas vezes se torna um desafio a sua disposição. Quanto à questão da remoção de fármacos, tem-se mostrado como uma alternativa viável, porém, os estudos ainda se encontram em fase inicial e carecem de pesquisas para desenvolvimento de soluções sustentáveis.

Um grande desafio na produção de microalgas está relacionado com os processos de colheitas. Ainda existem aspectos técnicos que precisam ser desenvolvidos, necessitando de mais pesquisas na área para aprimorar os métodos de colheita e secagem das microalgas para aproveitamento da biomassa de forma eficiente e rentável. O investimento em pesquisas para a solução desse desafio aumentará a potencialidade do cultivo de microalgas em sistemas de tratamento de águas residuais.

## Limitações do estudo

Este estudo utilizou apenas uma base de dados (ScienceDirect) para coleta de referências de acordo com as palavras-chave utilizadas e no período pesquisado. Sendo este um limitante do universo possível a ser pesquisado, caso ampliadas as bases de pesquisa.

## Referências

ABDEL-RAOUF, N.; AL-HOMAIDAN, A.A.; IBRAHEEM, I.B.M. Microalgae and wastewater treatment. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 19, n. 3, p. 257-275, 2012.

ANSARI, A.; RAVINDRAN, B.; GUPTA, S.K.; NARS, M.; RAWAT, I.; BUX, F. Techno-economic estimation of wastewater phycoremediation and environmental benefits using *Scenedesmus obliquus* microalgae. **Journal of Environmental Management**, v. 240, p. 293-302, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.123>

ANSARI, A.; RAVINDRAN, B.; GUPTA, S.K.; NARS, M.; RAWAT, I.; BUX, F. Evaluation of various cell drying and disruption techniques for sustainable metabolite extractions from microalgae grown in wastewater: A multivariate approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, n. 1, p. 634-643, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.098>

ASHOK, V.; SHRIWASTAV, A.; BOSE, P.; GUPTA, S.K. Phycoremediation of wastewater using algal-bacterial photobioreactor: Effect of nutrient load and light intensity. **Bioresource Technology Reports**, v. 7, p. 100-205, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100205>

BALDEV, E.; MUBARAKALI, D.; KUMAR, K. S.; ARUTSELVAN, C.; ALHARBI, N. S.; ALHARBI, S. A. Unveiling algal cultivation using raceway ponds for biodiesel production and its quality assessment. **Renew Energy**, v.123, p. 486-498, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.032>

BARROS, A.I.; GONÇALVES, A.L.; SIMÕES, M.; PIRES, J.C.M. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1489-1500, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.037> 1364-0321

BASHAN, L.E.; BASHAN, Y. Immobilized microalgae for removing pollutants: Review of practical aspects. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 6, p. 1611-1627, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.043>

CAI, T.; PARK, S.Y.; LI, Y. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 360-369, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.030>

CESÁRIO, M.T; FONSECA, M. M. R. da, MARQUES, M. M.; ALMEIDA, M. C. M. D. de. Marine algal carbohydrates as carbon sources for the production of biochemicals and biomaterials. **Biotechnol. Adv.**, v. 36, n.3, p. 798-817, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.02.006>

CHEAH, W.Y.; SHOW, P.L.; JUAN, J.C.; CHANG, J.; LING, T.C. Microalgae cultivation in palm oil mill effluent (POME) for lipid production and pollutants removal. **Energy Conversion and Management**, v. 174, n. 15, p. 430-438, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.057>

CHEN, G.; ZHAO, L.; QI, Y. Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: A critical review. **Applied Energy**, v. 137, p. 282-291, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.032>

CHEN, C.; YEH, K.; AISYAH, R.; LEE, D.; CHANG, J. Photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 71-81, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.159>

CHENG, P.; JI, B.; GAO, L.; ZHANG, W.; WANG, J.; LIU, T. The growth, lipid and hydrocarbon production of *Botryococcus braunii* with attached cultivation. **Bioresour. Technol.**, v.138, p. 95-100, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.150>

CHRISTENSON, L.; SIMS, R. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. **Biotechnology Advances**, v. 26, n. 6, p. 686-702, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.05.015>

DECONINCK, N. ; MUYLAERT, K.; IVENS, W.; VANDAMME, D. Innovative harvesting processes for microalgae biomass production: A perspective from patent literature. **Algal Research**, v. 31, p. 469-477, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.01.016>

- DELANKA-PEDIGE, H.MK; MUNASINGHE-ARACHCHIGE, S.P.; CORNELIUS, J.; HENKANATTE-GEDERA, S.M.; TCHINDA, D.; ZHANG, Y.; NIRMALAKHANDAN, N. Pathogen reduction in an algal-based wastewater treatment system employing *Galdieria sulfuraria*. **Algal Research**, v. 39, p. 1201453, 2019.
- DELGADILLO-MIRQUEZ, L.; LOPES, F.; TAIDI, B.; PAREAU, D. Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture. **Biotechnology Reports**, v. 11, p. 18-26, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.04.003>
- ESCAPA, C.; COIMBRA, R.N.; PANIAGUA, S.; GARCÍA, A.I.; OTERO, M. Comparative assessment of diclofenac removal from water by different microalgae strains. **Algal Research**, v. 18, p. 127-134, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.06.008>
- ESCAPA, C.; COIMBRA, R.N.; PANIAGUA, S.; GARCÍA, A.I.; OTERO, M. Nutrients and pharmaceuticals removal from wastewater by culture and harvesting of *Chlorella sorokiniana*. **Bioresource Technology**, v. 185, p. 276-284, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.004>
- FARIED, M.; SAMER, M.; ABDELSALAM, E.; YOUSEF, R. S.; ATTIA, Y. A.; ALI, A. S. Biodiesel production from microalgae: Processes, technologies and recent advancements. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 893-913, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.199>
- FULBRIGHT, S.P.; ROBBINS-PIANKA, A.; Berg-Lyons, D.; KNIGHT, R.; REARDON, K.F.; CHISHOLM, S.Y. Bacterial community changes in an industrial algae production system. **Algal Res**, v. 31, p. 147-156, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.09.010>
- GALÈS, A.; BONNAFOUS, A.; CARRÉ C.; JAUZEIN, V.; LA NOUGUÈRE; E.; Le Floch, E.; PINOIT, C.; ROQUES, C.; SIALVE, B.; SIMIER, M.; STEYER, J.; FOUILLAND, E. Importance of ecological interactions during wastewater treatment using High Rate Algal Ponds under different temperate climates. **Algal Research**, v. 40, p. 101-508, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101508>
- GEADA, P.; VASCONCELOS, V.; VICENTE, A.; FERNANDES, B. Chapter 13 - Microalgal biomass cultivation. **Algal Green Chemistry**, p. 257-284, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63784-0.00013-8>
- GEBREMEDHIN, G.; MISHRA, S.; MOHANTY, K. Augmentation of native microalgae based biofuel production through statistical optimization of campus sewage wastewater as low-cost growth media. **Journal Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 5, p. 6623-6632, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.061>
- GERARDO, M. L.; VAN DEN HENDE, S.; VERVAEREN, H.; COWAD, T, S.C. Habilidade decolheita de microalgas em uma abordagem de biorrefinaria: uma revisão dos desenvolvimentos e estudos de caso de plantas-piloto. **Algal Res.**, v. 11, p. 248-262, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.06.019>
- GONÇALVES, A.L.; PIRES, J.C.M.; SIMÕES, M. A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. **Algal Research**, v. 24, p. 403-415, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.008>
- GUPTA, S.K.; ANSARI, F.A.; SHRIWASTAV, A.; SAHOO, N.K.; RAWAT, I.; BUX, F. Dual role of *Chlorella sorokiniana* and *Scenedesmus obliquus* for comprehensive wastewater treatment and biomass production for bio-fuels. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 255-264, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.040>
- HAN, B.; GOH, H.; CHYUAN, H.; YEE, M.; CHEN, W.; LING, K. Sustainability of direct biodiesel synthesis from microalgae biomass: a critical review. **Renew Sustain Energy Rev**, v.107, p. 59-74, 2019. <https://doi.org/10.5771/9783828870673-59>
- HAN, L.; PEI, H.; HU, W.; JIANG, L.; HAN, F. Integrated campus sewage treatment and biomass production by *Scenedesmus quadricauda* SDEC-13. **Bioresource Technology**, v. 175, p. 262-268, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.100>
- HAN, L.; PEI, H.; HU, W.; HAN, F. SONG, M.; ZHANG, S. Nutrient removal and lipid accumulation properties of newly isolated microalgal strains. **Bioresource Technology**, v. 165, p. 38-41, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.131>
- HENKANATTE-GEDERA, S.M; SELAVARATNAM, T.; CASKAN, N.; NIRMALAKHANDAN, N.; VAN VOORHIES, W.; LAMMERS, Peter J. Algal-based, single-step treatment of urban wastewaters. **Bioresource Technology**, v. 189, p. 273-278, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.120>
- HENKANATTE-GEDERA, S.M; SELAVARATNAM, T.; KARBAKSHRAVARI, M.; MYINT, M.; NIRMALAKHANDAN, N.; VAN VOORHIES, W.; LAMMERS, Peter J. Removal of dissolved organic carbon and nutrients from urban wastewaters by *Galdieria sulphuraria*: Laboratory to field scale demonstration. **Algal Research**, v. 24, p. 450-456, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.08.001>
- HUANG, C.C.; HUNG, J.J.; PENG, S.H.; CHEN, C.N.N. Cultivation of a thermo-tolerant microalga in an outdoor photobioreactor: influences of CO<sub>2</sub> and nitrogen sources on the accelerated growth. **Bioresour Technol**, v. 112, p. 228-238, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.078>
- KARAGOZ, P.; BILL, R.M.; OZKAN, M. Lignocellulosic ethanol production: Evaluation of new approaches, cell immobilization and reactor configurations. **Renewable Energy**, v.143, p. 741-752, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.045>
- KUMAR, P.K.; KRISHNA, S.V.; VERMA, K.; POOJA, K.; HIMABINDU, V. Phycoremediation of sewage wastewater and industrial flue gases for biomass generation from microalgae. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 25, p. 133-146, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.04.006>
- KUMAR, K.; MISHRA, S.K.; SHRIVASTAV, A.; PARK, M.S.; YANG, J. Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 875-885, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.033>
- KURNIAWATI, HÁ; ISMADJI, S.; LIU, J.C. Microalgas colheita por flotação usando saponina natural e quitosana. **Bioresource Technology**, v. 166, p. 429-434, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.079>

- LAM, T.P.; LEE, T.; CHEN, C.; CHENG, J. Strategies to control biological contaminants during microalgal cultivation in open ponds. **Bioresource Technology**, v. 252, p. 180-187, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.088>
- LAM, M.K.; LEE, K.T. Potential of using organic fertilizer to cultivate *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. **Apple Energy**, v. 94, p. 303-308, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.075>
- LAM, M.K.; LEE, K.T. Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): Win-win strategies toward better environmental protection. **Biotechnology Advances**, v. 29, n. 1, p. 124-141, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.10.001>
- LAM; LEE, T.M; CHEN, C.Y; CHANG, J.S. Estratégias para controlar contaminantes biológicos durante o cultivo de microalgas em lagoas abertas. **Bioresource Technology**, v. 252, p. 180-187, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.088>
- LEE, C.S.; LEE, S.; KO, S.; OH, H.; AHN, C. Effects of photoperiod on nutrient removal, biomass production, and algal-bacterial population dynamics in lab-scale photobioreactors treating municipal wastewater. **Water Research**, v. 68, n. 1, p. 680-691, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.029>
- LEITE, G.B.; ABDELAZIZ, A.E.M.; HALLENBECK, P.C. Algal biofuels: challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 145, p. 134-141, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.007>
- LI, Y.; CHEN, U.; CHEN, P.; MIM, M.; ZHOU, W.G.; MARTINEZ, B.; ZHU, J.; RUAN, R. Characterization of a microalga *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 5138-5144, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.091>
- LING, Y.; SUN, L.; WANG, S.; LIN, C.S.K.; ZHOU, Z. Cultivation of oleaginous microalga *Scenedesmus obliquus* coupled with wastewater treatment for enhanced biomass and lipid production. **Biochemical Engineering Journal**, v. 148, p. 162-169, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.05.012>
- LIU, T.; WANG, J.; HU, Q.; CHENG, P.; JI, B.; LIU, J.; CHEN, Y. ZHANG, W.; CHEN, X.; CHEN, L.; GAO, L.; JI, C.; Wang, H. Attached cultivation technology of microalgae for efficient biomass feedstock production. **Bioresource Technology**, v. 127, p. 2016-222, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.100>
- MANTZOROU, A.; VERVERIDIS, F. Microalgal biofilms: A further step over current microalgal cultivation techniques. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 3187-3201, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.355>
- MATA, T.M.; MARTINS, A.A.; CAETANO, N.S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 217-232, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- MATAMOROS, V.; GUTIÉRREZ, R.; FERRER, I.; GARCÍA, J.; BAYONA, J.M. Capability of microalgae-based wastewater treatment systems to remove emerging organic contaminants: a pilot-scale study. **J. Hazard. Mater.**, v. 288, p. 34-42, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.002>
- MORENO OSORIO, J.H.; PINTO, G.; A. POLLIO; FRUNZO, L.; LENS, P.N.L.; ESPOSITO, G. Start-up of a nutrient removal system using *Scenedesmus vacuolatus* and *Chlorella vulgaris* biofilms. **Bioresour Bioprocess**, v. 6, p. 27, 2019.
- MUBARAK, M.; SHAIJA, A.; SUCHITHRA, T.V. Flocculation: An effective way to harvest microalgae for biodiesel production. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.7, n. 4, p. 103221, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103221>
- NIE, C.; PEI, H.; JIANG, L.; CHENG, J.; HAN, F. Growth of large-cell and easily-sedimentation microalgae *Golenkinia* SDEC-16 for biofuel production and campus sewage treatment. **Renewable Energy**, v. 122, p. 517-525, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.005>
- NOVOVESKÁ, L.; ZAPATA, A.K.M.; Zabolotney, J.B.; ATWOOD, M.C.; SUNDSTROM, E.R. Optimizing microalgae cultivation and wastewater treatment in large-scale offshore photobioreactors. **Algal Research**, v. 18, p. 86-94, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.05.033>
- OZKAN, A.; KINNEY, K.; KATZ, L.; BERBEROGLU, H. Reduction of water and energy requirement of algae cultivation using an algae biofilm photobioreactor. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 542-548, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.055>
- PETER J.; SCHNURR D.; GRANT, A. Factors affecting algae biofilm growth and lipid production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 418-429, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.090>
- PITTMAN, J.K.; DEAN, A.P.; OSUNDEKO, O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 17-25, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.035>
- POURKARIMI, S.; HALLAJISANI, A.; ALIZADEHDAKHEL, A.; NOURALISHAHI, A. Biofuel production through micro- and macroalgae pyrolysis – A review of pyrolysis methods and process parameters. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 142, p. 104599, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.04.015>
- RAJASULOCHANA, P.; PREETHY, V. Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review. **Resource-Efficient Technologies**, v. 2, n. 4, p. 175-184, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.09.004>
- RIGOBELLO, E.S.; DANTAS, A.; DI BERNARDO, L.; VIEIRA, E.M. Removal of diclofenac by conventional drinking water treatment processes and granular activated carbon filtration. **Chemosphere**, v. 92, p. 184-191, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.010>
- ROGERS, J.N.; ROSENBERG, J.N.; GUZMAN, B.J.; OH, V.H.; MIMBELA, L.E.; GHASSEMI, A.; BETENBAUGH, M.J.; OYLER, G.A.; DONOHUE, M.D. A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. **Algal Research**, v. 4, p. 76-88, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.11.007>
- ROOSTAEI, J.; ZHANG, Y. Spatially Explicit Life Cycle Assessment: Opportunities and challenges of wastewater-based algal biofuels in the United States. **Algal Research**, v. 24, p. 395-402, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.08.008>

- RUAN, Y.; WU, R.; LAM, J.C.W.; ZHANG, K.; LAM, P.K.S. Seasonal occurrence and fate of chiral pharmaceuticals in different sewage treatment systems in Hong Kong: Mass balance, enantiomeric profiling, and risk assessment. **Water Research**, v. 149, p.607-616, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.010>
- RUIZ-MARIN, A.; MENDOZA-ESPINOSA, L.G.; STEPHENSON, T. Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 1, p. 58-64, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.076>
- SALAMA, E.S.; JEON, B.H.; KURADE, M.B.; ABOU-SHANAB, R.A.I.; GOVINDWAR, S.P.; LEE, S.H. Harvesting of freshwater microalgae *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris* using acid mine drainage as a cost effective flocculant for biofuel production. **Energy Convers Manag**, v. 121, p. 105-112, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.020>
- SHUBA, E.S.; KIFLE, D. Microalgae to biofuels: "Promising" alternative and renewable energy, review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. 1, p. 743-755, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.042>
- SINGH, L.; PAVANKUMAR, A.R.; LAKSHMANAN, R.; RAJARAO, G.K. Effective removal of Cu<sup>2+</sup> ions from aqueous medium using alginate as biosorbent. **Ecol. Eng.**, v. 38, p. 119-124, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.10.007>
- SUKACOVÁ, K.; TRTÍLEK, M.; RATAJ, T. Phosphorus removal using a microalgal biofilm in a new biofilm photobioreactor for tertiary wastewater treatment. **Water Research**, v. 71, p. 55-63, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.049>
- SUPARMANIAM, U.; LAM, M.K.; UEMUR, Y.; LIM, J.W.; LEE, K.T.; SHUIT, S.H. Insights into the microalgae cultivation technology and harvesting process for biofuel production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109361, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109361>
- TANG, C.; TIAN, Y.; LIANG, H.; ZUO, W.; WANG, Z.; ZHANG J.; HE, Z. Enhanced nitrogen and phosphorus removal from domestic wastewater via algae-assisted sequencing batch biofilm reactor. **Bioresource Technology**, v. 250, p. 185-190, 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.028>
- TANG, C.; TIAN, Y.; HE, Z.; ZUO, W.; ZHANG J. Performance and mechanism of a novel algal-bacterial symbiosis system based on sequencing batch suspended biofilm reactor treating domestic wastewater. **Bioresource Technology**, v. 265, p. 422-431, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.033>
- TAN, X.B.; LAM, M.K.; UEMURA, Y.; LIM, J.W.; WONG, C.Y.; LEE, K.T. Cultivation of microalgae for biodiesel production: a review on upstream and downstream processing. **Chin J Chem Eng**, v. 26, p. 17-30, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.08.010>
- TING, H.; HAIFENG, L.; SHANSHAN, M.; ZHANG, Y.; ZHIDAN, L.; N., D. Progress in microalgae cultivation photobioreactors and applications in wastewater treatment: a review. **International Journal Agric Biology Energy**, v. 10, p. 1-29, 2017. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171001.2705>
- TIWARI, B.; SELLAMUTHU, B.; OUARDA, Y.; DROGUI, P.; TYAGI, R.D.; BUELNA, G. **Review on fate and mechanism of removal of pharmaceutical pollutants from wastewater using biological approach**. **Bioresource Technology**, v. 224, p. 1-12, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.042>
- TRAN, C.; NOSWORTHY, N.; BILEK, M.; MCKENZIE, D. Covalent immobilization of enzymes and yeast: towards a continuous simultaneous saccharification and fermentation process for cellulosic ethanol. **Biomass Bioenergy**, v. 81, p. 234-241, 2015.
- TUZEN, M.; SARI, A. Selenium biosorption from aqueous solution by green algae biomass (*Cladophora hutchinsiae*): equilibrium, thermodynamic and kinetic studies. **Chem. Eng. J.**, v. 158, p. 200-206, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.12.041>
- VAN DEN HENDE, S.; VERVAEREN, H.; DESMET, S.; BOON, N. Bioflocculation of microalgae and bacteria combined with flue gas to improve sewage treatment. **New Biotechnology**, v. 29, n. 1, p. 23-31, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2011.04.009>
- WALLS, L.E.; VELASQUEZ-ORTA, S.B.; ROMERO-FRASCA, E.; LEARY, P.; NOGUEZ, I.Y.; LEDESMA, M.T.O. Non-sterile heterotrophic cultivation of native wastewater yeast and microalgae for integrated municipal wastewater treatment and bioethanol production. **Biochemical Engineering Journal**, v. 151, n. 15, p. 107319, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107319>
- WAYNE, C.K.; REEN, C.S.; SHOW, P.L.; JIUN, Y.Y.; CHUAN, L.T.; CHANG, L. Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. **Journal of the Tiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 91, p. 332-344, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.05.039>
- YUCE, M.; NAZIR, H.; DONMEZ, G. Advanced research on a new algae sensor determining aqueous media Pb (II) ions. **Biosens Bioelectron.**, v. 26, p. 321-326, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.08.022>
- ZHAN; RONG, J.; WANG, Q. Mixotrophic cultivation, a preferable microalgae cultivation mode for biomass/bioenergy production, and bioremediation, advances and prospect. **International Journal Hydrogen Energy**, v. 42, p. 8505-8517, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.021>
- ZHOU, X.; JIN, W.; TU, R.; GUO, Q.; HAN, S.; CHEN, C.; WANG, Q.; LIU, W.; JENSEN, P.D.; WANG, Q. Optimization of microwave assisted lipid extraction from microalga *Scenedesmus obliquus* grown on municipal wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 221, p. 502-508, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.260>
- ZHOU, W.; LI, Y.; MIN, M.; HU, B.; ZHANG, H.; MA, X.; LI, L.; CHENG, Y.; CHEN, P.; RUAN, R. Growing wastewater-born microalga *auxenochlorella protothecoides* UMN280 on concentrated municipal wastewater for simultaneous nutrient removal and energy feedstock production. **Appl Energy**, v. 98, p. 433-440, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.005>

ZHUANG, L.; YU, D.; ZHANG, J.; LIU, F.; WU, Y.; ZHANG, T.; DAO, G.; HU, H. The characteristics and influencing factors of the attached microalgae cultivation: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 1110-1119, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.006>

ZHUANG, L.; AZIMI, Y.; YU, D.; WANG, W.; WU, Y.; DAO, G.; HU, H. Enhanced attached growth of microalgae *Scenedesmus. LX1* through ambient bacterial pre-coating of cotton fiber carriers. **Bioresource Technology**, v. 218, p. 643-649, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.013>

### **3.2 Artigo 2: Panorama global da produção científica sobre microalgas no tratamento de águas residuais<sup>2</sup>**

---

<sup>2</sup> Artigo publicado na Revista Valore, Volta Redonda, 5, e-5047, 2020,  
DOI: <https://doi.org/10.22408/rev502020509e-5047>. A revista possui *Qualis* A3, na avaliação 2017-2019.  
Autores: Castro, A. C.; Konrad, O.

# PANORAMA GLOBAL DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE MICROALGAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS

## PANORAMA GLOBAL DE LA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DE MICROALGAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### GLOBAL OVERVIEW OF SCIENTIFIC PRODUCTION OF MICROALGAE IN THE TREATMENT OF WASTE WATER

Aline Antonia Castro\*  
alineantoniacaastro@yahoo.com.br

Odorico Konrad\*  
okonrad@univates.br

\*Universidade do Vale do Taquari, Lajeado/RS – Brasil

#### Resumo

O tratamento de águas residuais usando microalgas destaca-se pela elevada eficácia na remoção de nutrientes e produção de biomassa, tornando-se uma fonte potencial para a produção de bioenergia. O objetivo deste estudo foi avaliar a produção científica global sobre o tratamento de águas residuais utilizando microalgas, no período de 1979 a 2018. A metodologia utilizada foi a análise bibliométrica de artigos científicos, na base Scopus, da Editora Elsevier, usando como descritores de busca os termos "microalgae AND wastewater", no título, no resumo e nas palavras-chave. Para a análise de redes, usou-se o software VOSviewer. Os aspectos analisados foram o ano, país, periódico e palavras-chave. Os indicadores bibliométricos utilizados para fins de classificação e análise foram o total de publicações, total de citações, CiteScore e índice-h. Os resultados indicaram que o número de publicações vem aumentando ao longo dos anos. China e EUA desempenham papel importante na produção científica e têm sido parceiros frequentes em colaborações internacionais. Bioresource Technology e Algal Research foram as revistas mais utilizadas para disseminar resultados. Análises de palavras-chave sugeriram que as pesquisas concentram-se em estudos sobre microalgas com foco na produção de biomassa, métodos de cultivo e desenvolvimento de biocombustíveis; e estudos sobre tratamento de águas residuais, focando a remoção de poluentes e nitrogênio, sendo a espécie *Chlorella Vulgaris* a mais comumente cultivada. Este artigo aponta para a necessidade de estudos futuros sobre métodos viáveis de colheita, uma vez que este termo está relacionado às questões muito relevantes dentro do tema, por ser considerada como um fator limitante ao cultivo devido ao alto custo associado.

**PALAVRAS CHAVE:** Bibliometria. Biocombustíveis. Biorremediação. Publicações.

#### Resumen

El tratamiento de aguas residuales mediante microalgas destaca por su alta eficiencia en la remoción de nutrientes y producción de biomasa, convirtiéndose en una fuente potencial para la producción de bioenergía. El objetivo de este estudio fue evaluar la producción científica global sobre el tratamiento de aguas residuales mediante microalgas, desde 1979 hasta 2018. La metodología utilizada fue el análisis bibliométrico de artículos científicos, basado en Scopus, de Editora Elsevier, utilizando descriptores de búsqueda. los términos "microalgas Y aguas residuales", en el título,

resumen y palabras clave. Para el análisis de la red se utilizó el software VOSviewer. Los aspectos analizados fueron año, país, publicación periódica y palabras clave. Indicadores bibliométricos utilizados para fines de clasificación y análisis fueron el número total de publicaciones, el total de citas, CiteScore e índice h. Los resultados indicaron que el número de publicaciones ha aumentado a lo largo de los años, China y los EE. UU. juegan un papel importante en la producción científica y se han convertido en socios frecuentes en colaboraciones internacionales. *Bioresource Technology* y *Algal Research* fueron las revistas más utilizadas para difundir resultados. Se encontró que la investigación se centra en estudios sobre microalgas con un enfoque en la producción de biomasa, métodos de cultivo y el desarrollo de biocombustibles; y estudios sobre tratamiento de aguas residuales, centrados en la remoción de contaminantes y nitrógeno, siendo la especie *Chlorella vulgaris* la más cultivada. Este artículo señala la necesidad de futuros estudios sobre métodos de cosecha viables, ya que este término está relacionado con temas muy relevantes dentro de la temática, ya que se considera un factor limitante del cultivo por el alto costo asociado.

**PALABRAS CLAVE:** Bibliometría. Biocombustibles. Biorremediación. Publicaciones.

### **Abstract**

The treatment of wastewater using microalgae stands out for its high efficiency in removing nutrients and producing biomass, becoming a potential source for the production of bioenergy. The aim of this study was to evaluate the global scientific production on the treatment of wastewater using microalgae, from 1979 to 2018. The methodology used was the bibliometric analysis of scientific articles, based on Scopus, from Editor Elsevier, using search descriptors the terms "microalgae AND wastewater", in the title, abstract and keywords. For the network analysis, the VOSviewer software was used. The aspects analyzed were the year, country, periodical and keywords. Bibliometric indicators used for classification and analysis purposes were the total number of publications, total citations, CiteScore and h-index. The results indicated that the number of publications has increased over the years, China and the USA play an important role in scientific production and have been frequent partners in international collaborations. *Bioresource Technology* and *Algal Research* were the most used magazines to disseminate results. Keyword analysis suggested that the research focused on studies on microalgae with a focus on biomass production, cultivation methods and biofuel development; and studies on wastewater treatment, focusing on the removal of pollutants and nitrogen, with the species *Chlorella Vulgaris* being the most commonly cultivated. This article points to the need for future studies on viable harvesting methods, since this term is related to very relevant issues within the theme, as it is considered a limiting factor to cultivation due to the high associated cost.

**KEYWORDS:** Bibliometry. Biofuels. Bioremediation. Publications.

## 1. INTRODUÇÃO

As primeiras pesquisas relacionadas à produção de microalgas sob condições controladas surgiram na década de 1950, embora os processos biológicos com as microalgas tenham sido descritos ao longo de muitos séculos (GARRIDO-CARDENAS et al, 2018). O primeiro estudo sobre o cultivo intensivo de algas com a finalidade de remoção de nutrientes de águas residuais foi realizado por Bogan em 1960. Foram Oswald e Golueke que, em 1966, investigaram e propuseram o cultivo em lagoas de águas residuais com alta concentração de microalgas (ABDEL-RAOUF; AL-HOMAIDAN; IBRAHEEM, 2012).

Atualmente, a biotecnologia de microalgas recebeu grande destaque por se configurar em uma abordagem eficaz e de baixo custo para a remoção de nutrientes e outros contaminantes dos efluentes do tratamento de águas residuárias, como metais pesados e fármacos (ABDEL-RAOUF; AL-HOMAIDAN; IBRAHEEM, 2012; ZHU et al., 2016; VAN DEN HEND et al., 2017). Este novo método verde está sendo desenvolvido para suplantiar os modelos de tratamento convencional de águas residuais (HENKANATTEGEDERA et al., 2015; RAJASULOCHANA e PREETHY, 2016).

Cheah et al. (2016) e Abdel-Raouf; Al-Homaidan; Ibraheem (2012) relataram que o tratamento de águas residuais com uso de microalgas tem atraído grande interesse no meio acadêmico porque, além da eficácia na remoção de nutrientes, também apresenta elevada capacidade de produzir biomassa, muito útil para várias aplicações, tornando-se uma fonte potencial para a produção de biocombustíveis. Manara e Zabaniotou (2012) e Papel et al. (2016), sugeriram que o acoplamento da produção de biomassa com o tratamento de águas residuais aparece como uma solução mais provável para a aplicação em larga escala do cultivo de microalgas em curto prazo.

Este processo de biorremediação é uma área de pesquisa que cresceu substancialmente nos últimos anos, surgindo grande quantidade de produtos e instalações, cuja matéria-prima é a biomassa proveniente de microalgas (GARRIDO-CARDENAS et al., 2018). Tendo em vista o grande número de pesquisas publicadas sobre o tema, uma análise bibliométrica de artigos científicos pode ser um caminho que conduza ao conhecimento das descobertas científicas na área e ainda evidencie a propensão da evolução da produção científica global sobre tratamento de águas residuais e microalgas.

A análise bibliométrica considera a utilização de metodologia e indicadores com o intuito de analisar e avaliar as descobertas de toda a produção científica produzida sobre determinado tema de pesquisa. Diante destas análises, pode-se chegar a vários resultados, tais como, identificação dos autores e instituições mais produtivas e com maior influência acadêmica; verificação dos fatos mais relevantes da história da evolução das pesquisas; conhecimento das tendências de pesquisas e das lacunas, de forma a apontar a direção para futuros pesquisadores. Recentemente, grande é o número de estudos que utilizam a análise bibliométrica em diversas áreas científicas, comprovando a relevante utilidade desta metodologia (GARRIDO-CARDENAS et al., 2018; KAMDEM et al., 2019; VANZETTO; THOMÉ, 2019).

O objetivo deste estudo foi avaliar as pesquisas sobre tratamento de águas residuais com microalgas no período de 1979 a 2018, por meio de análise bibliométrica de resultados recuperados da base de dados Scopus, a fim de revelar o status atual das tendências das pesquisas no meio científico e sugerir o desenvolvimento de novos estudos.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Indicadores e ferramentas bibliométricas**

A bibliometria permite a quantificação da relação de produção e dispersão do conhecimento científico, além de mostrar o desenvolvimento de diferentes campos científicos, os parâmetros de autoria e o uso dos resultados dos estudos. (OKUBO, 1997; MAO et al., 2015). Para Chueke e Amatucci (2015), uma análise bibliométrica é capaz de colaborar na sistematização de pesquisas em um campo específico e apontar problemas a serem estudados em pesquisas futuras.

CiteScore (CS) de uma revista acadêmica é uma medida que reflete o número médio anual de citações de artigos publicados nessa revista. Essa medida de avaliação foi lançada em dezembro de 2016 pela Elsevier como uma alternativa aos fatores de impacto do Journal Citation Reports (JCR), muito utilizados. Embora o CS e o fator de impacto JCR sejam similares em sua definição, o CS é baseado nas citações registradas no banco de dados Scopus e não no JCR, e essas citações são coletadas para artigos publicados nos três anos anteriores (ELSEVIER, 2019). Em qualquer ano, o CS de uma

revista é o número de citações recebidas naquele ano de artigos publicados nessa revista durante os três anos anteriores, dividido pelo número total de citações durante os três anos anteriores (MAO et al., 2015; KHUDZARI et al., 2018; GARRIDO-CARDENA et al.2018).

O índice *h*, ou *h-index* (*h-i*) proposto por Hirsch em 2005, é um número usado para medir a influência de publicações (MAO et al., 2015). O *h-i* foi proposto com a finalidade de medir a produtividade e o impacto acadêmico de pesquisadores, tendo como base os seus artigos mais citados. O índice *h* considera tanto o número de artigos quanto o número de citações (KAMDEM et al., 2019) e corresponde ao número de artigos de um determinado autor com, pelo menos, o mesmo número de citações (MAO et al, 2015; MAO et al., 2018). Ele pode medir tanto a quantidade, quanto a qualidade das citações das publicações de um pesquisador, de um país, de um periódico, de uma organização, etc. (MAO et al., 2015; LI; HAN; LU, 2018; KAMDEM et al., 2019).

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Método de Pesquisa**

O método utilizado para a realização da pesquisa apresenta abordagem quantitativa de natureza aplicada. Quanto aos procedimentos metodológicos, classifica-se como documental e quanto aos objetivos, como exploratória descritiva.

A ferramenta utilizada neste artigo foi a base de dados Scopus, da Editora Elsevier, que se constitui de um banco de dados multidisciplinar, onde são disponibilizados, via Web, instrumentos inteligentes para inspecionar, analisar e visualizar pesquisas. A Scopus é considerada como a maior base de dados de resumos e citações da literatura, com revisão por pares, incluindo revistas científicas, livros, processos de congressos e publicações do setor, oferecendo uma ampla visão da produção científica de pesquisadores em todo o mundo, em diversas áreas do conhecimento (ELSEVIER, 2019).

A extração de dados foi realizada no dia 13 de novembro de 2019 usando a base de dados Scopus. Inicialmente foram selecionados todos os artigos científicos, para proceder com a análise referente ao tema. Os descritores utilizados para a busca foram "microalgae AND wastewater", no título, no resumo e nas palavras-chave (TITLE-

ABS-KEY). A publicação mais antiga data de 1979 e as mais recentes são de 2020. A sequência de consulta usada para a pesquisa foi: TITLE-ABS-KEY (microalgae AND wastewater) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (EXCLUDE (PUBYER, 2020) OR EXCLUDE (PUBYEAR, 2019)).

Para a análise de redes, a verificação das comunidades pode ser realizada usando a ferramenta de software VOSviewer, cujo acesso é livre por meio do sítio <http://www.vosviewer.com>. Este software permite elaborar gráficos nos quais cada país ou palavra-chave é representada por um nó, e as conexões entre dois nós representam a colaboração entre os dois termos que os nós representam (KHUDZARI et al., 2018; GARRIDO-CARDENA et al.2018; KAMDEM et al, 2019).

Os aspectos estudados neste artigo foram analisados com base no ano, país, periódico e palavras-chave. Indicadores bibliométricos como total de publicações, total de citações, CiteScore e índice-*h* foram utilizados para fins de classificação e análise, e estão relacionados aos itens estudados de acordo com o Quadro 1. O software VOSviewer foi usado para visualizar a rede de dados e analisar a colaboração de países e co-ocorrência de palavras-chave.

Quadro 1. Indicadores bibliométricos utilizados

Aspectos estudados	Indicadores bibliométricos
Ano	Número de publicações
País	Número de publicações Índice- <i>h</i> Número de citações
Periódico	Número de publicações CiteScore

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2019.

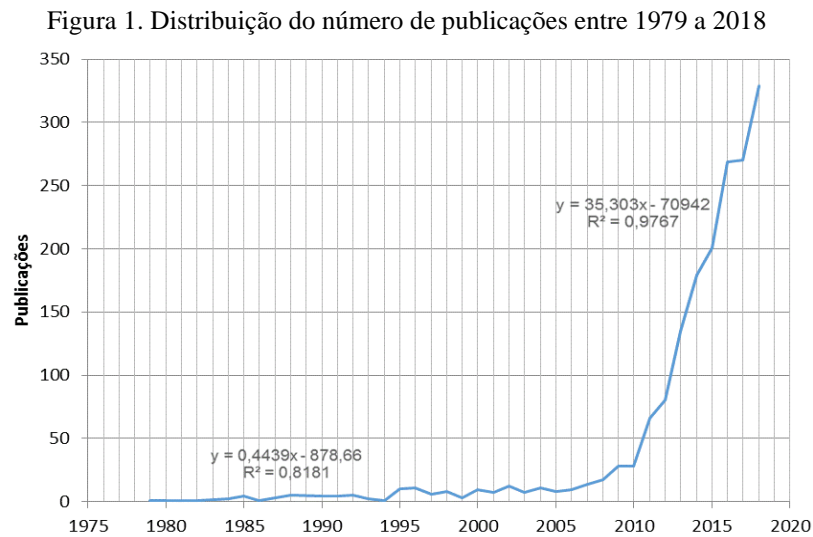
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Documento por ano

De acordo com os descritores utilizados, foram recuperados 1758 resultados na base de dados Scopus. O desenvolvimento de pesquisas sobre tratamento de águas residuárias com microalgas aumentou anualmente nos últimos 40 anos, saltando de 2 publicações em 1979 para 329 em 2018, apresentando um crescimento de 165,5 vezes.

As tendências de crescimento foram analisadas entre 1979 e 2018, por meio da análise de regressão linear, mostrada na Figura 1. Houve basicamente duas tendências de

crescimento, a primeira compreendendo o período de 1979 a 2008 e outra a partir de 2009, sendo 79 vezes maior que a anterior, representando um interesse muito maior pelo tema no meio científico a partir de 2008.



Fonte: Elaborada pelos Autores, 2019.

Os resultados indicam que os estudos continuaram crescendo, indicando a grande relevância do tema no meio científico atual. Segundo Cheah et al. (2016), o cultivo de microalgas para o tratamento de águas residuais vem atraindo o interesse da comunidade científica, pois configura-se como um método ideal para promover simultaneamente a redução de resíduos e a geração de biocombustíveis, auxiliando na diminuição do uso de combustíveis fósseis e promovendo a sustentabilidade ambiental.

#### 4.2. Documento por País

Os 1758 artigos sobre tratamento de águas residuais com microalgas foram publicados por 88 países. A Tabela 1 apresenta os seis principais países relacionados aos artigos publicados sobre o tema. Com relação ao número de publicações, a China liderou o bloco, com um total de 414 artigos, representando 17,86% de todas as publicações. Os Estados Unidos ocuparam a segunda colocação, com 234 publicações, representando 13,31% da produção mundial. Espanha, Índia, Coreia do Sul e Brasil, ficaram nas posições seguintes, com 169, 143, 102 e 91 artigos respectivamente, somando um

percentual de 27,73% das publicações. O percentual de publicações destes seis países representa 59,90 % de todos os artigos, evidenciando a liderança na produtividade destes países em pesquisas na área.

Quando comparados o *h*-index da China (*h*-39) com os Estados Unidos (*h*-52), apesar da China ser o país mais produtivo, os Estados Unidos, por possuir um valor de *h*-i maior, apresentam uma influência acadêmica cerca de 33% mais elevada. A mesma verificação foi feita em relação ao total de citações destes dois países, Estados Unidos à frente com 5270, seguido pela China, com 4889 citações. Para Chen et al. (2017), artigos com maior número de citações indicam alta competitividade de um país em um determinado ramo de pesquisa.

Tabela I. Distribuição de publicação por países

País	Número de publicações	Citações	<i>h</i> -i	Percentual de publicações
China	314	4889	39	17,86
EUA	234	5270	52	13,31
Espanha	169	3001	38	9,61
Índia	143	2021	30	8,13
Coreia do Sul	102	1589	28	5,80
Brasil	91	783	20	5,18

Fonte: Elaborada pelos Autores, 2019.

A Figura 2 apresenta o resultado dos países com maior número de publicações e a colaboração entre eles, na saída de dados do VOSviewer. Os países que produzem pesquisas estão agrupados em 08 comunidades, representadas pelas 8 cores, que são lideradas pela China, Estados Unidos, Espanha, Índia, Brasil, Canadá, Malásia e Reino Unido. A China possui uma rede de colaboração bem definida com os Estados Unidos, Rússia e Hong Kong. A seguir, aparece os Estados Unidos, com forte conexões com a China, México e Coréia do Sul. Segundo Khudzari et al. (2018), a colaboração complementar entre as comunidades internacionais pode ser capaz de promover um crescimento mais acelerado e amplo sobre o tema de pesquisa.



### 4.3. Documento por Periódico

Segundo Liu; Sun; Jiang (2017), na ausência de expressões matemáticas que poderiam calcular diretamente a qualidade da pesquisa, a análise baseada em número de citações, poderia ser usada para esta finalidade. Além disso, os autores relataram que o número de artigos publicados e de citações é usado para medir e comparar a quantidade, a influência e o poder científico de diferentes países e instituições, revelando o interesse pelo desenvolvimento da ciência e tecnologia em determinado segmento.

Os 1758 artigos sobre tratamento de efluentes com microalgas foram publicados em 160 periódicos da Scopus. A Tabela 2 apresenta as 20 revistas mais produtivas, o número de publicações e também o fator CiteScore. A distribuição destas revistas cobre 52,4% (922 publicações) do total de artigos, sugerindo grande produtividade deste grupo de periódicos. A revista com maior produtividade foi a Bioresource Technology, com 317 artigos (18,1%), seguida pela Algal Research com 103 artigos (5,9%), Water Science And Technology com 74 artigos (4,2%), Water Research com 66 artigos (3,7%) e Journal Of Applied Phycology com 49 artigos (2,7%).

Analisando o CiteScore-2018 das 20 revistas mais produtivas (Tabela 2), sete revistas apresentaram um valor superior a 5, sendo bons indicadores das citações recebidas pelos periódicos. Na primeira colocação ficou a Applied Energy (CiteScore =9,54), seguida pela Water Research (CiteScore =8,55), Journal Of Chemical Technology And Biotechnology (CiteScore =7,38), Journal Of Cleaner Production (CiteScore =7,32), Bioresource Technology (CiteScore =7,08), Applied Microbiology And Biotechnology (CiteScore =5,92) e Environmental Science And Technology (FI=5,32).

Nota-se que o maior número de publicações nem sempre corresponde ao maior CiteScore. A revista que apresentou maior CiteScore foi a Applied Energy, ocupando a 11ª colocação em produtividade (20 publicações), enquanto que a Bioresource Technology, com maior produtividade (317 artigos), ocupou a 5ª posição. A Chemical Engineering Transactions, apesar de ter a 9ª posição em produção de artigos, ocupou a última classificação, com um CiteScore de 0,73, sugerindo uma qualidade inferior às demais em termos de citações.

Tabela 2. Distribuição dos 10 principais jornais mais produtivos da pesquisa

Item	Periódico	Publicações	CiteScore - 2018
1	Bioresource Technology	317	7,08
2	Algal Research	103	4,26
3	Water Science And Technology	74	1,55
4	Water Research	66	8,55
5	Journal Of Applied Phycology	49	2,8
6	Desalination And Water Treatment	37	1,36
7	Ecological Engineering	36	3,73
8	Environmental Science And Pollution Research	28	3,14
9	Chemical Engineering Transactions	23	0,73
10	Environmental Technology United Kingdom	21	1,82
11	Applied Energy	20	9,54
12	Journal Of Cleaner Production	20	7,32
13	Applied Biochemistry And Biotechnology	18	2,17
14	Applied Microbiology And Biotechnology	18	5,92
15	Science Of The Total Environment	18	2,88
16	Journal Of Chemical Technology And Biotechnology	16	7,38
17	Environmental Science And Technology	15	5,32
18	Journal Of Environmental Management	15	3,96
19	Biomass And Bioenergy	14	4,08
20	International Biodeterioration And Biodegradation	14	2,47

Fonte: Elaborada pelos Autores, 2019.

A partir das análises realizadas, ficou evidente que o tema de pesquisa analisado neste estudo mostrou-se de relevante interesse científico, uma vez que o número de publicações foi grande em periódicos de alto impacto, representado pelo CiteScore.

Para Garrido-Cardenas et al. (2018), o aumento no interesse pelas pesquisas científicas sobre biotecnologia de microalgas foi devido ao rápido crescimento de instalações para processamento de produtos à base de microalgas, como por exemplo, os compostos de alto valor, como carotenoides e ácidos graxos; nutracêuticos, alimentos e rações;

biomassa para produção de biofertilizantes e biocombustíveis; e biorremediação para águas residuais e gases de combustão.

#### 4.4. Análise de Palavras-chave

Como critério para a análise, foi feita a exclusão da ocorrência das palavras utilizadas como fonte de pesquisa na base de dados Scopus, ou seja, “tratamento de águas residuais”, “microalgas”, e suas variações. Foram agrupados manualmente os termos, e como critério, selecionaram-se as 12 palavras com frequência maior que 250. Estes resultados estão apresentados no diagrama de barras da Figura 3. A palavra “biomassa” é a que possui a maior frequência, correspondendo a 778 vezes, seguida por “biocombustível” (632 vezes), “nutrientes” (494 vezes), “azoto” (481 vezes) e “lipídico” (464 vezes). “Biomassa”, “biocombustível” e “nutrientes” se destacam, aparecendo em 37,1% de todas as publicações.

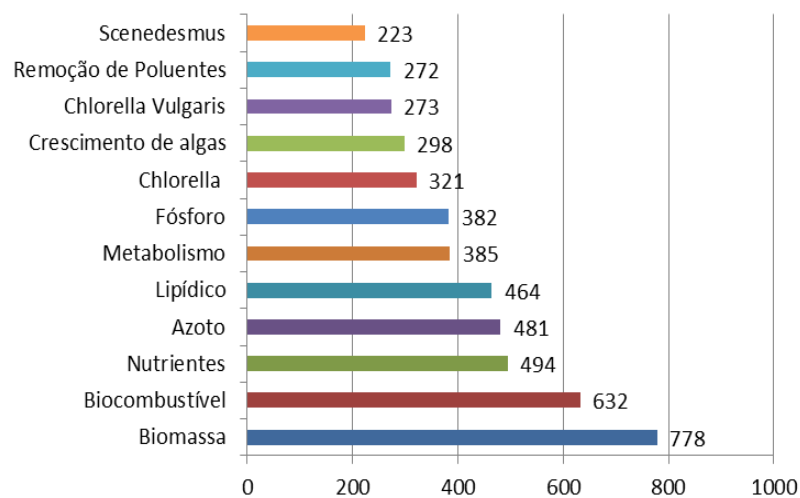
Para Mao et al. (2018), a análise de co-palavras é uma técnica muito valiosa para a verificação de conteúdo de publicações e serve para mostrar o destaque e as tendências de pesquisa, assim como os pontos críticos em diferentes campos.

A análise das palavras-chave forneceu um bom indicativo sobre o desenvolvimento das pesquisas no campo temático estudado. Quando a frequência de repetições é alta, indica que muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas nesta área, como, por exemplo, o cultivo de microalgas ligado à “biomassa”, “biocombustíveis” e “nutrientes”. Também revelou informações sobre as espécies de microalgas estudadas, como a “*Chlorella*”, a “*Chlorella Vulgaris*” e a “*Scenedesmus*”.

Em contrapartida, quando a ocorrência de palavras-chave é baixa, pode ser um indicativo de carência de pesquisas, sugerindo um campo de estudo futuro do assunto no meio acadêmico. As palavras-chave que apresentaram menor ocorrência, como por exemplo, “adsorção”, “metais pesados”, “biofilme”, “imobilização”, “metano”, “floculação”, indicam uma lacuna no campo de pesquisas nestas áreas, uma vez que estão relacionadas às questões muito relevantes dentro do tema. A colheita de microalgas é considerada como um fator limitante ao cultivo, devido ao alto custo requerido com energia (ANSARI et al., 2019). Porém houve uma baixa frequência de

repetição desta palavra, aparecendo 78 vezes. Assim, estudos sobre métodos viáveis de colheita, são orientações importantes para futuras pesquisas.

Figura 3. Distribuição das 12 palavras-chaves com maiores ocorrências



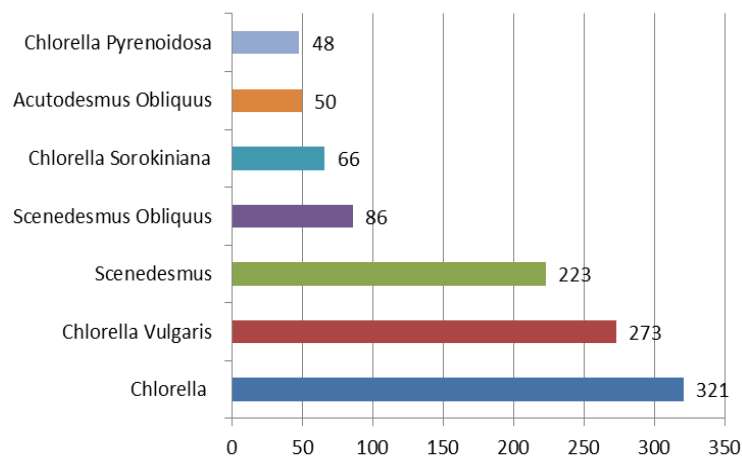
Fonte: Elaborada pelos Autores, 2019.

Com o auxílio do VOSviewer, foi feita a distribuição dos grupos e as conexões estabelecidas de todas as palavras-chave identificadas nos 1758 artigos, como mostrado na Figura 4. Três grupos podem ser observados, representados por três cores. O grupo verde, com a palavra-chave “microalga” no centro, possui fortes conexões com as palavras-chave “biomassa”, “crescimento de algas” e “biocombustível”, sugerindo a relevância das pesquisas relacionadas com as condições de cultura de microalgas para a produção de biocombustíveis.

O grupo vermelho, cuja palavra central é “tratamento de esgoto”, está ligado fortemente às palavras-chave “nitrogênio”, “remoção de poluentes” e “*Chlorella Vulgaris*”, denotando o uso da *Chlorella Vulgaris* na remoção de poluentes e nitrogênio de águas residuais. O grupo azul está centrado na palavra-chave “águas residuais”, e estabelece maiores conexões com “metabolismo”, “biorremediação” e “desenvolvimento e crescimento”, apontando uma forte influência de pesquisas com foco no aperfeiçoamento das condições metabólicas associadas à biorremediação.



Figura 5. Distribuição das 7 espécies de microalgas com maior ocorrência nas palavras-chave



Fonte: Elaborada pelos Autores, 2019.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou as pesquisas sobre tratamento de águas residuais com microalgas no período de 1979 a 2018, por meio de análise bibliométrica, com o objetivo de revelar o status atual das tendências das pesquisas no meio científico e sugerir o desenvolvimento de novos estudos. Foram recuperados 1758 artigos na base de dados do Scopus, da Editora Elsevier, publicados por 127 instituições em 88 países.

As tendências de crescimento foram estudadas por meio da análise de regressão linear, indicando um grande avanço do número de pesquisas nos últimos 40 anos. A China e os Estados Unidos foram os países com maior número de publicações e maior colaboração entre eles. A Bioresource Technology foi apontada como a revista que, além de deter o maior número de publicações, também apresentou a maior quantidade de citações (8893) e o maior índice-*h* ( $h-i=60$ ).

Os resultados da análise de palavras-chave mostram que as pesquisas concentram-se em três questões, que são os estudos sobre microalgas, com foco principalmente na produção de biomassa, métodos de cultivo e desenvolvimento de biocombustíveis; estudos sobre tratamento de águas residuais, focando na remoção de poluentes e de nitrogênio, usando a espécie *Chlorella Vulgaris*, com maior frequência; estudos sobre

águas residuais, com fortes tendências em pesquisas sobre o metabolismo, biorremediação e melhoramento do crescimento das microalgas.

A microalga *Chlorella* (321 vezes), *Chlorella Vulgaris* (273 vezes) e *Scenedesmus* (223 vezes) apareceram numa ocorrência de mais de 200 vezes cada uma, indicando uma forte tendência de pesquisas com estas espécies para o tratamento de efluentes residuais.

A co-ocorrência da palavra-chave “colheita” foi baixa, indicando uma lacuna no campo de pesquisas nesta área. Uma vez que este termo está relacionado às questões muito relevantes dentro do tema, por ser considerada como um fator limitante ao cultivo devido ao alto custo associado, este artigo aponta para a necessidade de estudos futuros sobre métodos viáveis de colheita.

Neste artigo, ficou evidente que o tema de pesquisa analisado mostrou-se de relevante interesse científico, uma vez que o número de publicações foi grande em periódicos de alto impacto. Finalmente, este estudo forneceu uma análise para ampliar o conhecimento sobre as publicações relacionadas ao assunto, permitindo que os pesquisadores concentrem suas pesquisas no preenchimento de lacunas no assunto e contribuam de maneira mais eficaz para a ciência, fornecendo uma referência útil para acadêmicos, pesquisadores e tomadores de decisão.

## Referências

ABDEL-RAOUF, N.; AL-HOMAIAN, A.A.; IBRAHEEM, I.B.M. Microalgae and wastewater treatment. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 19, n. 3, p. 257-275, 2012.

ANSARI, Ahmad; RAVINDRAN, Balasubramani; GUPTA, Sanjay Kumar; NARS, Mahmoud; RAWAT, Ismail; BUX, Faizal. Techno-economic estimation of wastewater phycoremediation and environmental benefits using *Scenedesmus obliquus* microalgae. **Journal of Environmental Management**, v. 240, p. 293-302, 2019.

CHEAH, Wai Yan; SHOW, Pau Loke; JUAN, Joon Ching; CHANG, Jo-Shu; LING, Tau Chuan. Microalgae cultivation in palm oil mill effluent (POME) for lipid production and pollutants removal. **Energy Conversion and Management**, v. 174, n. 15, p. 430-438, 2018.

CHUEKE, Gabriel Vouga; AMATUCCI, Marcos. O que é bibliometria? Uma introdução ao Fórum. **Revista Eletrônica de Negócios Internacionais**, v. 10, n. 2, p. 1-5, 2015.

ELSEVIER, Editora. Disponível em <<https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/scopus>>. Acesso em 20 nov. 2019.

GARRIDO-CARDENAS, Jose Antonio; MANZANO-AGUGLIARO, Francisco; ACIEN-FERNADEZ, Francisco Gabriel; MOLINA-GRIMA, Emilio. Microalgae research worldwide. **Algal Research**, v. 35, p. 50-60, 2018.

GONÇALVES, Ana L.; PIRES, José C. M.; SIMÕES, Manuel. A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. **Algal Research**, v. 24, p. 403-415, 2017.

HENKANATTE-GEDERA, S.M; SELAVARATNAM, T.; KARBAKSHRAVARI, M.; MYINT, M.; NIRMALAKHANDAN, N.; VAN VOORHIES, W.; LAMMERS, Peter J. Removal of dissolved organic carbon and nutrients from urban wastewaters by *Galdieria sulphuraria*: Laboratory to field scale demonstration. **Algal Research**, v. 24, p. 450-456, 2017.

KAMDEM, Jean Paul; DUARTE, Antonia Eliene; LIMA, Kátia Regina Rodrigues; rocha, João Batista Teixeira; HASSAN, Waseem; BARROS, Luiz Marivando; ROEDER, Thomas; TSOPMO, Apollinaire. Research trends in food chemistry: A bibliometric review of its 40 years anniversary (1976–2016). **Food Chemistry**, v.294, p. 448-457, 2019.

KHUDZARI, Jauharah Md; KURIAM, Jiby; TARTAKOVSKY, Boris; RAGHAVAN, G.S.Vijaya. Bibliometric analysis of global research trends on microbial fuel cells using Scopus database. **Biochemical Engineering Journal**, v. 136, p. 51-60, 2018.

LAHIRI, S.; KUMAR, V. Ranking international business institutions and faculty members using research publication as the measure. **Management International Review**, v.52, p. 317-340, 2012.

LI, Jing; WU, Dengsheng; LI, Jianping; LI, Minglu. A comparison of 17 article-level bibliometric indicators of institutional research productivity: Evidence from the information management literature of China. **Information Processing & Management**, v. 53, n. 5, p. 1156-1170, 2017.

LI, Nan; HAN, Ruru; LU, Xiaohui. Bibliometric analysis of research trends on solid waste reuse and recycling during 1992–2016. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 130, p. 109-117, 2018.

MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion - a review. **Renew. Sustainable Energy Rev.**, v. 16, p. 2566-2582, 2012.

MAO, Guozhu; LIU, Xi; DU, Huibin; ZUO, Jian; WANG, Linyuan. Way forward for alternative energy research: A bibliometric analysis during 1994–2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 276-286, 2015.

MAO, Guozhu; HUANG, Ning; CHEN, Lu; WANG, Hongmei. Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis. **Science of The Total Environment**, v. 635, p. 1081-1090, 2018.

OKUBO, Yoshiko – Bibliometric indicators and analysis of research systems: methods and examples. **OECD Science, Technology and Industry Working Papers**. 71 p., 1997.

PATEL, B.; GUO, M.; IZADPANA, A.; SHAH, N.; HELLGARDT, K. A review on hydrothermal pre-treatment technologies and environmental profiles of algal biomass processing. **Bioresource Technology**, v. 199, p. 288-299, 2016.

RAJASULOCHANA, P.; PREETHY, V. Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review. **Resource-Efficient Technologies**, v. 2, n. 4, p. 175-184, 2016.

VAN DEN HENDE, Sofie; VERVAEREN, Han; DESMET, Sem; BOON, Nico. Biofloculation of microalgae and bacteria combined with flue gas to improve sewage treatment. **New Biotechnology**, v. 29, n. 1, p. 23-31, 2011.

VANZETTO, Guilherme Vitor; THOMÉ, Antonio. Bibliometric study of the toxicology of nano-scale zero valent iron used in soil remediation. **Environmental Pollution**, v.252, p. 74-83, 2019.

WAYNE, Chew Kit; REEN, Chia Shir; SHOW, Pau Loke; JIUN, Yap Yee; CHUAN, Ling Tau; CHANG, Lo-Shu. Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. **Journal of the Tiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 91, p. 332-344, 2018.

ZHU, A.; GUO, J.; NI, B.J.; WANG, S.; YANG, Q.; PENG, Y. Um novo protocolo para calibração de modelo no tratamento biológico de águas residuais. **Science Rep.**, v. 5, p. 84-93, 2015.

Recebido em: 14/05/2020

Aceito em: 05/12/2020

Endereço para correspondência:

Nome: Aline Antonia Castro

Email: alineantoniacaastro@yahoo.com.br



Esta obra está licenciada sob uma [Licença Creative Commons Attribution 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

### **3.3 Artigo 3: Dessulfurização de biogás por processo fotossintético com microalgas e absorção por lavagem com água<sup>3</sup>**

---

<sup>3</sup> Artigo publicano na Revista Research, Society and Development, v. 11, n. 10, e388111032891, 2022 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32891>. A revista possui *Qualis* A3 na avaliação 2017-2019. Autores: Castro, A. C.; Junges, E. L.; Marder, M.; Mörs, J.; Konrad, O.

## Dessulfurização de biogás por processo fotossintético com microalgas e absorção por lavagem com água

Biogas desulfurization by photosynthetic process with microalgae and absorption by washing with water

Desulfuración de biogás por proceso fotosintético con microalgas y absorción por lavado con agua

Recebido: 12/07/2022 | Revisado: 25/07/2022 | Aceito: 27/07/2022 | Publicado: 05/08/2022

**Aline Antonia Castro**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5583-9506>

Universidade do Vale do Taquari, Brasil

E-mail: [alineantoniacaastro@yahoo.com.br](mailto:alineantoniacaastro@yahoo.com.br)

**Estevan Luiz Junges**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8662-2980>

Universidade do Vale do Taquari, Brasil

E-mail: [estevanjunges@gmail.com](mailto:estevanjunges@gmail.com)

**Munike Marder**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1388-4306>

Universidade do Vale do Taquari, Brasil

E-mail: [mmarder@univates.br](mailto:mmarder@univates.br)

**Joice Mörs**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0738-9429>

Universidade do Vale do Taquari, Brasil

E-mail: [Joice.mors@universo.univates.br](mailto:Joice.mors@universo.univates.br)

**Odorico Konrad**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6968-7969>

Universidade do Vale do Taquari, Brasil

E-mail: [okonrad@univates.br](mailto:okonrad@univates.br)

### Resumo

O biogás apresenta alto potencial para ser usado na geração de eletricidade e de calor e em substituição ao combustível veicular, favorecendo a diminuição da dependência por combustíveis fósseis. Para que o biogás possa ser utilizado com segurança e eficácia, o H<sub>2</sub>S precisa ser removido a níveis toleráveis para o fim a que se destina. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de um purificador em escala piloto para promover a dessulfurização do biogás, usando o processo fotossintético com microalgas e o processo de absorção por lavagem com água à pressão atmosférica. Os resultados das análises de cromatografia gasosa do biogás bruto mostraram concentrações de H<sub>2</sub>S acima de 1.000 ppm. Para o sistema fotossintético com microalgas, o teor de H<sub>2</sub>S no biogás purificado foi reduzido para 11 ppm com 30 minutos de operação e aos 180 minutos houve a remoção completa, permanecendo assim até o final do ciclo diário de funcionamento. Para o sistema de lavagem com água, apesar do gás sulfídrico no biogás purificado ter diminuído consideravelmente no intervalo estudado, percebeu-se o aumento do teor ao longo do tempo, com as leituras variando de 37,8 ppm a 188,4 ppm, indicando a possibilidade de ocorrência de saturação total deste componente, caso o sistema trabalhe ininterruptamente. Assim, a remoção do gás sulfídrico por meio do processo biológico com microalgas foi realizada com sucesso em purificador em escala piloto, sendo seu desempenho classificado como promissor, fornecendo condições apropriadas para dessulfurização do biogás.

**Palavras-chave:** Biogás; Dessulfurização; Microalgas; Purificador.

### Abstract

Biogas has high potential to be used in the generation of electricity and heat and as a replacement for vehicular fuel, favoring the reduction of dependence on fossil fuels. In order for biogas to be used safely and effectively, H<sub>2</sub>S needs to be removed at levels tolerated for its intended purpose. The objective of this work was to evaluate the potential of a pilot scale scrubber to promote biogas desulfurization using the photosynthetic process with microalgae and the absorption process by washing with water at atmospheric pressure. The crude biogas presented H<sub>2</sub>S concentration above 1.000 ppm, by gas chromatography analysis. For the photosynthetic system with microalgae, the concentration of H<sub>2</sub>S in the purified biogas was reduced to 11 ppm with 30 minutes of operation and at 180 minutes it was completely removed, remaining so until the end of the daily cycle of system operation. For the water washing system, despite the concentration of hydrogen sulphide in the purified biogas having decreased considerably in the studied

interval, an increase in the content was noticed over time, with readings ranging from 37,8 ppm to 188,4 ppm, indicating that there may be total saturation of this component, if the system works uninterruptedly. Thus, the removal of hydrogen sulphide through the biological process with microalgae was successfully performed in a pilot scale purifier, and its performance was classified as promising, providing appropriate conditions for desulfurization of biogas.

**Keywords:** Biogas; Desulfurization; Microalgae; Purifier.

### Resumen

El biogás tiene un alto potencial para ser utilizado en la generación de electricidad y calor y como sustituto del combustible vehicular, favoreciendo la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. Para que el biogás se use de manera segura y efectiva, el H<sub>2</sub>S debe eliminarse a niveles tolerados para el propósito previsto. El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de un lavador a escala piloto para promover la desulfuración de biogás mediante el proceso fotosintético con microalgas y el proceso de absorción por lavado con agua a presión atmosférica. El biogás crudo presentó concentración de H<sub>2</sub>S superior a 1.000 ppm, por análisis de cromatografía de gases. Para el sistema fotosintético con microalgas, la concentración de H<sub>2</sub>S en el biogás purificado se redujo a 11 ppm con 30 minutos de operación y a los 180 minutos se eliminó por completo, permaneciendo así hasta el final del ciclo diario de operación del sistema. Para el sistema de lavado de agua, a pesar de que la concentración de sulfuro de hidrógeno en el biogás purificado disminuyó considerablemente en el intervalo estudiado, se notó un aumento en el contenido con el tiempo, con lecturas que van desde 37,8 ppm a 188,4 ppm, lo que indica que puede haber total saturación de este componente, si el sistema funciona ininterrumpidamente. Así, la remoción de sulfuro de hidrógeno a través del proceso biológico con microalgas se realizó con éxito en un purificador a escala piloto, y su desempeño fue catalogado como prometedor, brindando las condiciones adecuadas para la desulfuración del biogás.

**Palabras clave:** Biogás; Desulfuración; Microalgas; Purificador.

## 1. Introdução

O biogás é um produto decorrente da digestão anaeróbia de material orgânico, com potencial de ser usado na geração de eletricidade e de calor e em substituição ao combustível veicular, favorecendo a diminuição da dependência por combustíveis fósseis (Dewil et al., 2006; Zhang et al., 2020). O biogás é composto principalmente de metano (40–75%), gás carbônico (25–50%) e outros componentes em menores teores, como o gás sulfídrico (0,005–2%), oxigênio (<1%), nitrogênio (<2%), siloxanos (<0,02%), amônia (<1%) e hidrocarbonetos halogenados (<0,6%) (Aziz et al., 2020; Konrad et al., 2016; Ryckebosch et al., 2011).

O metano (CH<sub>4</sub>) é o principal componente de interesse do biogás e os demais são apontados como impurezas (Rodero et al., 2018). O gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) é um tipo de gás tóxico, incolor, solúvel em água, corrosivo e inflamável, podendo causar enormes prejuízo à saúde humana (Cai et al., 2017; Vikrant et al., 2018). Ainda que em baixa quantidade, o H<sub>2</sub>S presente no biogás é considerado um dos poluentes mais prejudiciais ao ambiente, além de causar corrosão grave em máquinas e equipamentos, tais como motores, dutos, bombas, tanques de armazenamento, compressores e válvulas (Cristiano et al., 2020; Jiang et al., 2020).

Além do mais, o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), formado pela combustão de H<sub>2</sub>S, configura-se ainda mais perigoso do que o H<sub>2</sub>S, pois sua inalação pode desencadear problemas respiratórios e cardiovasculares. O resultado das reações químicas que acontecem entre SO<sub>2</sub> com o vapor de água na atmosfera é a formação dos ácidos sulfúrico, nítrico e nitroso, provocando a chamada chuva ácida (Noorain et al., 2019b).

Assim, para que o biogás possa ser utilizado com segurança e eficácia, o H<sub>2</sub>S precisa ser removido. Os requisitos de aproveitamento energético do biogás determinam concentração de H<sub>2</sub>S com valores máximos de 1.000 ppm para aquecimento em caldeiras, 150 ppm para motores de combustão interna, 3,5 ppm para combustíveis veiculares e injeção em rede de gás natural, e 0,1 ppm para células a combustível (Cristiano et al., 2020; Rasi et al., 2011).

Para atender as exigências de aplicação de biogás, os principais métodos de remoção de H<sub>2</sub>S incluem métodos físico- químicos e biológicos (Jiang et al., 2020). As tecnologias atualmente mais utilizadas para a retirada do gás sulfídrico e siloxano, está focada principalmente na absorção gás-líquido (Huttenhuis et al., 2007; Schweigkofler & Niessner, 2001),

adsorção de carvão ativado (Cabrera-Codony et al., 2018; Pipatmanomai et al., 2009) ou materiais à base de óxido de ferro (Cherosky & Li, 2013; Cristiano et al., 2020) e degradação biológica (Arespacochaga et al., 2014; Li et al., 2014; Popat & Deshusses, 2008; Tu et al., 2016).

A tecnologia de absorção gás-líquido por lavagem com água em alta pressão é o método comercialmente mais utilizado para purificação do biogás, devido à simplicidade da metodologia e segurança dos resultados (Ghaib & Ben-Fares, 2018). Neste processo, a água é utilizada como solvente para retirada das impurezas gasosas, especialmente o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e o H<sub>2</sub>S, por meio de técnicas de absorção (Van der Heyden et al., 2016). Assim, os elementos do biogás com solubilidade maior, como o CO<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub>S, são dissolvidos e retirados juntos com a água. Apesar deste sistema apresentar elevada eficiência de remoção, são verificadas algumas desvantagens como alto custo despendido com produtos químicos oxidantes, elevado consumo de energia e exigência de tratamento ou disposição final adequada para o efluente gerado (Awe et al., 2017).

Por sua vez, a lavagem com água à pressão próxima à atmosférica necessita de um consumo menor de energia. Porém, é uma tecnologia que ainda não está disponível comercialmente, limitando-se às instalações de pequeno porte (Budzianowski et al., 2017). Outra limitação deste método é o baixo desempenho de purificação (Noorain et al., 2019b).

Os métodos de degradação biológica apresentam benefícios como custos operacionais mais baixos, menor emissão de materiais poluentes secundários e não necessitam do uso de reagentes químicos (Cano et al., 2018). Neste processo, os microrganismos têm a possibilidade de conversão separadamente do H<sub>2</sub>S em um coproduto, que é o enxofre elementar, que pode ser reciclado com facilidade, pois é um produto químico importante para determinadas utilizações, podendo ser comercializado ou usado como fertilizante agrícola. Entre os reatores biológicos para tratamento de H<sub>2</sub>S, o biofiltro, o filtro de biogotejamento e o biolavador têm sido largamente usados (Li et al., 2015; Valle et al., 2018).

O filtro de biogotejamento tem a capacidade de retirar elevada concentração de H<sub>2</sub>S (Zhou et al., 2015). O enxofre elementar gerado não é solúvel em água, acumulando-se gradativamente nos elementos de embalagem, diminuindo a eficiência do método, pois causa maiores quedas de pressão e entupimento do leito. Para garantir a eficiência desta tecnologia, existe a necessidade de retro lavagem do enxofre junto ao leito (Vikrant et al., 2018). No entanto, devido ao enxofre elementar permanecer aderido ao biofilme filtrante, a sua lavagem para fora do leito torna-se muito difícil, impossibilitando a sua reciclagem (Jiang et al., 2020).

Uma possível alternativa sob a ótica ambiental e econômica, está baseada na purificação fotossintética do biogás em fotobiorreatores contendo consórcio de microalgas e bactérias (Ángeles et al., 2020). As microalgas usam a luz para fixar o CO<sub>2</sub> do biogás liberando O<sub>2</sub>. O H<sub>2</sub>S é então oxidado a sulfato usando o O<sub>2</sub> produzido pela fotossíntese. O sulfato, por sua vez, é utilizado como fonte de nutrição para o crescimento das microalgas (Rodero et al., 2018; Toledo-Cervantes et al., 2017). Ainda, a biomassa microalgal produzida no processo pode ser usada como biofertilizante ou matéria-prima para geração de biogás (Esther Posadas et al., 2017).

Sendo assim, a purificação fotossintética do biogás, em fotobiorreatores fechados, associada ao aproveitamento da biomassa de microalgas, consiste em uma opção econômica e sustentável, no formato de economia circular. No entanto, faltam estudos dedicados a avaliar e otimizar o desempenho a longo prazo dessa tecnologia (Ángeles et al., 2020).

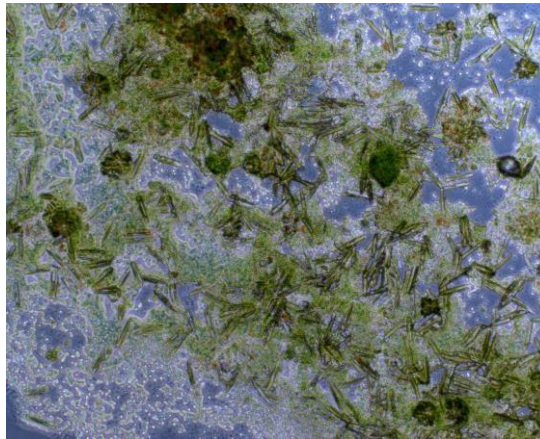
Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de um purificador em escala piloto do tipo tanque interligado à coluna de absorção para dessulfurização do biogás, usando o processo fotossintético com microalgas e o processo de absorção por lavagem com água à pressão atmosférica.

## 2. Material e Método

### 2.1 Microrganismos e biogás

Um consórcio de microalgas e bactérias, aqui chamado apenas por microalgas, foi utilizado nos experimentos. Os microrganismos foram coletados em uma lagoa de tratamento de efluente de uma indústria alimentícia localizada no Vale do Taquari - RS. As microalgas foram transportadas em baldes até o local do experimento. A Figura 1 mostra a microscopia dos microrganismos usados.

**Figura 1.** Consórcio de microalgas/bactérias.



Fonte: Autores (2022).

A utilização do consórcio de microalgas/bactérias foi devido à sua grande disponibilidade na região local, evitando gastos com a aquisição de cepas de microalgas isoladas. Além disso, a partir da análise da literatura atual internacional, ótimos resultados de pesquisas foram obtidos quanto à viabilidade de purificação do biogás usando esta forma de consórcio (Franco- Morgado et al., 2021; Meier et al., 2018; Posadas et al., 2015; Rodero et al., 2019; Xu et al., 2020).

O potencial da simbiose microalgas/bactérias para a purificação do biogás foi demonstrado eficiente em fotobiorreatores, onde o oxigênio liberado para o meio de cultivo pela fotossíntese é usado pelas bactérias para oxidação do  $H_2S$  em enxofre (Ángeles et al., 2020).

O digestato, que é um subproduto resultante da digestão anaeróbia do digestor na produção de biogás, foi usado como fonte de nutrição para o crescimento das microalgas. Sua escolha foi devido ao baixo custo, à facilidade de obtenção, e principalmente por promover a sustentabilidade no processo.

Em sua composição, o digestato possui elementos essenciais para o desenvolvimento dos microrganismos, apresentando macronutrientes como o nitrogênio, fósforo e potássio, e micronutrientes como cálcio, manganês e cobre. Atualmente o digestato é utilizado como biofertilizante para a agricultura, porém pode causar problemas ambientais em decorrência de formas inadequadas no manuseio, armazenamento e aplicação, como por exemplo, a lixiviação de nitrato, saturação de fósforo e emissão de amônia (Toledo-Cervantes et al., 2017).

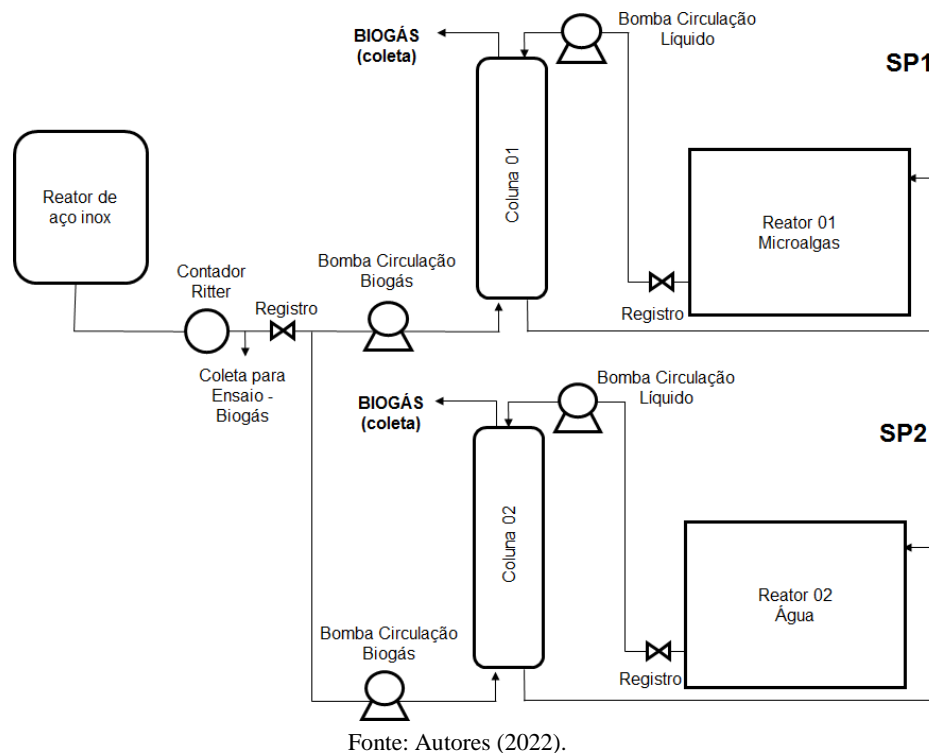
O biogás usado nos experimentos foi gerado em um reator de inox com capacidade de 1,0 m<sup>3</sup>, preenchido com 0,7 m<sup>3</sup> de biomassa, mantido em temperatura mesofílica (35 °C). O filtro de carvão ativado instalado no biodigestor, usado para remoção de  $H_2S$ , foi retirado durante os ensaios. A finalidade foi aumentar o teor deste componente no biogás bruto.

## 2.2 Configuração da planta piloto

O protótipo foi instalado no Centro de Pesquisa em Energias e Tecnologias Sustentáveis (CEPTS), Setor D, Prédio 26, TECNOVATES, Univates - Lajeado - RS. A planta piloto foi projetada com a finalidade de permitir o cultivo da maioria das espécies de microalgas e de facilitar o controle dos parâmetros de cultivo, bem como os parâmetros operacionais, como o pH e a injeção do biogás. A facilidade de montagem, o uso de materiais de fácil acesso e de baixo custo também foram levados em conta no desenvolvimento do protótipo.

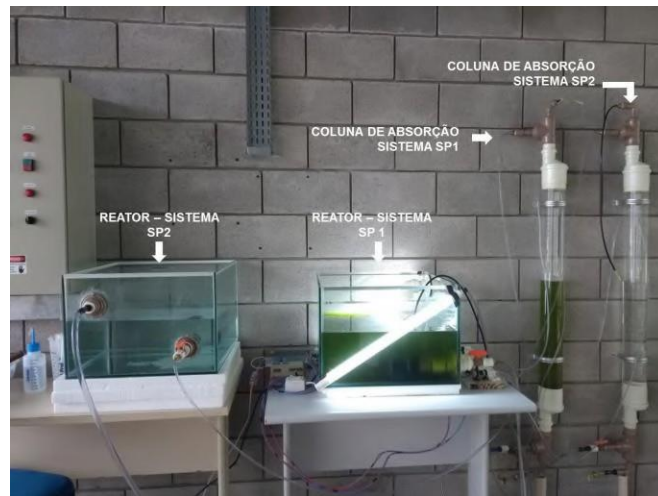
A planta piloto foi composta por dois conjuntos de purificadores de dois estágios, denominados de Sistema de Purificação 1 (SP1) e Sistema de Purificação 2 (SP2). Para o SP1 foi usado o processo biológico com microalgas, já para o SP2, o processo foi o de lavagem com água à pressão atmosférica. Cada sistema foi constituído por um tanque, denominado de reator, conectado a uma coluna de transferência de massa, denominada de coluna de absorção (Figura 2).

**Figura 2.** Configuração esquemática da planta piloto.



Os reatores foram confeccionados em vidro temperado com espessura de 8mm, dimensões de 0,50x0,50x0,35 m (largura x comprimento x altura), com tampa contendo uma abertura, com volume total de 87,50 L. As colunas de absorção, foram constituídas em polimetilmetacrilato transparente, com diâmetro de 0,10 m e altura de 1,0 m, com volume total de 8,54 L (Figura 3).

**Figura 3.** Sistemas de purificação de biogás.



Fonte: Autores (2022).

As partes constituintes foram interligadas por meio de conexões de policloreto de vinila (PVC). Foram instalados filtros nas tubulações internas do reator, na saída de água para as colunas, confeccionados com tela de fios de polietileno de alta densidade, cuja finalidade foi evitar o entupimento e o eventual mau funcionamento das bombas de água.

O líquido do reator foi circulado para a coluna de absorção de forma descendente, retornando para o tanque pela parte inferior da coluna, e retornando ao reator pela parte superior. O biogás foi injetado na coluna de absorção de forma ascendente, ou seja, em contra fluxo ao líquido. O biogás bruto foi coletado para análise antes de passar pela bomba de circulação e o biogás purificado foi coletado na parte superior das colunas de absorção (FIGURA 4). Para garantir a uniformidade e reduzir o tamanho das bolhas geradas pelo biogás, e assim melhorar a transferência de massa gás/ líquido, foi utilizada pedra difusora porosa, localizada na parte inferior das colunas.

**Figura 4.** Fluxo do líquido e do biogás.



Fonte: Autores (2022).

Para circulação do líquido e do biogás foram usadas bombas do modelo Minibomba D'água Rs-385, de dimensões 90x40x35mm, com diâmetro de saída interno de 6mm e externo de 9mm, com vazão máxima aproximada de 1,5 a 2 L.min<sup>-1</sup>. Foi usado um equipamento contador de giros denominado de Ritter, modelo TG 0.5, para o monitoramento da vazão do biogás na entrada dos sistemas. A vazão da água foi monitorada medindo-se o volume ao longo do tempo, utilizando becker e cronômetro.

### 2.3 Condições operacionais

Os sistemas SP1 e SP2 foram operados de forma independente, mantendo-se as mesmas condições quanto ao volume de líquido, vazão de biogás e líquido, e temperatura. O biogás bruto foi fornecido de forma concomitante aos dois sistemas.

As condições de temperaturas ambientes foram usadas para ambos os sistemas. A iluminação fornecida ao SP1 foi composta por 2 lâmpadas tubulares *Light Emitting Diode* (LED), branca de 9W, fluxo luminoso de 900 lúmens, posicionadas diagonalmente em paredes opostas do reator. O fotoperíodo adotado foi de 24 horas. Para o SP2, a iluminação foi a natural.

No sistema SP1, o reator foi preenchido com 45,0 L de água de torneira e inoculado com 8,0 L da cultura de microalgas/bactérias, totalizando um volume de 53,0 L. A aclimação das microalgas foi realizada por 9 dias. Com o objetivo de manutenção da fase exponencial de crescimento, o sistema foi operado em regime contínuo de alimentação, usando o digestato da geração do biogás como meio de nutrição para as microalgas, com fluxo de 1,0 L.dia<sup>-1</sup>. O digestato foi adicionado sempre ao final do dia, após a realização das leituras, com a retirada simultânea do mesmo volume do caldo de cultivo.

No sistema SP2, o reator foi preenchido com água de torneira, como o mesmo volume total do SP1, ou seja, 53,0 L. O volume do líquido da coluna de absorção foi de 4,6 L para ambos os sistemas.

Tanto para o SP1, quanto para o SP2, a circulação do líquido foi mantida a uma vazão de 52,5 L.h<sup>-1</sup> e a circulação do biogás a uma vazão de 15,0 L.h<sup>-1</sup>, resultando numa relação líquido/biogás de 3,5. Esta relação foi a mesma usada nos estudos de Rodero et al. (2019).

O pH do líquido dos reatores foi monitorado diariamente. Para o SP1, a manutenção do pH foi mantida em torno de 7,6 a 8,0 mediante a adição de NaHCO<sub>3</sub>, numa concentração de 4.000 mg.L<sup>-1</sup>, de acordo com os estudos de Toledo-Cervantes et al. (2016). A correção do pH era realizada anteriormente à ligação do sistema, caso a leitura apontasse valores inferiores ao desejado. A Tabela 1 apresenta o resumo das condições operacionais usadas durante os experimentos.

**Tabela 1.** Condições operacionais dos experimentos.

Condições operacionais	Sistema SP1 (microalgas)	Sistema SP2 (água)
Temperatura	Ambiente	Ambiente
Iluminação	LED (2 x 9W)	Natural
Fotoperíodo	24 horas	Natural
Nutrição	Digestato do HomeBiogás (1 L.dia <sup>-1</sup> )	-
pH	7,6 – 8 (NaHCO <sub>3</sub> – 4.000mg.L <sup>-1</sup> )	Sem controle
Vazão do líquido	52,5 L.h <sup>-1</sup>	52,5 L.h <sup>-1</sup>
Vazão do biogás	15,0 L.h <sup>-1</sup>	15,0 L.h <sup>-1</sup>
Relação QL/QG (líquido/biogás)	3,5	3,5
Duração do experimento	42 dias	42 dias

Fonte: Autores (2022).

Os ensaios foram realizados num período de 42 dias, no intervalo de 5 de novembro e 17 de dezembro de 2021. A aclimação das microalgas no sistema SP1 foi feita no intervalo de 5 a 14 de novembro. A partir do dia 15 de novembro, o biogás foi introduzido nos sistemas SP1 e SP2 e as leituras foram realizadas. O tempo de operação foi de 5 horas diárias.

As coletas para a análise cromatográfica do teor de H<sub>2</sub>S foram realizadas duas vezes por semana, por 5 semanas. Portanto, foram feitas 10 amostragens, sendo que cada uma foi realizada com biogás bruto, biogás purificado pelo SP1 e biogás purificado pelo SP2, totalizando 30 resultados.

## 2.4 Procedimentos analíticos

O aparelho usado para a determinação de pH foi o pHmetro digital da marca DIGIMED, modelo DM-2P. Os valores de pH foram obtidos no período estacionário, anteriormente à ligação do sistema (pH inicial) e depois do seu desligamento (pH final), e os valores apresentados pela média das leituras feitas em triplicata. As temperaturas ambientais diárias foram fornecidas pelo Núcleo de Informações Hidrometeorológicas da Univates, localizado em Lajeado – RS.

Foi usado o cromatógrafo gasoso, modelo Arnel Engineered Solution GC Clarus 580, para a determinação da concentração de H<sub>2</sub>S no biogás. O biogás foi coletado em *bags* da marca Thermoareen LB-2. As coletas foram realizadas duas vezes por semana, com amostras do biogás bruto e purificado.

Foi usado o aparelho portátil denominado de Dräger X-am 7000 para determinação da concentração ao longo do tempo do componente H<sub>2</sub>S do biogás purificado. O equipamento foi instalado em cada saída dos sistemas SP1 e SP2. As leituras foram realizadas a cada trinta minutos, durante 05 horas diárias, duas vezes por semana, nos mesmos dias da coleta para a cromatografia. Os resultados apresentados foram fornecidos com os valores médios diários, com seu desvio-padrão correspondente.

## 3. Resultados e Discussões

Os resultados da pesquisa e as discussões foram referentes às análises da concentração de H<sub>2</sub>S do biogás afluente e efluente ao protótipo de purificador, analisando a eficiência de dessulfurização pelos processos SP1 e SP2. Os efeitos da temperatura e do pH sobre os sistemas de purificação também foram avaliados.

### 3.1 Efeito da temperatura

As temperaturas ambientes registradas durante os experimentos variaram de 13,6 °C, durante à noite, e 39,4 °C, durante o dia, enquanto os sistemas estavam em funcionamento. Em climas temperados, essas variações na temperatura são normais em ensaios em condições naturais, oscilando entre 10 e 45 °C, conforme relatos de Ras, Steyer e Bernard (2013) e Salama et al. (2018).

Em processo de purificação fotossintética do biogás, um fator determinante diz respeito à temperatura (Jacob et al., 2020). Quanto maior for a temperatura, maior será a capacidade de fixação do CO<sub>2</sub> presente no biogás pelas microalgas, melhorando a taxa de crescimento da biomassa. Como resultado, também ocorre a redução do teor do H<sub>2</sub>S no meio de cultivo (Franco et al., 2012; Meier et al., 2017).

Além disso, a variação da temperatura influencia no equilíbrio entre a vazão de líquido e biogás no processo, pois interfere na taxa de dessorção ou absorção dos componentes do biogás. A transferência de massa e a temperatura são grandezas inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior for a temperatura, menor será a transferência de massa gás/líquido. Assim, as temperaturas mais baixas resultam em maior solubilidade do CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S e possibilitam aumento de remoção destes componentes do biogás (Meier et al., 2017).

No entanto, se o meio de cultivo apresentar alcalinidade média a alta, o impacto da temperatura não é relevante. Temperaturas mais altas podem ser compensadas pela elevação da alcalinidade, que é um aspecto essencial para garantir melhor transferência de massa entre gás e líquido (Rodero et al., 2018).

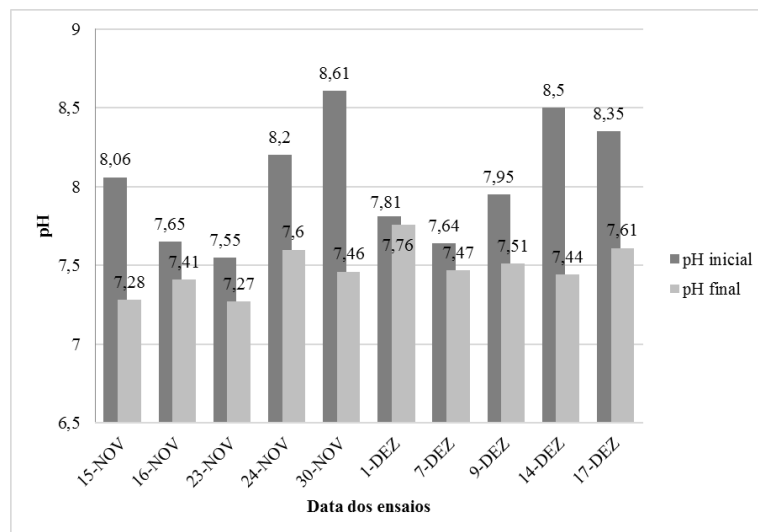
Apesar de temperaturas mais elevadas favorecerem o desenvolvimento das culturas de microalgas, aumentando a atividade fotossintética, o que poderia ter sido essencial para a fixação do gás sulfídrico no SP1, e tendo em vista que a concentração efluente de H<sub>2</sub>S no SP1 foi decrescente ao longo do tempo, chegando a zero, infere-se que o intervalo de temperatura variando entre 13,6 a 39,4°C, foi propício para a dessulfurização no purificador proposto. No SP2, o teor efluente do H<sub>2</sub>S foi aumentando gradativamente ao longo do tempo, independente da variação da temperatura registrada no período.

### 3.2 Efeito do pH

Para o SP1, considerando ser o pH um parâmetro primordial a ser considerado no crescimento das microalgas, quando os valores estavam próximos a 7,5, a adição de NaHCO<sub>3</sub> era feita no fotobiorreator para ajuste em torno de 7,6 a 8,0, necessário para garantir o desenvolvimento da maioria das espécies. Foi este o valor do pH encontrado no ambiente natural da coleta das microalgas. Já para o SP2, por não existir atividade biológica no reator, o pH não foi corrigido.

O Gráfico 1 mostra a variação dos valores de pH medidos diariamente no estado estacionário do SP1.

**Gráfico 1.** Valores de pH inicial e final para o sistema SP1.



Fonte: Autores (2022).

O Gráfico 1 mostra que houve redução do pH final em todos os dias do experimento, em decorrência da acidificação do meio devido a presença do CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S contido no biogás. No primeiro dia de leitura, o pH inicial estava em 8,06 e ao final de cinco horas de operação marcava 7,28. Observou-se que o pH era parcialmente restabelecido enquanto o sistema permanecia em repouso. Para Miyawaki et al. (2021), o CO<sub>2</sub> do biogás dissolvido no meio foi absorvido pelas microalgas para realização da fotossíntese, mesmo no período de repouso do sistema, elevando o pH e permitindo a reutilização do meio de cultivo em um novo ciclo de purificação do biogás.

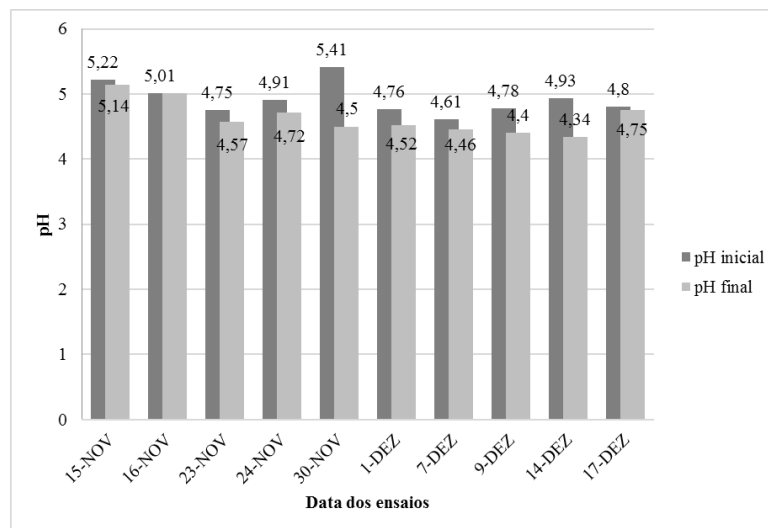
Em decorrência da redução constante do valor do pH registrado, a adição de NaHCO<sub>3</sub> como solução tampão ao SP1 não foi suficiente para manter a alcalinidade alta. De acordo com Ángeles et al. (2020), a alcalinidade mais alta do caldo de cultivo melhora a transferência de massa dos gases ácidos CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S do biogás para a fase líquida na coluna de absorção, dado que a existência de carbonato/bicarbonato eleva o pH do meio de cultivo.

Para o SP1, as variações nos valores de pH não influenciaram na remoção do H<sub>2</sub>S. Mesmo quando os valores do pH eram mais baixos, a remoção completa do gás sulfídrico foi verificada. Estes resultados diferem dos estudos de Rodero et al. (2018), onde a remoção de H<sub>2</sub>S foi obtida nas maiores alcalinidades, correspondendo ao maior pH ao longo da coluna de absorção. Da mesma forma, Franco-Morgado et al. (2017) obtiveram remoção de H<sub>2</sub>S de 99,5 ± 0,5% durante a operação de um tanque da microalgas interligado a uma coluna de absorção, usando um meio altamente carbonatado em um pH de 9,5.

Por outro lado, Bahr et al. (2014) demonstraram que o baixo pH no caldo de cultivo, junto com a grande diminuição do pH na coluna de absorção sob baixa alcalinidade, causou a baixa remoção de H<sub>2</sub>S, resultando numa redução considerável na remoção de H<sub>2</sub>S de 100% para 80% quando o pH na coluna de absorção diminuiu de 7 para 5,4, usando um sistema de coluna de absorção interligada a uma lagoa de microalgas.

O Gráfico 2 apresenta a variação dos valores de pH medidos diariamente anterior e posteriormente à operação do sistema SP2.

**Gráfico 2.** Valores de pH inicial e final para o sistema SP2



Fonte: Autores (2022).

O Gráfico 2 mostra que para o SP2, a variação do pH diário medido após a injeção do biogás permaneceu numa faixa entre 4,34 e 5,41. O H<sub>2</sub>S dissolvido no meio líquido ao longo do tempo, promoveu apenas dessorção e acúmulo, o que causou a acidificação do meio, e, ao contrário do SP1, não foi restabelecido durante o período de repouso. Uma coloração turva esbranquiçada no reator foi observada, indicando a possível existência de íons sulfurados. Diferentemente do sistema de microalgas, o enxofre não foi absorvido e acumulou-se no reator.

Esta verificação foi coerente com o estudo de Noorain et al. (2019b), que, utilizando um purificador de água embalado com um transportador de esponja para purificar o biogás sob condições atmosféricas, relataram a dificuldade de elevar o pH novamente para 8. Devido à precipitação dos íons HS<sup>-</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> resultante da oxidação de H<sub>2</sub>S, a solução líquida se tornava facilmente saturada e mais ácida do que alcalina, com a diminuição do pH. De acordo com os autores, uma alternativa para atingir alta eficiência em termos de recuperação de pH, seria a adição de água doce ao sistema para manter o pH entre 7 e 8.

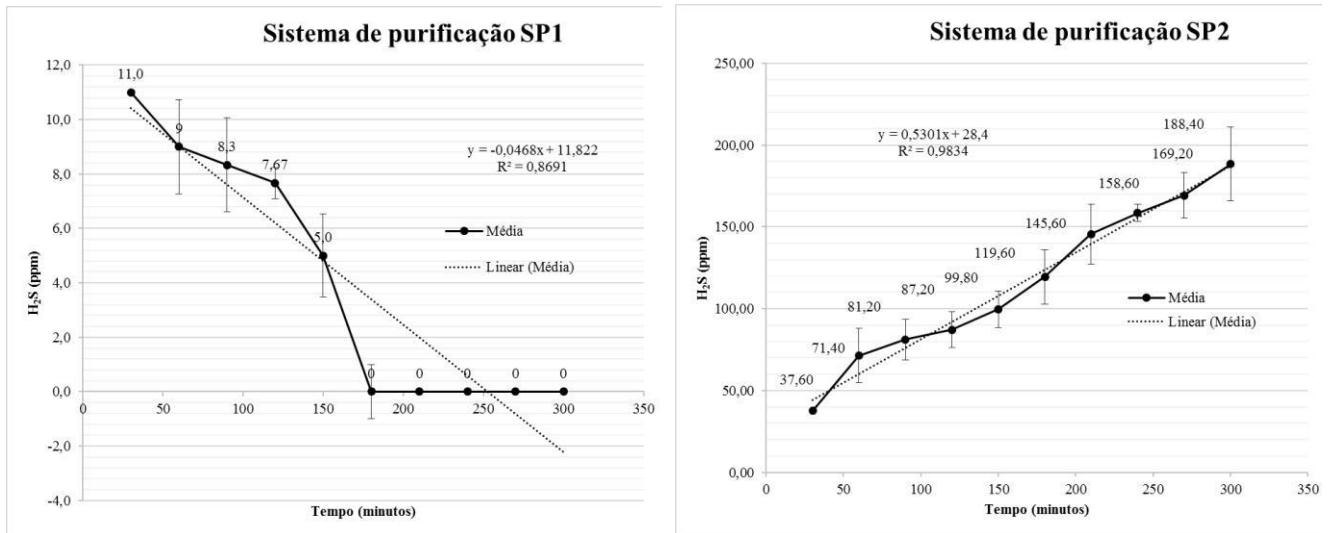
### 3.3 Remoção de H<sub>2</sub>S

Todos os resultados das análises cromatográficas do biogás bruto indicaram concentrações de H<sub>2</sub>S superiores a 1.000 ppm. O mesmo biogás foi usado simultaneamente no SP1 e no SP2.

Para a análise da remoção de H<sub>2</sub>S no SP1, foram usados os resultados da cromatografia do biogás efluente à coluna de absorção, que demonstraram a remoção de 100% de H<sub>2</sub>S neste sistema.

No Gráfico 3 estão representados os resultados dos teores de H<sub>2</sub>S no biogás purificado no SP1 e SP2, ao longo do tempo. Os valores referem-se às médias das medições diárias e aos desvios-padrão, nos intervalos estudados.

**Gráfico 3.** Concentração de H<sub>2</sub>S no biogás purificado



Fonte: Autores (2022).

O Gráfico 3 mostra que houve redução significativa na concentração efluente de gás sulfídrico em ambos os sistemas. Para o SP1, com 30 minutos de operação, a concentração de H<sub>2</sub>S foi menor que no SP2, com valores de 11 ppm e 37,6 ppm, respectivamente. A concentração de H<sub>2</sub>S no SP1 foi reduzindo ao longo do tempo, e com 180 minutos de operação foi observada a remoção completa deste componente, permanecendo assim até o final do ciclo diário de funcionamento do sistema.

A elevada taxa de remoção verificada, segundo Bahr et al. (2014) e Posadas et al. (2015), pode ter sido decorrente da elevada solubilidade de H<sub>2</sub>S no meio de cultivo, devido à sua alta constante adimensional de Henry (2,44 em comparação com 0,83 para CO<sub>2</sub>), simultaneamente com a alta concentração de oxigênio dissolvido proveniente da fotossíntese (Bahr et al., 2014; Posadas et al., 2015).

Estudos em condições de laboratório realizados por Lebrero et al. (2016), Posadas et al. (2015), Posadas et al. (2017), Serejo et al. (2015) e Toledo-Cervantes et al. (2017) apontaram que a alta solubilidade aquosa de H<sub>2</sub>S foi responsável por elevadas taxas de remoção do gás sulfídrico em sistemas de microalgas.

A tecnologia de purificação do biogás em reatores de microalgas/bactérias está embasada na fixação fotossintética de CO<sub>2</sub> por microalgas e na liberação simultânea de O<sub>2</sub> para o meio líquido de cultivo. O oxigênio liberado é utilizado por bactérias oxidantes de enxofre para a oxidação de H<sub>2</sub>S em SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Bahr et al., 2014; Muñoz et al., 2015; Posadas et al., 2017).

Meier et al. (2018) analisaram um sistema de purificação de biogás composto por um fotobiorreator conectado a uma coluna de absorção, usando a microalga *Chlorella sorokiniana*. O sistema contínuo foi operado com biogás real, com 1.800 a 3.500 ppm<sub>v</sub> de H<sub>2</sub>S. O resultado apresentou níveis de remoção de 98% e 100% para CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, respectivamente. A remoção do H<sub>2</sub>S foi devido a oxidação a sulfato, em decorrência da elevada taxa de O<sub>2</sub> dissolvido no meio líquido. Assim, os autores

concluíram que um processo fotossintético de purificação foi eficiente não apenas para remoção de CO<sub>2</sub> com também de H<sub>2</sub>S, e que a rápida oxidação do gás sulfídrico impede a inibição da cultura das microalgas.

Para o SP2, o Gráfico 3 mostra que, de acordo com a inclinação da curva tempo x concentração de H<sub>2</sub>S, ocorreu o processo inverso ao SP1, onde a concentração do gás sulfídrico foi aumentando ao longo do tempo de operação, apesar da significativa redução da concentração de H<sub>2</sub>S no intervalo estudado. No período de 5 horas, o teor passou de 37,6 ppm para 188,4 ppm, ou seja, um aumento de mais de 500% em relação à concentração inicial registrada com 30 minutos, sugerindo saturação do componente no meio líquido, caso o sistema seja operado ininterruptamente.

O aumento da concentração do H<sub>2</sub>S no SP2, segundo Summerfelt et al. (2015), deve-se ao fato de que o efluente resultante da purificação de biogás por lavagem com água possui alta saturação de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S dissolvidos no meio líquido, reduzindo o pH. Para Noorain et al. (2019a), o gás sulfídrico dissolvido torna a água corrosiva, podendo levar a lixiviação de metais pesados para fora do sistema, causando poluição. Também este efluente pode ser inadequado para fins de regeneração, considerando os maiores efeitos negativos possíveis dos contaminantes dissolvidos.

Os resultados verificados no SP2 foram diferentes dos obtidos por Noorain et al. (2019b), que demonstraram que o biogás artificial foi purificado com sucesso usando a coluna de lavagem de água à pressão atmosférica. O biogás obtido na purificação apresentou concentração maior que 90% (v/v) de CH<sub>4</sub> e remoção simultânea completa de H<sub>2</sub>S, com concentrações afluente de H<sub>2</sub>S de 400 e 700 ppm no biogás, com pH mantido em 7,3, e taxa mínima de vazão de gás inferior de 50 L.dia<sup>-1</sup>.

Desta forma, os resultados demonstraram que o sistema SP1, baseado no processo fotossintético com microalgas, apresentou melhor desempenho na dessulfurização do biogás do que o sistema SP2, onde foi usado o processo de lavagem com água à pressão atmosférica.

#### 4. Conclusão

Este trabalho avaliou a eficiência de remoção de gás sulfídrico do biogás pelo processo biológico com microalgas e pelo processo de lavagem com água à pressão atmosférica, em protótipo de purificador do tipo tanque interligado à coluna de absorção, em escala piloto.

Com relação ao parâmetro temperatura, foi observado que o intervalo entre 13,6°C a 39,4°C durante os experimentos, foi propício para a dessulfurização no purificador proposto no SP1. Já no SP2, o teor efluente do H<sub>2</sub>S foi aumentando gradativamente ao longo do tempo, independente da variação da temperatura registrada no período.

Para o SP1, as variações nos valores de pH não influenciaram na remoção do H<sub>2</sub>S. Mesmo quando os valores do pH eram mais baixos, a remoção completa do gás sulfídrico foi verificada. Para o SP2, o H<sub>2</sub>S dissolvido no meio líquido ao longo do tempo, promoveu apenas dessorção e acúmulo, o que causou a acidificação do meio, e, ao contrário do SP1, não foi restabelecido durante o período de repouso. Uma coloração turva esbranquiçada no reator foi observada, indicando a possível existência de íons sulfurados. Diferentemente do sistema de microalgas, o enxofre não foi absorvido e acumulou-se no reator, saturando o meio.

As análises da cromatografia gasosa registraram concentrações acima de 1.000 ppm no biogás bruto. Os resultados demonstraram que para o sistema operado com microalgas, SP1, a remoção do H<sub>2</sub>S foi de 100% a partir de 180 minutos de funcionamento. Assim, esta configuração de purificador demonstrou ser uma tecnologia biológica eficiente para a redução do gás sulfídrico presente no biogás. Com os resultados obtidos, as concentrações de H<sub>2</sub>S estão de acordo com as especificações e requisitos para injeção na rede de biogás natural.

Para o sistema de lavagem com água, SP2, apesar dos resultados apresentarem valores relevantes quanto à remoção do gás sulfídrico, foi observado que a concentração foi aumentando ao longo do tempo e, no final de 5 horas, houve um aumento

de mais de 500% em relação à concentração inicial efluente, com forte tendência de aumento, podendo chegar à saturação total caso o funcionamento seja contínuo. Além disso, uma coloração turva esbranquiçada no reator foi observada, indicando a possível existência de íons sulfurados, requerendo cuidados especiais no descarte da água.

Desta forma, a remoção do gás sulfídrico por meio do processo biológico com microalgas foi realizada com sucesso em purificador em escala piloto, sendo seu desempenho classificado como promissor, com remoção total do H<sub>2</sub>S presente no biogás. Já para o sistema baseado em lavagem com água, os resultados mostraram ser um processo ineficiente, uma vez que a operação por longo período pode levar a saturação total do gás sulfídrico no meio líquido.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a verificação da eficiência de remoção do H<sub>2</sub>S pelo processo biológico com microalgas com alimentação contínua de biogás; e a avaliação da produção de biogás a partir de biomassa de microalgas cultivadas no fotobiorreator.

## 5 Referências

- Ángeles, R., Arnaiz, E., Gutiérrez, J., Sepúlveda-Muñoz, C. A., Fernández-Ramos, O., Muñoz, R., & Lebrero, R. (2020). Optimization of photosynthetic biogas upgrading in closed photobioreactors combined with algal biomass production. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101554.
- Awe, O. W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D. P., & Lyczko, N. (2017). A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. *Waste and Biomass Valorization* 2017 8:2, 8(2), 267–283.
- Aziz, M. M. A., Kassim, K. A., ElSergany, M., Anuar, S., Jorat, M. E., Yaacob, H., Ahsan, A., Imteaz, M. A., & Arifuzzaman. (2020). Recent advances on palm oil mill effluent (POME) pretreatment and anaerobic reactor for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 106215.
- Bahr, M., Díaz, I., Dominguez, A., González Sánchez, A., & Muñoz, R. (2014). Microalgal-biotechnology as a platform for an integral biogas upgrading and nutrient removal from anaerobic effluents. *Environmental Science and Technology*, 48(1), 573–581.
- Budzianowski, W. M., Wylock, C. E., & Marciniak, P. A. (2017). Power requirements of biogas upgrading by water scrubbing and biomethane compression: Comparative analysis of various plant configurations. *Energy Conversion and Management*, 141, 2–19.
- Cabrera-Codony, A., Santos-Clotas, E., Ania, C. O., & Martín, M. J. (2018). Competitive siloxane adsorption in multicomponent gas streams for biogas upgrading. *Chemical Engineering Journal*, 344, 565–573.
- Cai, W. J., Huang, W. J., Luther, G. W., Pierrot, D., Li, M., Testa, J., Xue, M., Joesoef, A., Mann, R., Brodeur, J., Xu, Y. Y., Chen, B., Hussain, N., Waldbusser, G. G., Cornwell, J., & Michael Kemp, W. (2017). Redox reactions and weak buffering capacity lead to acidification in the Chesapeake Bay. *Nature Communications* 2017 8:1, 8(1), 1–12.
- Cano, P. I., Colón, J., Ramírez, M., Lafuente, J., Gabriel, D., & Cantero, D. (2018). Life cycle assessment of different physical-chemical and biological technologies for biogas desulfurization in sewage treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 181, 663–674.
- Cherosky, P., & Li, Y. (2013). Hydrogen sulfide removal from biogas by bio-based iron sponge. *Biosystems Engineering*, 114(1), 55–59.
- Cristiano, D. M., de A. Mohedano, R., Nadaleti, W. C., de Castilhos Junior, A. B., Lourenço, V. A., Gonçalves, D. F. H., & Filho, P. B. (2020). H<sub>2</sub>S adsorption on nanostructured iron oxide at room temperature for biogas purification: Application of renewable energy. *Renewable Energy*, 154, 151–160.
- Arespacochaga, N., Valderrama, C., Mesa, C., Bouchy, L., & Cortina, J. L. (2014). Biogas biological desulphurisation under extremely acidic conditions for energetic valorisation in Solid Oxide Fuel Cells. *Chemical Engineering Journal*, 255, 677–685.
- Dewil, R., Appels, L., & Baeyens, J. (2006). Energy use of biogas hampered by the presence of siloxanes. *Energy Conversion and Management*, 47(13–14), 1711–1722.
- Franco-Morgado, M., Alcántara, C., Noyola, A., Muñoz, R., & González-Sánchez, A. (2017). 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*, 592, 419–425.
- Franco-Morgado, M., Tabaco-Angoa, T., Ramírez-García, M. A., & González-Sánchez, A. (2021). Strategies for decreasing the O<sub>2</sub> content in the upgraded biogas purified via microalgae-based technology. *Journal of Environmental Management*, 279, 111813.
- Franco, M. C., Buffing, M. F., Janssen, M., Lobato, C. V., & Wijffels, R. H. (2012). Performance of *Chlorella sorokiniana* under simulated extreme winter conditions. *Journal of Applied Phycology*, 24(4), 693–699.
- Ghaib, K., & Ben-Fares, F. Z. (2018). Power-to-Methane: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 433–446.
- Huttenhuis, P. J. G., Agrawal, N. J., Hogendoorn, J. A., & Versteeg, G. F. (2007). Gas solubility of H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> in aqueous solutions of N-methyldiethanolamine. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 55(1–2), 122–134.
- Jacob, J. M., Ravindran, R., Narayanan, M., Samuel, S. M., Pugazhendhi, A., & Kumar, G. (2020). Microalgae: A prospective low cost green alternative for nanoparticle synthesis. *Current Opinion in Environmental Science and Health*.

- Jiang, X., Wu, J., Jin, Z., Yang, S., & Shen, L. (2020). Enhancing the removal of H<sub>2</sub>S from biogas through refluxing of outlet gas in biological bubble-column. *Bioresource Technology*, 299, 122621.
- Konrad, O., Akwa, J. V., Koch, F. F., Tonetto, M., & Jaqueline, L. (2016). Quantification and characterization of the production of biogas from blends of agro-industrial wastes in a large-scale demonstration plant. *Acta Scientiarum. Technology*, 38(4), 415–421.
- Lebrero, R., Toledo-Cervantes, A., Muñoz, R., del Nery, V., & Foresti, E. (2016). Biogas upgrading from vinasse digesters: a comparison between an anoxic biotrickling filter and an algal-bacterial photobioreactor. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 91(9), 2488–2495.
- Li, L., Zhang, J., Lin, J., & Liu, J. (2015). Biological technologies for the removal of sulfur containing compounds from waste streams: bioreactors and microbial characteristics. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 2015 31:10, 31(10), 1501–1515.
- Li, Y., Zhang, W., & Xu, J. (2014). Siloxanes removal from biogas by a lab-scale biotrickling filter inoculated with *Pseudomonas aeruginosa* S240. *Journal of Hazardous Materials*, 275, 175–184.
- Meier, L., Barros, P., Torres, A., Vilchez, C., & Jeison, D. (2017). Photosynthetic biogas upgrading using microalgae: Effect of light/dark photoperiod. *Renewable Energy*, 106, 17–23.
- Meier, L., Stará, D., Bartacek, J., & Jeison, D. (2018). Removal of H<sub>2</sub>S by a continuous microalgae-based photosynthetic biogas upgrading process. *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 65–68.
- Miyawaki, B., Mariano, A. B., Vargas, J. V. C., Balmant, W., Defrancheschi, A. C., Corrêa, D. O., Santos, B., Selesu, N. F. H., Ordonez, J. C., & Kava, V. M. (2021). Microalgae derived biomass and bioenergy production enhancement through biogas purification and wastewater treatment. *Renewable Energy*, 163, 1153–1165.
- Muñoz, R., Meier, L., Diaz, I., & Jeison, D. (2015). A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 14(4), 727–759.
- Noorain, R., Kindaichi, T., Ozaki, N., Aoi, Y., & Ohashi, A. (2019a). Integrated biological–physical process for biogas purification effluent treatment. *Journal of Environmental Sciences*, 83, 110–122.
- Noorain, R., Kindaichi, T., Ozaki, N., Aoi, Y., & Ohashi, A. (2019b). Biogas purification performance of new water scrubber packed with sponge carriers. *Journal of Cleaner Production*, 214, 103–111.
- Pipatmanomai, S., Kaewluan, S., & Vitidsant, T. (2009). Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H<sub>2</sub>S removal by activated carbon in small pig farm. *Applied Energy*, 86(5), 669–674.
- Popat, S. C., & Deshusses, M. A. (2008). Biological removal of siloxanes from landfill and digester gases: Opportunities and challenges. *Environmental Science and Technology*, 42(22), 8510–8515.
- Posadas, E., Serejo, M. L., Blanco, S., Pérez, R., García-Encina, P. A., & Muñoz, R. (2015). Minimization of biomethane oxygen concentration during biogas upgrading in algal–bacterial photobioreactors. *Algal Research*, 12, 221–229.
- Posadas, E., Marín, D., Blanco, S., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2017). Simultaneous biogas upgrading and centrate treatment in an outdoors pilot scale high rate algal pond. *Bioresource Technology*, 232, 133–141.
- Ras, M., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2013). Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. *Reviews in Environmental Science and BioTechnology* 2013 12:2, 12(2), 153–164.
- Rasi, S., Lântelä, J., & Rintala, J. (2011). Trace compounds affecting biogas energy utilisation – A review. *Energy Conversion and Management*, 52(12), 3369–3375.
- Rodero, M. del R., Lebrero, R., Serrano, E., Lara, E., Arbib, Z., García-Encina, P. A., & Muñoz, R. (2019). Technology validation of photosynthetic biogas upgrading in a semi-industrial scale algal-bacterial photobioreactor. *Bioresource Technology*, 279, 43–49.
- Rodero, M. del R., Posadas, E., Toledo-Cervantes, A., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2018). Influence of alkalinity and temperature on photosynthetic biogas upgrading efficiency in high rate algal ponds. *Algal Research*, 33, 284–290.
- Ryckebosch, E., Drouillon, M., & Vervaeren, H. (2011). Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1633–1645.
- Salama, E. S., Hwang, J. H., El-Dalatony, M. M., Kurade, M. B., Kabra, A. N., Abou-Shanab, R. A. I., Kim, K. H., Yang, I. S., Govindwar, S. P., Kim, S., & Jeon, B. H. (2018). Enhancement of microalgal growth and biocomponent-based transformations for improved biofuel recovery: A review. *Bioresource Technology*, 258, 365–375.
- Schweiggkofler, M., & Niessner, R. (2001). Removal of siloxanes in biogases. *Journal of Hazardous Materials*, 83(3), 183–196.
- Serejo, M. L., Posadas, E., Boncz, M. A., Blanco, S., García-Encina, P., & Muñoz, R. (2015). Influence of biogas flow rate on biomass composition during the optimization of biogas upgrading in microalgal-bacterial processes. *Environmental Science and Technology*, 49(5), 3228–3236.
- Summerfelt, S. T., Zühlke, A., Kolarevic, J., Reiten, B. K. M., Selset, R., Gutierrez, X., & Terjesen, B. F. (2015). Effects of alkalinity on ammonia removal, carbon dioxide stripping, and system pH in semi-commercial scale water recirculating aquaculture systems operated with moving bed bioreactors. *Aquacultural Engineering*, 65, 46–54.
- Toledo-Cervantes, A., Madrid-Chirinos, C., Cantera, S., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2017). Influence of the gas-liquid flow configuration in the absorption column on photosynthetic biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors. *Bioresource Technology*, 225, 336–342.

- Tu, X., Li, J., Feng, R., Sun, G., & Guo, J. (2016). Comparison of Removal Behavior of Two Biotrickling Filters under Transient Condition and Effect of pH on the Bacterial Communities. *PLOS ONE*, *11*(5), e0155593.
- Valle, A., Fernández, M., Ramírez, M., Rovira, R., Gabriel, D., & Cantero, D. (2018). A comparative study of eubacterial communities by PCR-DGGE fingerprints in anoxic and aerobic biotrickling filters used for biogas desulfurization. *Bioprocess and Biosystems Engineering* *2018* *41*:8, *41*(8), 1165–1175.
- Van der Heyden, C., Vanthillo, B., Pieters, J. G., Demeyer, P., & Volcke, E. I. P. (2016). Mechanistic Modeling of Pollutant Removal, Temperature, and Evaporation in Chemical Air Scrubbers. *Chemical Engineering & Technology*, *39*(10), 1785–1796.
- Vikrant, K., Kailasa, S. K., Tsang, D. C. W., Lee, S. S., Kumar, P., Giri, B. S., Singh, R. S., & Kim, K. H. (2018). Biofiltration of hydrogen sulfide: Trends and challenges. *Journal of Cleaner Production*, *187*, 131–147.
- Xu, M., Xue, Z., Sun, S., Zhao, C., Liu, J., Liu, J., & Zhao, Y. (2020). Co-culturing microalgae with endophytic bacteria increases nutrient removal efficiency for biogas purification. *Bioresource Technology*, *314*, 123766.
- Zhang, Y., Oshita, K., Kusakabe, T., Takaoka, M., Kawasaki, Y., Minami, D., & Tanaka, T. (2020). Simultaneous removal of siloxanes and H<sub>2</sub>S from biogas using an aerobic biotrickling filter. *Journal of Hazardous Materials*, *391*, 122187.
- Zhou, Q., Liang, H., Yang, S., & Jiang, X. (2015). The Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas in a Microaerobic Biotrickling Filter Using Polypropylene Carrier as Packing Material. *Applied Biochemistry and Biotechnology* *2015* *175*:8, *175*(8), 3763–3777.

### **3.4 Artigo 4: Purificação biológica de biogás por processo fotossintético utilizando microalgas<sup>4</sup>**

---

<sup>4</sup> Artigo publicado na Revista Research, Society and Development, v. 11, n. 13, e228111335327, 2022 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35327>. A revista possui *Qualis A3* na avaliação 2017-2019. Autores: Castro, A. C.; Horn, B. C.; Becker, C. M.; Oliveira, G.; Konrad, O.

## Purificação biológica de biogás por processo fotossintético utilizando microalgas

### Biological purification of biogas by photosynthetic process using microalgae

### Purificación biológica de biogás por proceso fotosintético utilizando microalgas

Recebido: 14/09/2022 | Revisado: 25/09/2022 | Aceitado: 27/09/2022 | Publicado: 04/10/2022

#### **Aline Antonia Castro**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5583-9506>  
Universidade do Vale do Taquari, Brasil  
E-mail: [alineantoniacaastro@yahoo.com.br](mailto:alineantoniacaastro@yahoo.com.br)

#### **Bruna Carolina Horn**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4467-5005>  
Universidade do Vale do Taquari, Brasil  
E-mail: [bruna.horn@universo.univates.br](mailto:bruna.horn@universo.univates.br)

#### **Christine Montemaggiore Becker**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8843-4158>  
Universidade do Vale do Taquari, Brasil  
E-mail: [christine.becker@universo.univates.br](mailto:christine.becker@universo.univates.br)

#### **Guilherme Oliveira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1857-3347>  
Universidade do Vale do Taquari, Brasil  
E-mail: [guilhermeoli37@gmail.com](mailto:guilhermeoli37@gmail.com)

#### **Odorico Konrad**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6968-7969>  
Universidade do Vale do Taquari, Brasil  
E-mail: [okonrad@univates.br](mailto:okonrad@univates.br)

#### **Resumo**

A purificação fotossintética usando culturas de microalgas tem surgido como uma tecnologia eficiente para a remoção de gás carbônico do biogás. Nesse método, as microalgas capturam o CO<sub>2</sub> via fotossíntese e liberam O<sub>2</sub> para o meio de cultura, que é utilizado por bactérias oxidantes de enxofre para a oxidação de H<sub>2</sub>S em sulfatos. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a purificação do biogás por processo fotossintético de microalgas. Para isso, foi desenvolvido um protótipo de purificador em escala piloto. A configuração experimental constou de um sistema de dois estágios, constituído um por fotobiorreator de cultivo de microalgas interligado a uma coluna de absorção. A circulação do líquido foi descendente, retornando para o fotobiorreator pela parte inferior da coluna. O biogás foi injetado na coluna de absorção em regime de contrafluxo ao líquido. As análises foram realizadas com foco nos gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub>, presentes no biogás afluente e efluente à coluna de absorção. No biogás bruto, a concentração de CO<sub>2</sub> estava em torno de 32%; o CH<sub>4</sub> variou de 63,08% a 64,32 %; e O<sub>2</sub> de 0,17% a 0,71%. Após a purificação, o biogás apresentava concentrações de CO<sub>2</sub> variando de 9,15% a 18,46%; CH<sub>4</sub> de 71,4% a 76,2%; e de O<sub>2</sub> entre 1,24% a 3,26%. Eficiências de remoção de CO<sub>2</sub> de 42,46% a 72,02% foram registradas no biogás purificado. Os resultados mostraram que o protótipo utilizando o processo biológico com microalgas mostrou-se satisfatório e promissor para a purificação do biogás.

**Palavras-chave:** Biocombustível; Biometano; Microalgas; Purificador; Sustentabilidade.

#### **Abstract**

Photosynthetic purification using microalgae cultures has emerged as an efficient technology for the removal of carbon dioxide from biogas. In this method, microalgae capture CO<sub>2</sub> via photosynthesis and release O<sub>2</sub> into the culture medium, which is used by sulfur-oxidizing bacteria to oxidize H<sub>2</sub>S to sulfates. The objective of this research was to evaluate the purification of biogas by the photosynthetic process of microalgae. For this, a prototype of a pilot scale purifier was developed. The experimental setup consisted of a two-stage system, one consisting of a microalgae culture photobioreactor connected to an absorption column. The liquid was circulated in a descending manner, returning to the photobioreactor at the bottom of the column. The biogas was injected into the absorption column in a counterflow regime to the liquid. The analyzes were carried out focusing on the gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and O<sub>2</sub>, present in the influent and effluent biogas to the absorption column. In raw biogas, the CO<sub>2</sub> concentration was around 32%; CH<sub>4</sub> ranged from 63.08% to 64.32%; and O<sub>2</sub> from 0.17% to 0.71%. The purified biogas had CO<sub>2</sub> concentrations ranging from 9.15% to 18.46%; CH<sub>4</sub> from 71.4% to 76.2%; and O<sub>2</sub> between 1.24% to 3.26%. CO<sub>2</sub> removal efficiencies of 42.46% to 72.02% were recorded in the purified biogas. The results showed that the proposed prototype using the biological process with microalgae proved to be satisfactory and promising for the purification of biogas.

**Keywords:** Biofuel; Biomethane; Microalgae; Purifier; Sustainability.

## Resumen

La purificación fotosintética utilizando cultivos de microalgas se ha convertido en una tecnología eficiente para la eliminación de dióxido de carbono del biogás. En este método, las microlagunas capturan CO<sub>2</sub> a través de la fotosíntesis y liberan O<sub>2</sub> en el medio de cultivo, que es utilizado por bacterias oxidantes de azufre para oxidar H<sub>2</sub>S a sulfatos. El objetivo de esta investigación fue evaluar la purificación de biogás por el proceso fotosintético de microalgas. Para ello se desarrolló un prototipo de purificador a escala piloto. La configuración experimental consistió en un sistema de dos etapas, una de las cuales consistía en un fotobiorreactor de cultivo de microalgas conectado a una columna de absorción. El líquido se hizo circular de forma descendente, retornando al fotobiorreactor por el fondo de la columna. El biogás se inyectó en la columna de absorción en régimen de contracorriente al líquido. Los análisis se realizaron enfocándose en los gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y O<sub>2</sub>, presentes en el biogás afluente y efluente a la columna de absorción. En el biogás crudo, la concentración de CO<sub>2</sub> rondaba el 32%; CH<sub>4</sub> osciló entre 63,08 % y 64,32 %; y O<sub>2</sub> de 0,17% a 0,71%. El biogás purificado tenía concentraciones de CO<sub>2</sub> que oscilaban entre 9,15 % y 18,46 %; CH<sub>4</sub> del 71,4% al 76,2%; y O<sub>2</sub> entre 1,24% a 3,26%. Se registraron eficiencias de eliminación de CO<sub>2</sub> del 42,46 % al 72,02 % en el biogás purificado. Los resultados mostraron que el prototipo propuesto utilizando el proceso biológico con microalgas demostró ser satisfactorio y prometedor para la purificación de biogás.

**Palabras clave:** Biocombustible; Biometano; Microalgas; Purificador; Sustentabilidad.

## 1. Introdução

A biotecnologia de geração de biogás é uma metodologia capaz de eliminar a emissão de gases de efeito estufa, reduzindo o aquecimento global (Pinto et al., 2022; Thiruselvi et al., 2021). O biogás é um produto resultante da digestão anaeróbia de matéria orgânica, e é considerado como uma promissora fonte de energia limpa, em substituição aos combustíveis fósseis. O biogás é composto em sua maior parte por metano (CH<sub>4</sub>, 40–75%) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>, 25–60%), contendo menores quantidades de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S, 0,005–2%), amônia (NH<sub>3</sub> <1 %), oxigênio (O<sub>2</sub>, 0–1%) e vestígios de compostos orgânicos voláteis (Aziz et al., 2020; de Arespachoga et al., 2014; Konrad et al., 2016; Saratale et al., 2018).

O metano é o componente de interesse, e os demais são considerados impurezas do biogás. A presença de CO<sub>2</sub> reduz significativamente o poder calorífico do biogás, aumenta o custo de transporte e ainda provoca a poluição do ar, devido ao lançamento de hidrocarbonetos na atmosfera durante a combustão. A presença de altas concentrações de O<sub>2</sub> no biogás pode ocasionar perigo de explosão (Tabatabaei et al., 2020; Zhou et al., 2017).

Para a injeção em rede de gás natural e uso veicular, é obrigatória a remoção dos poluentes do biogás, um processo denominado de purificação (Noorain et al., 2019; Rodero et al., 2018). As especificações para o gás natural nacional determinam concentração com valores máximos de 0,005 ppm para o H<sub>2</sub>S (Kunz et al., 2019), 3% para o CO<sub>2</sub>, 0,5% a 0,8% para o O<sub>2</sub> (Confederação Nacional da Indústria, 2019). Com relação aos teores de CH<sub>4</sub>, os valores devem variar de 35% a 70% para o uso em energia térmica, mecânica e elétrica; e de 94% a 99% para injeção na rede de gás natural, combustível para veículos e células de combustível (Kunz et al., 2019).

Diversas tecnologias físico-químicas foram desenvolvidas para purificação do biogás, como a separação por membrana, adsorção por oscilação de pressão (PSA), absorção físico-química, separação criogênica (Kadam & Panwar, 2017; Khan et al., 2017; Roy et al., 2021), com características específicas e eficiência de remoção de acordo com a finalidade a que se destina o produto final (Awe et al., 2017; Miltner et al., 2017; Muñoz et al., 2015; Zhang et al., 2021). Porém, devido ao alto custo operacional, a utilização desses métodos restringe seu emprego no mercado de purificação do biogás (Das et al., 2022; Ryckebosch et al., 2011).

Nesse cenário, a purificação fotossintética usando culturas de microalgas tem surgido como uma tecnologia promissora para a remoção de CO<sub>2</sub> do biogás (Bose et al., 2019; Muñoz et al., 2015). Esse método está embasado na fixação de CO<sub>2</sub> via fotossíntese pelas microalgas e na liberação de O<sub>2</sub> para o meio de cultura, que é utilizado por bactérias oxidantes de enxofre para a oxidação de H<sub>2</sub>S em sulfatos (Bahr et al., 2014). Uma grande vantagem desse processo está na produção de biomassa com variadas aplicações potenciais, agregando valor ao CO<sub>2</sub> contido no biogás (Prandini et al., 2016; Tabatabaei et al., 2020).

O uso do digestato proveniente da geração do biogás apresenta condições de suprir a necessidade de nutrientes para o crescimento de microalgas, aprimorando ainda mais a sustentabilidade do método de purificação (Abu Hajar et al., 2016; Koutra et al., 2018), além de representar uma oportunidade para mitigar seu potencial de eutrofização, quando lançado de forma inadequada em corpos d'água (Uggetti et al., 2014; Xu et al., 2022).

Nesse contexto, há uma necessidade emergente de fomentar ferramentas econômicas e sustentáveis tanto para purificação, como para remoção de nutrientes do digestato, baseado no alto potencial do biogás como fonte de energia renovável (Franco-Morgado et al., 2017). Porém, poucas são as pesquisas que têm como foco a utilização de fotobiorreatores fechados que apresentem alta eficiência fotossintética de remoção de CO<sub>2</sub>, resultando em grande produtividade de biomassa de microalgas (Ángeles et al., 2020).

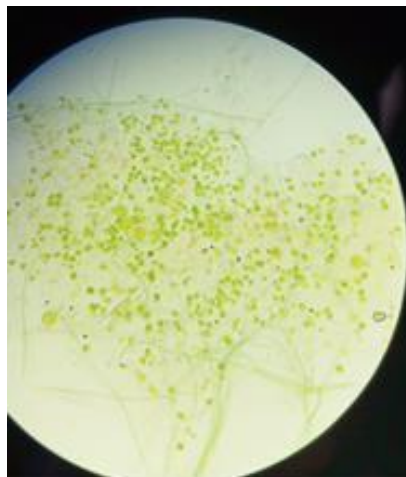
Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a purificação do biogás por processo fotossintético de microalgas em protótipo de purificador do tipo fotobiorreator interligado à coluna de absorção, em escala piloto, usando como fonte de nutrição o digestato do biodigestor anaeróbico.

## 2. Material e Método

### 2.1 Microrganismos e biogás

Um consórcio de microalgas/bactérias, denominado aqui apenas por microalgas, foi coletado em uma lagoa de tratamento de efluente de uma indústria do ramo alimentício no Vale do Taquari – RS. Os microrganismos foram colocados em baldes e transportados até o local do experimento. A Figura 1 mostra os microrganismos vistos por microscópio óptico.

**Figura 1.** Microscopia do consórcio de microalgas/bactérias.



Fonte: Autores (2022).

A opção de usar o consórcio de microalgas/bactérias foi devido à facilidade de obtenção em lagoas de tratamento de efluentes, evitando gastos com a aquisição de cepas de microalgas isoladas. Além disso, o potencial da simbiose microalgas/bactérias para a purificação do biogás foi demonstrado eficiente em fotobiorreatores, onde o oxigênio liberado para o meio de cultivo pela fotossíntese é usado pelas bactérias para oxidação do H<sub>2</sub>S em enxofre (Ángeles et al., 2020).

Como fonte de nutrição para as microalgas foi usado o digestato, que é um subproduto resultante da digestão anaeróbia do biodigestor. Sua escolha foi devido ao baixo custo, à facilidade de obtenção, e principalmente por promover a sustentabilidade no processo. A composição do digestato possui elementos essenciais para o desenvolvimento dos

microrganismos, apresentando macronutrientes como o nitrogênio, fósforo e potássio, e micronutrientes como cálcio, manganês, cobre, dentre outros.

O biogás usado nos experimentos foi proveniente de biodigestor de digestão anaeróbia modelo HomeBiogás 2.0, com capacidade de produção nominal diária de 700 L. Foram usados dois reatores interligados, perfazendo uma produção nominal total de 1.400 L de biogás por dia (Figura 2).

**Figura 2.** Produção de biogás – Biodigestor.

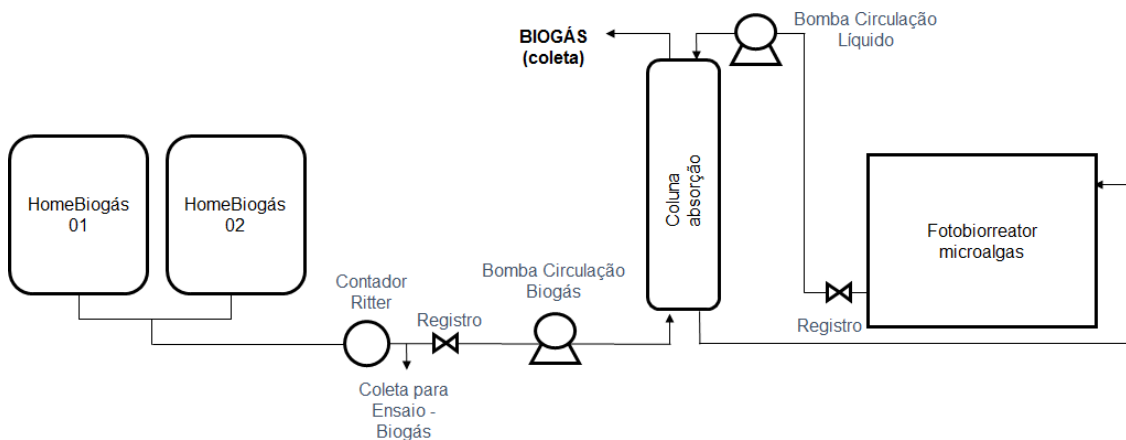


Fonte: Autores (2022).

## 2.2 Configuração experimental

A planta piloto foi instalada no Laboratório de Biorreatores, Setor D, Prédio 26, TECNOVATES, Lajeado – RS. O objetivo foi desenvolver um protótipo que fosse resistente, de baixo custo e de fácil construção, que permitisse o cultivo das microalgas e facilitasse a atuação sobre as condições de cultivo, com o objetivo de direcionar o metabolismo das microalgas cultivadas e o controle de variáveis operacionais, tais como o pH, biofixação de CO<sub>2</sub> e a injeção do biogás. A Figura 3 apresenta o esquema simplificado do purificador.

**Figura 3.** Configuração esquemática do protótipo do purificador.



Fonte: Autores (2022).

A configuração experimental constou de um conjunto de purificador de dois estágios. O sistema foi constituído por um tanque, também denominado de fotobiorreator, interligado a uma coluna de absorção. O fotobiorreator foi confeccionado

em vidro temperado com 8 mm de espessura, nas dimensões de 0,50 m de largura, 0,50 m de comprimento e 0,35 m de altura, com tampa contendo uma abertura para permitir realização das leituras, perfazendo um volume total de 87,50 L. A coluna de absorção foi constituída de polimetilmetacrilato transparente, com diâmetro de 100 mm e altura de 1.000 mm, com volume total de 8,54 L (Figura 4).

As interligações dos componentes dos sistemas foram feitas com conexões de policloreto de vinila (PVC). Para evitar o entupimento e o eventual mau funcionamento das bombas de água, foi instalado um filtro na tubulação de saída de água do tanque para a coluna, confeccionado com tela de fios de polietileno de alta densidade. Nas laterais opostas do tanque, foram instaladas lâmpadas *Light Emitting Diode* (LED), com potência de 9W (Figura 4).

**Figura 4.** Planta piloto do purificador.



Fonte: Autores (2022).

A circulação do líquido do tanque para a coluna de absorção foi feita de forma descendente, retornando para o tanque pela parte inferior da coluna. O biogás foi injetado na coluna de absorção em regime de contrafluxo ao líquido (Figura 5). Para garantir a uniformidade e reduzir o tamanho das bolhas geradas pelo biogás, usou-se pedra difusora porosa, localizada na parte inferior da coluna.

As bombas utilizadas para circulação do líquido e do biogás foram do modelo Minibomba D'água Rs-385, de dimensões 90x40x35mm, diâmetro de saída interno de 6mm e externo de 9mm, vazão máxima aproximada de 1,5 a 2L.min<sup>-1</sup>. Para o monitoramento da vazão do biogás na entrada dos sistemas, foi usado um equipamento contador de giros denominado de Ritter, modelo TG 0.5. A vazão da água foi monitorada com auxílio de *becker* e cronômetro, medindo-se o volume ao longo do tempo.

**Figura 5.** Circulação do líquido e do biogás.



Fonte: Autores (2022).

### 2.3 Condições operacionais

O fotobiorreator foi mantido sob condições ambientais de temperatura. A iluminação fornecida foi composta por 2 lâmpadas tubulares de LED branca de 9W, fluxo luminoso de 900 lúmens, posicionadas diagonalmente em paredes opostas do tanque. O fotoperíodo adotado foi de 24 horas. O fotobiorreator foi preenchido com 45L de água de torneira e inoculado com 8,0 L de consórcio microalgas/bactérias, perfazendo um volume total de 53,0 L, correspondendo a 15% v/v.

O sistema foi operado em regime contínuo de alimentação, com a finalidade de manter a fase exponencial de crescimento, utilizando como meio de nutrição o próprio digestato resultante da produção do HomeBiogás, com uma taxa de fluxo de 1L.dia<sup>-1</sup>, conforme taxa usada nos experimentos de Toledo- Cervantes et al. (2017) e Posadas et al. (2017). O digestato foi adicionado sempre ao final do dia, após a realização das leituras, com a retirada simultânea do caldo de cultivo.

O volume da coluna de absorção foi de 4,63 L. A circulação do líquido foi mantida a uma vazão de 52,5 L.h<sup>-1</sup> e a circulação do biogás a uma vazão de 15,0 L.h<sup>-1</sup>, resultando numa relação líquido/biogás de 3,5, de acordo com estudos de Rodero et al. (2019). Os experimentos foram conduzidos em duas fases experimentais e entre elas houve um período de repouso. Na primeira fase, o fotobiorreator foi operado por 42 dias (05/11/2021 a 17/12/2021). Nos primeiros 9 dias foi realizada a aclimação dos microrganismos, e a partir daí o biogás foi injetado no sistema. Em todo o período foi feita a adição de nutrientes à cultura. O tempo de operação diária do fotobiorreator foi de cinco horas. Nessa primeira fase experimental foram realizadas medições da concentração dos componentes do biogás afluente e efluente à coluna de absorção. Estes resultados não fazem parte do presente estudo.

Houve um período de repouso durante 86 dias (18/12/2021 a 13/03/2022), sem adição de nutrientes à cultura, porém o fornecimento de iluminação foi contínuo. A segunda fase experimental compreendeu o período de 14 a 25 de março de 2022. O sistema entrou em operação, com a injeção do biogás na coluna de absorção. As leituras foram realizadas a partir do dia 21. Assim, a operação foi de 11 dias, com leituras realizadas nos últimos 5 dias, ou seja, de 21 a 25 de março de 2022.

O tempo de operação diária dessa segunda fase experimental foi reduzido para 2 horas. Esse critério foi estabelecido tendo como referência a etapa experimental anterior, onde foi observado o gradual aumento da concentração dos componentes

do biogás com o tempo de operação do sistema. A Tabela 1 apresenta o resumo dos parâmetros operacionais utilizados nos experimentos da segunda fase experimental.

**Tabela 1.** Parâmetros operacionais.

Condições operacionais	Fotobiorreator
Temperatura	Ambiente
Iluminação	LED (2 x 9W)
Fotoperíodo	24/0 horas
Nutrição	Digestato do HomeBiogás (1 L.dia <sup>-1</sup> )
Vazão do líquido	52,5 L.h <sup>-1</sup>
Vazão do biogás	15,0 L.h <sup>-1</sup>
Relação QL/QG (líquido/biogás)	3,5
Duração do experimento	11 dias

Fonte: Autores (2022).

#### 2.4 Procedimentos analíticos

As temperaturas ambientais diárias foram fornecidas pelo Núcleo de Informações Hidrometeorológicas da Univates, localizado em Lajeado – RS. Para a determinação de pH foi usado o pHmetro digital, marca DIGIMED, modelo DM-2P.

Para a determinação da concentração de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> foi usado o cromatógrafo gasoso, modelo Arnel Engineered Solution GC Clarus 580, onde o biogás foi coletado em *bags* da marca Thermoareen LB-2 (Figura 6). As coletas foram realizadas durante cinco dias da semana, com amostras do biogás afluente e efluente na coluna de absorção, após duas horas de operação do sistema.

**Figura 6.** Bags de coleta de biogás.



Fonte: Autores (2022).

A eficiência da remoção do CO<sub>2</sub> no biogás purificado foi calculada de acordo com a equação (Flores-Cortés et al., 2021):

$$\text{Eficiência de remoção CO}_2: [(\text{CO}_2 \text{ entrada da coluna} - \text{CO}_2 \text{ saída da coluna}) / \text{CO}_2 \text{ entrada da coluna}] \times 100\%$$

### 3. Resultados e Discussões

Os resultados foram apresentados e discutidos com relação à eficiência do protótipo de purificador fotossintético para geração de biometano, analisando a composição do biogás bruto e purificado, com relação à concentração de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub>. Foram avaliados os efeitos da temperatura e do pH sobre o sistema de purificação.

#### 3.1 Efeito da temperatura

Durante a operação do sistema a temperatura não foi controlada. As temperaturas ambientes variaram de 12 °C a 23°C ao longo do dia. As temperaturas mais baixas registradas podem ter sido desfavoráveis ao desenvolvimento das microalgas, pois a cinética de crescimento é dependente da temperatura. Temperaturas ótimas para o crescimento da biomassa geralmente variam entre 20 °C e 30 °C, sendo que quanto maior a taxa de crescimento, maior a captação fotossintética do CO<sub>2</sub>, reduzindo sua concentração no biogás purificado.

Por outro lado, como a solubilidade do CO<sub>2</sub> é inversamente proporcional à temperatura, nessa fase experimental, as temperaturas um pouco mais baixas poderiam ter promovido melhor diluição do biogás no meio líquido, ajudando na biofixação do CO<sub>2</sub> pelas microalgas.

Segundo Jacob et al. (2020), temperaturas mais elevadas melhoram a taxa de crescimento da biomassa, devido ao aumento da capacidade de fixação do CO<sub>2</sub> do biogás presente no meio líquido. Para Toledo- Cervantes et al. (2017), a atividade fotossintética é um fator determinante no processo com microalgas, pois influencia na melhoria da purificação do biogás pela maior remoção de compostos presentes no biogás.

Para Rodero et al. (2019), a temperatura é responsável pelo equilíbrio entre as fases gasosa e líquida, pois influencia na capacidade de dessorção ou absorção dos componentes presentes no biogás, portanto, a solubilidade do CO<sub>2</sub> diminui à medida que a temperatura aumenta.

Assim, a temperatura torna-se um fator importante a ser ponderado em um processo de purificação do biogás utilizando microalgas, influenciando tanto a cinética de crescimento da biomassa (Rehman et al., 2022), como a transferência de massa entre líquido e gás, e consequentemente o índice de absorção dos componentes do biogás no sistema (Meier et al., 2017).

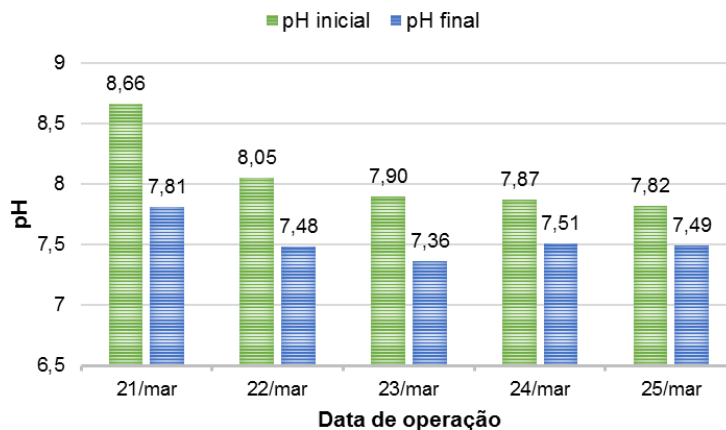
Porém, o efeito da temperatura torna-se irrelevante na solubilidade do CO<sub>2</sub> quando a alcalinidade do meio for alta. O aumento da alcalinidade é uma característica primordial para melhorar a transferência de massa gás/líquido (Rodero et al., 2018). Assim, uma ação importante para melhorar a eficiência do purificador proposto seria a manutenção da alcalinidade elevada no meio de cultivo como forma de compensação de temperaturas mais altas, tendo em vista ser este último um parâmetro de difícil controle, e ao mesmo tempo, essencial para o crescimento das microalgas.

#### 3.2 Efeito do pH

As variações de pH nessa fase experimental foram registradas diariamente, em triplicatas, em medições no estágio estacionário, anterior (inicial) e posteriormente (final) à operação do sistema. O Gráfico 1 mostra estas variações, tomando o valor médio das leituras.

O Gráfico 1 mostra que os valores médios de pH inicial foram de 8,66, 8,05, 7,90, 7,87, 7,82. Ao final da operação diária, houve uma redução no pH do caldo de cultivo, passando para 7,81, 7,48, 7,36, 7,51 e 7,49, respectivamente. Com exceção ao dia 21, a variação diária do pH foi praticamente constante, apresentando redução de aproximadamente 7% em relação ao valor inicial diário.

**Gráfico 1.** Valores de pH inicial e final.



Fonte: Autores (2022).

O pH foi parcialmente restabelecido enquanto o sistema permanecia em repouso. Essa recuperação pode ter sido causada pela fixação fotossintética do  $\text{CO}_2$  pelas microalgas durante o restante do ciclo diário de repouso do sistema. Mesmo assim, o pH inicial apresentava valores ligeiramente mais baixos em dias subsequentes.

O esperado seria um aumento do pH como resultado da atividade fotossintética das microalgas, retirando o  $\text{CO}_2$  do meio, cuja presença torna o meio acidificado. Em condições de pH alcalino, as microalgas sequestram com maior facilidade o  $\text{CO}_2$ , aumentando a produção de biomassa. Porém, nesta fase experimental, uma baixa concentração de biomassa de microalga foi observada no fotobiorreator, resultado da baixa atividade fotossintética, mediada pelos baixos valores de pH registrados.

Posadas et al. (2017) verificaram que a menor capacidade tampão do meio de cultura resultaram em alterações consideráveis do pH ao longo do dia, confirmando a função essencial da alcalinidade para o controle do pH em fotobiorreatores de microalgas bacterianos.

Toledo-Cervantes et al. (2017), observaram que a maior capacidade tampão do digestado utilizado como forma de nutrição, em conjunto com a atividade fotossintética das microalgas, devido à manutenção da alta produtividade de biomassa, resultou na estabilidade do pH em  $10,2 \pm 0,5$ . Os autores ainda relataram que uma redução no pH para  $9,5 \pm 0,1$  foi confirmada em função da menor produtividade de biomassa, em decorrência de limitações de componentes no meio de nutrição.

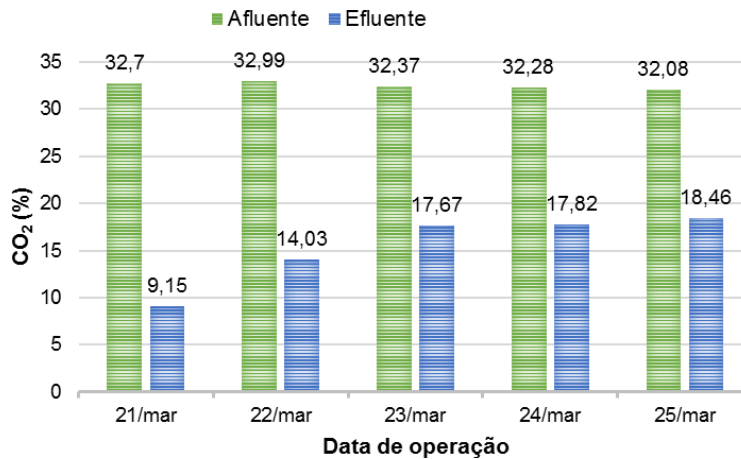
Ao contrário do estudo de Toledo-Cervantes et al. (2017), o digestato usado para nutrição das microalgas, cujos valores de pH variaram de 8,1 a 8,7, não foi capaz de melhorar a capacidade tampão do meio de cultivo no fotobiorreator, mediante as variações observadas no pH ao longo dos dias.

Assim, neste estudo foi possível verificar que a supervisão do pH é um ponto relevante no desempenho de um fotobiorreator de microalgas para purificação do biogás. A manutenção do pH mais elevado melhora a taxa de transferência de massa dos gases ácidos ( $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ) do biogás para a fase líquida, resultando em eficiência de remoções mais elevada.

### 3.3 Eficiência de remoção de $\text{CO}_2$

O Gráfico 2 apresenta as concentrações de  $\text{CO}_2$  presente no biogás bruto e purificado. Os resultados das análises cromatográficas mostraram que os teores de  $\text{CO}_2$  no biogás afluente à coluna de absorção estava em torno de 32% (Gráfico 2).

**Gráfico 2.** Concentração de CO<sub>2</sub> no biogás.



Fonte: Autores (2022).

Foi observada uma redução no teor de CO<sub>2</sub> pela passagem do biogás na coluna de absorção em todos os dias. No primeiro dia, a concentração do CO<sub>2</sub> efluente estava em 9,15 %, a menor registrada durante as leituras. Nos dias subsequentes, os teores do gás carbônico no biogás purificado variaram de 14,03%, 17,67%, 17,82% a 18,46%, respectivamente aos dias 22 a 25.

Ao longo do ensaio, a concentração de CO<sub>2</sub> foi aumentando, chegando a dobrar o valor ao quinto dia em relação ao primeiro. A baixa atividade fotossintética verificada no reator de microalgas, ocasionada pela baixa taxa de crescimento, provavelmente não foi suficiente para promover a retirada do CO<sub>2</sub> presente no meio de cultivo, o que levou ao aumento da concentração deste componente. Porém, a partir do terceiro dia, o percentual efluente de CO<sub>2</sub> apresentou uma pequena tendência à estabilidade.

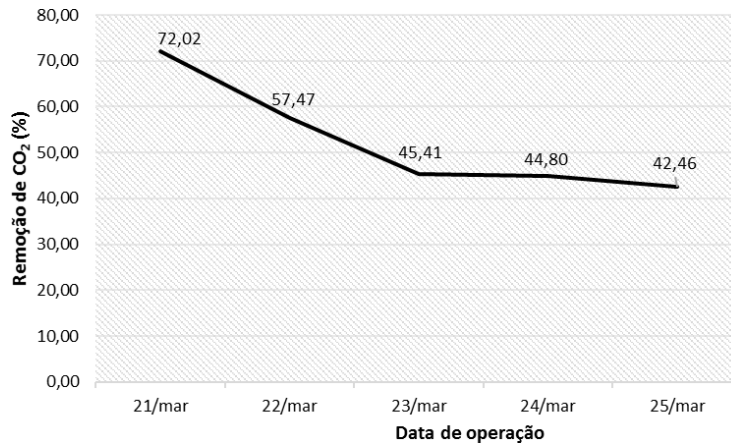
Esse resultado estava de acordo com Meier et al. (2017) que, utilizando um fotobiorreator aberto conectado a uma coluna de transferência de massa, também registraram que o CO<sub>2</sub> em excesso no meio de cultivo não foi capturado pela biomassa de microalgas, ocorrendo apenas dessorção e acúmulo no meio. Como consequência da baixa atividade fotossintética, o pH diminuiu e a concentração de carbono inorgânico dissolvido aumentou ligeiramente no fotobiorreator.

Toledo-Cervantes et al. (2017) registraram que as menores remoções de CO<sub>2</sub> sob a operação de fluxo em contracorrente em fotobiorreator tipo tanque de microalgas ligado à coluna de absorção foram atribuídos à diminuição no pH do caldo de cultivo, mediada pela diminuição na atividade fotossintética da microalga. Esses resultados confirmaram que a remoção de CO<sub>2</sub> é altamente dependente da atividade fotossintética das microalgas.

As eficiências de remoção do CO<sub>2</sub> foram avaliadas tomando-se os valores da concentração afluente e efluente à coluna de absorção. O Gráfico 3 apresenta estes resultados.

Remoções de CO<sub>2</sub> de 72,02%, 57,47%, 45,41%, 44,80% e 42,46% foram registrados, nos dias 21 a 25, respectivamente, no biogás purificado. A remoção de CO<sub>2</sub> maior ocorreu no primeiro dia, provavelmente devido ao maior valor do pH registrado. Segundo Bahr et al. (2014), um pH mais alto no caldo de cultivo aumenta a taxa de transferência de massa dos gases ácidos (CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S) do biogás para a fase líquida, o que, em última análise, resulta em desempenhos de purificação mais elevados. Além disso, a alcalinidade do caldo de cultura determina a cinética do crescimento das microalgas no reator e a absorção de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S na coluna de absorção (Posadas et al., 2015).

**Gráfico 3.** Eficiência de remoção de CO<sub>2</sub>.



Fonte: Autores (2022).

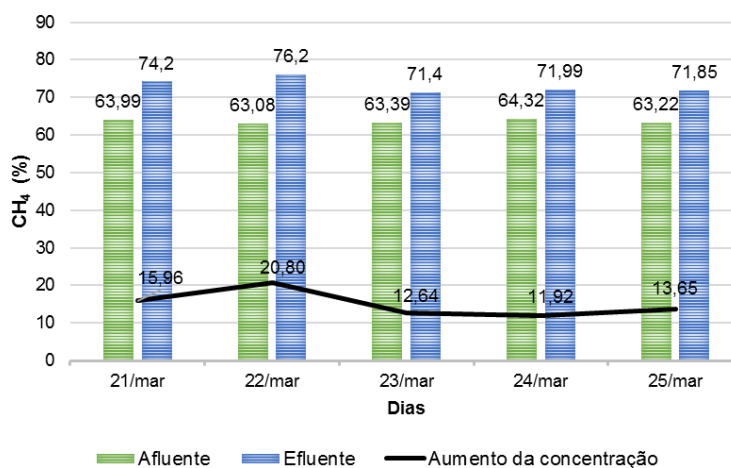
O estudo realizado por Xu et al. (2020) utilizando um fotobiorreator de microalgas-bactérias de tubo semifechado horizontal ao ar livre, testou a influência da alcalinidade do líquido da cultura na remoção de CO<sub>2</sub> no biogás. Os autores observaram que, quando a alcalinidade do líquido de cultura aumentou de  $42 \pm 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  para  $996 \pm 42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , a concentração de CO<sub>2</sub> no biogás caiu de 9,6% para 1,2%.

Tendo em vista os resultados constantes no Gráfico 3, que sugerem que a partir do terceiro dia, a taxa remoção de CO<sub>2</sub> apresentou ligeira tendência ao equilíbrio, surge a necessidade de um período maior para realização dos testes a fim de validar o equilíbrio em relação à remoção do CO<sub>2</sub> no biogás purificado.

### 3.4 Concentração de CH<sub>4</sub>

Como consequência da remoção do CO<sub>2</sub>, os teores de CH<sub>4</sub> no biogás purificado aumentaram, variando de 71,4% a 76,2%, enquanto que as concentrações afluentes estavam em torno de 63,08% a 64,32 %, conforme mostrado na Gráfico 4.

**Gráfico 4.** Concentração de CH<sub>4</sub> no biogás.



Fonte: Autores (2022).

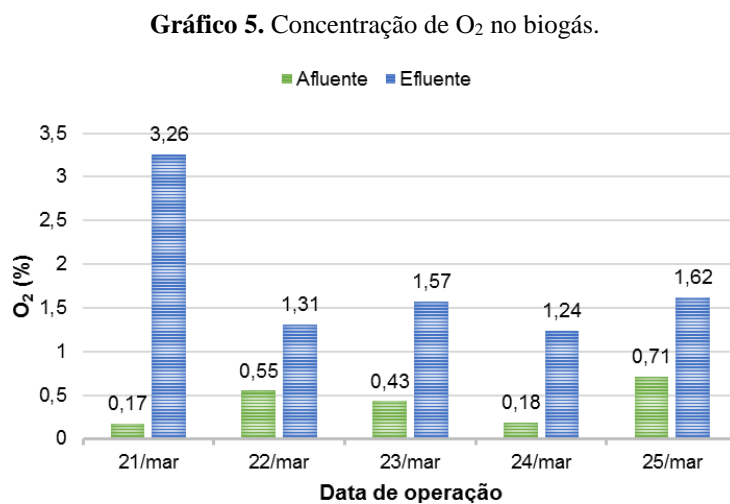
Foi verificada a melhoria do biogás purificado em todas as leituras. A maior concentração efluente do CH<sub>4</sub> foi registrada no segundo dia, alcançando um teor de 76,20% de metano no biogás purificado. A partir do dia 23, os teores permaneceram praticamente constantes, em torno de 71%.

Resultados semelhantes foram alcançados por Franco-Morgado et al. (2021), que, utilizando uma tecnologia baseada em consórcio de microalgas-bactérias em uma lagoa de microalgas conectada a coluna de absorção, obtiveram conteúdo de CH<sub>4</sub> com valor de 71 ± 4% v. Posadas et al. (2017) obtiveram concentração de CH<sub>4</sub> de 70,5 a 86,8% no biogás purificado, utilizando uma configuração experimental composta por uma lagoa de microalgas conectada a coluna de absorção.

A eficiência na concentração de CH<sub>4</sub> alcançou valores de 15,96%, 20,80%, 12,64%, 11,92% e 13,65%, respectivamente aos dias 21 a 25 de março, com relação à concentração inicial afluyente à coluna de absorção. A partir do dia 23, a curva apresenta tendência à estabilidade, que é um bom indicativo da eficácia do protótipo, reforçando a importância de realização dos testes por um maior período de tempo.

### 3.5 Concentração de O<sub>2</sub>

Foram feitas leituras das concentrações iniciais e finais de O<sub>2</sub>, demonstradas no Gráfico 5.



Fonte: Autores (2022).

O teor de oxigênio no biogás afluente à coluna de absorção variou de 0,17% a 0,71% e a concentração efluente oscilou entre os valores de 1,24% a 3,26%. No primeiro dia verificou-se o maior teor de O<sub>2</sub>, provavelmente devido a uma maior atividade fotossintética das microalgas, liberando O<sub>2</sub> no meio de cultivo. Uma maior taxa de remoção de CO<sub>2</sub> foi verificada nesse mesmo dia, o que reforça o fato da fotossíntese ter contribuído para o aumento no teor de oxigênio no biogás purificado.

Para Meier et al. (2018), a fotossíntese oxigenada de microalgas resulta na contaminação por O<sub>2</sub> no biogás purificado, devido à separação do oxigênio dissolvido na cultura líquida de microalgas. Devido à atividade fotossintética, teores de O<sub>2</sub> dissolvidos acima da saturação podem ser observados em culturas de microalgas.

Franco-Morgado et al. (2021) relataram que a cultura em suspensão de microalgas aquosas transferida para a coluna de absorção, usada para a remoção de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S do biogás, contaminou o biogás purificado com O<sub>2</sub>, atingindo concentrações em torno de 6%.

## 4. Conclusão

Esse trabalho avaliou o potencial de purificação do biogás por processo fotossintético utilizando microalgas em protótipo de fotobiorreator do tipo tanque conectado a uma coluna de absorção, em escala piloto.

Os resultados da análise de cromatografia gasosa no biogás bruto mostraram concentrações de CO<sub>2</sub> em torno de 32%; de CH<sub>4</sub> variando de 63,08% a 64,32 %; e de O<sub>2</sub> de 0,17% a 0,71%. Já o biogás purificado apresentava concentrações de CO<sub>2</sub> entre de 9,15% a 18,46%; CH<sub>4</sub> de 71,4% a 76,2%; e de O<sub>2</sub> entre 1,24% a 3,26%. Remoções de CO<sub>2</sub> de 42,46% a 72,02% foram registrados no biogás purificado.

A temperatura e o pH foram considerados parâmetros fundamentais no processo de purificação do biogás estudado, influenciando na cinética de crescimento da biomassa, na solubilidade do biogás no meio líquido, melhorando o índice de absorção do CO<sub>2</sub> biogás no sistema. O controle desses dois parâmetros é essencial para melhorar o desempenho de fotobiorreatores de microalgas para purificação do biogás.

Desta forma, o purificador proposto utilizando o processo biológico com microalgas mostrou-se satisfatório e promissor, considerando os resultados positivos para remoção do CO<sub>2</sub> no biogás.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a manutenção da alcalinidade elevada no meio de cultivo para permitir maior taxa de transferência de massa dos gases ácidos (CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S) do biogás para a fase líquida; e melhoria da atividade fotossintética de forma a aumentar a concentração de biomassa de microalga no meio de cultivo, resultando em eficiência de remoções mais elevada.

## 5. Referências

- Abu Hajar, H. A., Guy Riefler, R., & Stuart, B. J. (2016). Anaerobic digestate as a nutrient medium for the growth of the green microalga *Neochloris oleoabundans*. *Environmental Engineering Research*, 21(3), 265–275. <https://doi.org/10.4491/EER.2016.005>
- Ángeles, R., Arnaiz, E., Gutiérrez, J., Sepúlveda-Muñoz, C. A., Fernández-Ramos, O., Muñoz, R., & Lebrero, R. (2020). Optimization of photosynthetic biogas upgrading in closed photobioreactors combined with algal biomass production. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101554. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2020.101554>
- Awe, O. W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D. P., & Lyczko, N. (2017). A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. *Waste and Biomass Valorization*, 8(2), 267–283. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9826-4>
- Aziz, M. M. A., Kassim, K. A., ElSergany, M., Anuar, S., Jorat, M. E., Yaacob, H., Ahsan, A., Imteaz, M. A., & Arifuzzaman. (2020). Recent advances on palm oil mill effluent (POME) pretreatment and anaerobic reactor for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 106215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109603>
- Bahr, M., Díaz, I., Dominguez, A., González Sánchez, A., & Muñoz, R. (2014). Microalgal-biotechnology as a platform for an integral biogas upgrading and nutrient removal from anaerobic effluents. *Environmental Science and Technology*, 48(1), 573–581. [https://doi.org/10.1021/ES403596M/SUPPL\\_FILE/ES403596M\\_SI\\_001.PDF](https://doi.org/10.1021/ES403596M/SUPPL_FILE/ES403596M_SI_001.PDF)
- Bose, A., Lin, R., Rajendran, K., O'Shea, R., Xia, A., & Murphy, J. D. (2019). How to optimise photosynthetic biogas upgrading: a perspective on system design and microalgae selection. *Biotechnology Advances*, 37(8), 107444. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107444>
- Confederação Nacional da Indústria. (2019). *Especificação do gás natural: oportunidades e experiências internacional*. CNI.
- Das, J., Ravishankar, H., & Lens, P. N. L. (2022). Biological biogas purification: Recent developments, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management*, 304, 114198. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.114198>
- de Arespachoga, N., Valderrama, C., Mesa, C., Bouchy, L., & Cortina, J. L. (2014). Biogas biological desulphurisation under extremely acidic conditions for energetic valorisation in Solid Oxide Fuel Cells. *Chemical Engineering Journal*, 255, 677–685. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2014.06.073>
- Flores-Cortés, M., Pérez-Trevilla, J., de María Cuervo-López, F., Buitrón, G., & Quijano, G. (2021). H<sub>2</sub>S oxidation coupled to nitrate reduction in a two-stage bioreactor: Targeting H<sub>2</sub>S-rich biogas desulfurization. *Waste Management*, 120, 76–84. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.11.024>
- Franco-Morgado, M., Alcántara, C., Noyola, A., Muñoz, R., & González-Sánchez, A. (2017). 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*, 592, 419–425. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.03.077>
- Franco-Morgado, M., Tabaco-Angoa, T., Ramírez-García, M. A., & González-Sánchez, A. (2021). Strategies for decreasing the O<sub>2</sub> content in the upgraded biogas purified via microalgae-based technology. *Journal of Environmental Management*, 279, 111813. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.111813>
- Jacob, J. M., Ravindran, R., Narayanan, M., Samuel, S. M., Pugazhendhi, A., & Kumar, G. (2020). Microalgae: A prospective low cost green alternative for nanoparticle synthesis. *Current Opinion in Environmental Science and Health*. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.12.005>
- Kadam, R., & Panwar, N. L. (2017). Recent advancement in biogas enrichment and its applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 892–903. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.167>
- Khan, I. U., Hafiz Dzarfan Othman, M., Hashim, H., Matsuura, T., Ismail, A. F., Rezaei-DashtArzhandi, M., & Wan Azelee, I. (2017). Biogas as a renewable

- energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management*, 150, 277–294. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>
- Konrad, O., Akwa, J. V., Koch, F. F., Tonetto, M., & Jaqueline, L. (2016). Quantification and characterization of the production of biogas from blends of agro-industrial wastes in a large-scale demonstration plant. *Acta Scientiarum. Technology*, 38(4), 415–421.
- Koutra, E., Economou, C. N., Tsafraquidou, P., & Kornaros, M. (2018). Bio-Based Products from Microalgae Cultivated in Digestates. *Trends in Biotechnology*, 36(8), 819–833. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.02.015>
- Kunz, A., Steinmetz, R. L. R., & Amaral, A. C. (2019). *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*. Sbera: Embrapa Suíno e Aves.
- Meier, L., Barros, P., Torres, A., Vilchez, C., & Jeison, D. (2017). Photosynthetic biogas upgrading using microalgae: Effect of light/dark photoperiod. *Renewable Energy*, 106, 17–23. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.01.009>
- Meier, L., Stará, D., Bartacek, J., & Jeison, D. (2018). Removal of H<sub>2</sub>S by a continuous microalgae-based photosynthetic biogas upgrading process. *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 65–68. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2018.07.014>
- Miltner, M., Makaruk, A., & Harasek, M. (2017). Review on available biogas upgrading technologies and innovations towards advanced solutions. *Journal of Cleaner Production*, 161, 1329–1337. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.06.045>
- Muñoz, R., Meier, L., Diaz, I., & Jeison, D. (2015). A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 14(4), 727–759. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9379-1>
- Noorain, R., Kindaichi, T., Ozaki, N., Aoi, Y., & Ohashi, A. (2019). Integrated biological–physical process for biogas purification effluent treatment. *Journal of Environmental Sciences*, 83, 110–122. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2019.02.028>
- Pinto, R. L. da S., Vieira, A. C., Scarpetta, A., Marques, F. S., Jorge, R. M. M., Bail, A., Jorge, L. M. M., Corazza, M. L., & Ramos, L. P. (2022). An overview on the production of synthetic fuels from biogas. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101104. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2022.101104>
- Posadas, E., Marín, D., Blanco, S., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2017). Simultaneous biogas upgrading and centrate treatment in an outdoors pilot scale high rate algal pond. *Bioresource Technology*, 232, 133–141. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.01.071>
- Posadas, E., Szpak, D., Lombó, F., Domínguez, A., Díaz, I., Blanco, S., García-Encina, P. A., & Muñoz, R. (2015). Feasibility study of biogas upgrading coupled with nutrient removal from anaerobic effluents using microalgae-based processes. *Journal of Applied Phycology* 2015 28:4, 28(4), 2147–2157. <https://doi.org/10.1007/S10811-015-0758-3>
- Prandini, J. M., da Silva, M. L. B., Mezzari, M. P., Pirolli, M., Michelon, W., & Soares, H. M. (2016). Enhancement of nutrient removal from swine wastewater digestate coupled to biogas purification by microalgae *Scenedesmus* spp. *Bioresource Technology*, 202, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.082>
- Rehman, M., Kesharvani, S., Dwivedi, G., & Gidwani Suneja, K. (2022). Impact of cultivation conditions on microalgae biomass productivity and lipid content. *Materials Today: Proceedings*, 56, 282–290. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.01.152>
- Rodero, M. del R., Lebrero, R., Serrano, E., Lara, E., Arbib, Z., García-Encina, P. A., & Muñoz, R. (2019). Technology validation of photosynthetic biogas upgrading in a semi-industrial scale algal-bacterial photobioreactor. *Bioresource Technology*, 279, 43–49. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.01.110>
- Rodero, M. del R., Posadas, E., Toledo-Cervantes, A., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2018). Influence of alkalinity and temperature on photosynthetic biogas upgrading efficiency in high rate algal ponds. *Algal Research*, 33, 284–290. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2018.06.001>
- Roy, U. K., Radu, T., & Wagner, J. L. (2021). Carbon-negative biomethane fuel production: Integrating anaerobic digestion with algae-assisted biogas purification and hydrothermal carbonisation of digestate. *Biomass and Bioenergy*, 148, 106029. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2021.106029>
- Ryckebosch, E., Drouillon, M., & Vervaeren, H. (2011). Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1633–1645. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2011.02.033>
- Saratale, R. G., Kumar, G., Banu, R., Xia, A., Periyasamy, S., & Dattatraya Saratale, G. (2018). A critical review on anaerobic digestion of microalgae and macroalgae and co-digestion of biomass for enhanced methane generation. *Bioresource Technology*, 262, 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.030>
- Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Valijanian, E., Kazemi Shariat Panahi, H., Nizami, A. S., Ghanavati, H., Sulaiman, A., Mirmohamadsadeghi, S., & Karimi, K. (2020). A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part I: Upstream strategies. *Renewable Energy*, 146, 1204–1220. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.037>
- Thiruselvi, D., Kumar, P. S., Kumar, M. A., Lay, C. H., Aathika, S., Mani, Y., Jagadiswary, D., Dhanasekaran, A., Shanmugam, P., Sivasenan, S., & Show, P. L. (2021). A critical review on global trends in biogas scenario with its up-gradation techniques for fuel cell and future perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(31), 16734–16750. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.10.023>
- Toledo-Cervantes, A., Madrid-Chirinos, C., Cantera, S., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2017). Influence of the gas-liquid flow configuration in the absorption column on photosynthetic biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors. *Bioresource Technology*, 225, 336–342. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.11.087>
- Uggetti, E., Sialve, B., Latrielle, E., & Steyer, J. P. (2014). Anaerobic digestate as substrate for microalgae culture: The role of ammonium concentration on the microalgae productivity. *Bioresource Technology*, 152, 437–443. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2013.11.036>
- Xu, M., Xue, Z., Liu, J., Sun, S., Zhao, Y., & Zhang, H. (2022). Observation of few GR24 induced fungal-microalgal pellets performance for higher pollutants

removal and biogas quality improvement. *Energy*, 244, 123171. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.123171>

Xu, M., Xue, Z., Sun, S., Zhao, C., Liu, J., Liu, J., & Zhao, Y. (2020). Co-culturing microalgae with endophytic bacteria increases nutrient removal efficiency for biogas purification. *Bioresource Technology*, 314, 123766. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.123766>

Zhang, Y., Kawasaki, Y., Oshita, K., Takaoka, M., Minami, D., Inoue, G., & Tanaka, T. (2021). Economic assessment of biogas purification systems for removal of both H<sub>2</sub>S and siloxane from biogas. *Renewable Energy*, 168, 119–130. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.12.058>

Zhou, W., Wang, J., Chen, P., Ji, C., Kang, Q., Lu, B., Li, K., Liu, J., & Ruan, R. (2017). Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: Advances and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1163–1175. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.065>

### 3.5 Artigo 5: Evaluation of Biogas and Methane Production from Microalgae<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Artigo em avaliação pela Revista BioEnergy Research. ISSN 1939-1234. A revista possui *Qualis* A1 na avaliação 2017-2019. Autores: Castro, A. C.; Mõrs, J.; Couto, J. S.; Horn, B. C.; Bezama, A.; Konrad, O.

## Evaluation of Biogas and Methane Production from Microalgae

Castro, Aline A.<sup>1</sup>; Mörs, Joice<sup>1</sup>; Couto, Jeferson da S.<sup>1</sup>; Horn, Bruna C.<sup>1</sup>; Bezama, Alberto<sup>2</sup>;  
Konrad, Odorico<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Vale do Taquari, Avelino Talini Avenue 171, Lajeado, RS 95914-014, Brazil.

<sup>2</sup>Department of Bioenergy, Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Permoser  
Straße 15, 04318 Leipzig, Germany.

Aline Antonia Castro

alineantoniacaastro@yahoo.com.br

**Abstract:** Biogas generated from microalgae has been highlighted for presenting a high concentration of methane compared to other substrates. This study aimed to evaluate the potential of using microalgae biomass for the production of biogas and methane. The sample consisted of the microalgae *Euglena sanguinea* collected in a natural pond. The experiments were carried out on a laboratory scale, in triplicate, using 1 L reactors, filled with 500g of inoculum and sample, in defined proportions according to the German VDI 4630 standard and placed in a bacteriological incubator at a mesophilic temperature of 35°C, remaining for 31 days. The volume of biogas generated was evaluated and the percentage of methane in the biogas was measured. The sample presented an average accumulated production of biogas of 1619.63 mL and the volume of methane in the biogas of 746.27 mL, reaching a maximum of 65.54% on the 31st day of the experiment. The Biochemical Biogas Potential obtained was 703.19 mL.gvs<sup>-1</sup> and the Biochemical Methane Potential was 334.37 mL.gvs<sup>-1</sup>. With the results obtained, it is suggested that microalgae have potential for use as a substrate for the generation of biogas with a high concentration of methane.

**Keywords:** Biofuels. Biogas. Sustainable energy. Microalgae.

### Introduction

The issues linked to the energy crisis, as well as the growing environmental pollution, have led to the search for innovative and environmentally friendly technologies [1]. Energy is considered a basic necessity of human civilization. However, non-renewable sources, such as fossil fuels, release large amounts of greenhouse gases into the atmosphere, contributing to

increased global warming [2-4]. In addition, the high exploitation of natural resources and the inefficient use of oil also reinforce the need for alternative sources. Replacing and reducing the use of petroleum-based fuels is shown to be the best solution to reduce negative environmental impacts [5].

In the current scenario, due to the rising costs of agricultural inputs such as corn, soybean, and sugarcane, the production of biofuels based on first-generation (1G) feedstock has been hampered, as it can trigger a risky situation regarding land use, leading to increased food insecurity. Therefore, microalgae biomass emerges as a propitious feedstock for the production of third generation (3G) biofuels [6].

Microalgae have advantages compared to other crops, such as high ability to accumulate lipids and carbohydrates, high photosynthetic rate, optimal carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) fixation, faster growth compared to land plants, and do not compete with food crops [6, 1]. In addition, microalgae can grow in wastewater, absorbing the nitrogen, phosphorus and potassium present in the medium as a source of nutrients for their development, also contributing to the treatment of these effluents, avoiding the eutrophication of water bodies [1]. Microalgal biomass can be used in the production of different types of biofuels, such as biogas in replacement of natural gas, biodiesel in competition to diesel, and coal, being a solid biofuel, as an alternative to natural coal [7]. Among the types of biofuels from microalgae, the biogas produced by the anaerobic digestion process has the great advantage of using wet biomass, with low solids content, from 5 to 8%, reducing costs spent on drying. The cultivation of microalgae in sewage treatment effluents allows the reduction of the overall costs of biogas generation, contributing to the improvement of the sustainability of the process [6].

Also, with regard to biogas production, a number of other feedstocks can be used as substrates, among which animal manure, organic waste, and plant biomass stand out [8]. Menardo and Balsari [9] emphasized the energy potential of a number of agricultural by-products and organic wastes in the sense of being substitutes for energy crops in the production of electricity.

Microalgal cellular composition is species-related and highly dependent on the environmental conditions of cultivation. Three main groups of elements are part of the biochemical composition of microalgae: proteins, carbohydrates, and lipids, in varying proportions [10]. These components are easily digested by the process of anaerobic digestion [11]. Anaerobic digestion of organic matter is recognized as an established commercial

technology that has economic, environmental and energy advantages, and is used worldwide for waste treatment and energy production [5].

Anaerobic digestion is a renewable biochemical process in which a consortium of microorganisms digest organic matter, in the absence of oxygen, producing biogas [12]. The main advantages of anaerobic digestion are higher energy yield, no need for feedstock extraction or drying, possibility of biogas purification and co-digestion [13].

Biogas is essentially composed of methane ( $\text{CH}_4$ ) (60-70%) and  $\text{CO}_2$  (30-40%), and low contents of hydrogen sulfide gas ( $\text{H}_2\text{S}$ ) and water ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Biogas can be applied for electricity generation in power plants and for combustion [14-15]. When purified, biomethane can be used as fuel for internal combustion engines [2].

The use of microalgae for biofuel production has great importance to meet the future demand for energy and prevent global warming, as it promotes the reduction of the release as well as the removal of carbon dioxide gas in the atmosphere. Therefore there are several studies investigating microalgae species for their effectiveness in biofuel production [16].

This study aimed to evaluate the potential for biogas and methane generation, using microalgae biomass as substrate, on a laboratory scale and under mesophilic conditions via anaerobic digestion, following the German standard VDI 4630 [17].

## **Methodology**

The anaerobic digestion trial was carried out at the Center for Research in Sustainable Energy and Technology (CPETS), located in the Taquari Valley Science and Technology Park (Tecnovates).

### *Evaluated substrate*

The sample evaluated in the anaerobic digestion assay is composed of microalgae of the species *Euglena sanguinea*, collected from a natural lagoon, located at the geographical coordinates 29°25'01.0 "S 51°35'18.7 "W (Fig. 1). This species was selected because it was locally available in abundance, which facilitated biomass collection and reduced the costs of strain acquisition and cultivation.

**Fig. 1** Natural pond with microalgae *Euglena sanguinea*



The species *Euglena sanguinea* was identified by microscopic examination. The nomenclature of the identified microalgae is as follows: Division - *Euglenozoa*, Class - *Euglenoidea*, Order - *Euglenales*, Family - *Euglenaceae*, Genus - *Euglena* and Species - *Euglena sanguinea*. *Euglena sanguinea* is considered a hardy freshwater species. It has a high amount of lipids and carbohydrates, being considered a potential source for the extraction of biodiesel [2]. Its metabolism is phototropic and heterotrophic, and it can grow using only light as an energy source or use organic elements, or a combination of these [18]. Due to the natural floating activity of *Euglena sanguinea*, the biomass formed a floating layer in the lagoon, which was collected and transported to the site of the experiments in sterile containers.

#### *Anaerobic digestion*

Anaerobic digestion analysis was performed on a batch basis, where 1,000 mL glass reactors were filled with 500g of sample, in triplicates, consisting of inoculum and microalgae and incubated at mesophilic temperature (35 °C) in a bacteriological incubator, connected to an automated biogas measurement system (SAMB), developed by Konrad et al. [19-20] (Fig. 2).

**Fig. 2** Automated System for Biogas Measurement – SAMB



The volume of biogas generated in the reactors was quantified by displacing an acid solution in a U-shaped tube, coupled to an IFODI-3180-11P sensor (Ace Schmersal) that issues a record every 40 mL of gas produced, called an "event". Temperature and pressure were monitored by specific sensors ( $\Delta T$  min = 0.0625 °C; TEMP-WM sensor, Novus for temperature control and  $\Delta P$  min = 0.24hPa; TP - ST18 sensor, Acros for atmospheric pressure). The generated data were stored on a server and used for normalization of the volume of gas produced at each event, according to the "Ideal Gas Equation".

For validation purposes of the experiment, as recommended by VDI 4630 [17], the positive control was performed with reactors composed of inoculum and microcrystalline cellulose (MC) U.S.P., and the negative control, containing only inoculum. The inoculum used in the anaerobic digestion analysis was an already digested organic material, acclimated to 35°C, whose biogas production and composition were constant and adequate to the experiments.

The amounts of inoculum and microalgae were defined based on the premises of the German standard VDI 4630 [17], which defines them according to the amount of volatile solids (SV) of the substrates, which should not exceed the ratio of  $SV_{\text{substrate}}/S_{\text{sample}} SV \leq 0.5$ ,

and the concentration of total solids (ST) of the mixture, which cannot be higher than 10% [17].

The analysis of total, volatile and fixed solids were performed according to the methodology described in Standard Methods [21]. In addition to being requirements for performing the anaerobic digestion test, these analyses determine the concentration of organic matter (VS) and inorganic matter (FS) present. The hydrogen potential (pH) of the substrates was determined through the digital pH meter (DIGIMED), which preferably should be in the neutral range, so that favor the process of anaerobic digestion [22]. The characteristics of the substrates evaluated are presented in Table 1.

**Table 1** Characterization of the substrates

Sample	pH	TS	VS	FS
<i>Euglena sanguinea</i>	5.92 ± 0.00	4.09 ± 0.03	93.86 ± 0.24	6.14 ± 0.24
Inoculum	8.15 ± 0.05	1.79 ± 0.20	56.27 ± 0.39	43.73 ± 0.39
MC	7.46 ± 0.00	95.18 ± 0.10	100.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00

From the solid analysis, the proportions of inoculum and *Euglena sanguinea* for the digestion assay were defined as 57.87 g of sample and 442.13 g of inoculum. Regarding the positive and negative control, 2.63 g of MC and 497.39 g of inoculum and 500 g of inoculum, respectively, were defined. The reactors filled with the mixture of inoculum and sample were incubated and connected to tubes for automated biogas flow measurement, as described by Konrad et al. [19-20]. The percentage of methane was evaluated three times a week using a specific sensor (Advanced Gasmitter - PRONOVA), which takes readings from a 20 mL aliquot of biogas collected in each reactor through a syringe.

As defined by VDI Standard 4630 [17], the experiment should be terminated when the reactors reach the stability criterion, which occurs when the daily volume of biogas produced by each reactor is less than 1% of the accumulated volume of biogas for three uninterrupted days.

#### *Biochemical biogas potential (BBP) and biochemical methane potential (BMP)*

The BBP and BMP are values used to verify the degradability of organic matter and, consequently, its production of biogas and methane. The determination of these variables

occurs from Equation 1, shown below. Its result is expressed in liters of biogas or methane per kilogram of volatile solids ( $\text{mL.g}_{\text{sv}}^{-1}$ ) [17].

$$BBP \text{ or } BMP = \frac{V_S - V_i \left( \frac{mVS_{is}}{mVS_i} \right)}{mVS_S} \quad (1)$$

where:

$V_S$ : accumulated volume of biogas or methane in the inoculant + co-digestion treatment (mL);

$V_i$ : accumulated volume of biogas or methane in the treatment with inoculant (mL);

$mVS_{is}$ : mass of volatile solids in inoculant + biomass treatment (g);

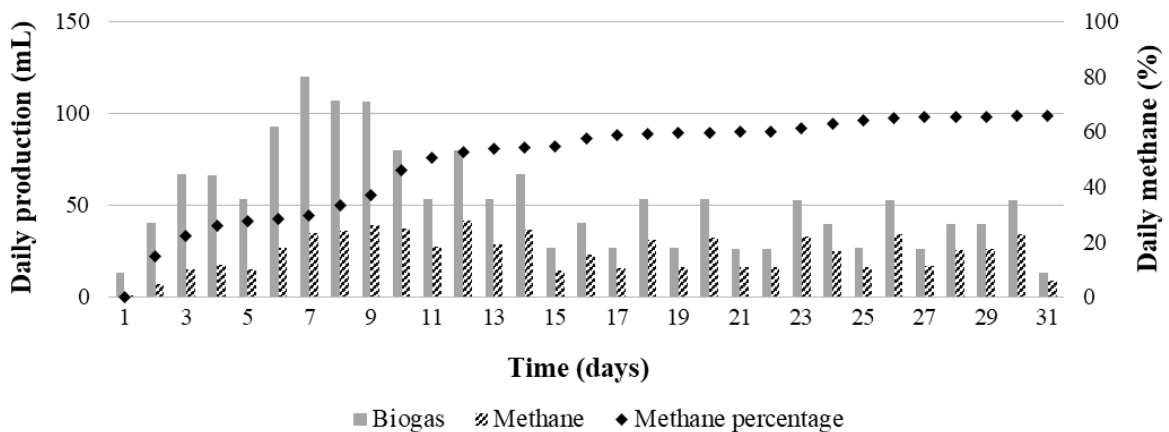
$mVS_i$ : mass of volatile solids in the treatment with inoculant (g);

$mVS_S$ : mass of volatile solids in co-digestion treatment (g).

## Results and discussions

The results obtained were presented and discussed with respect to anaerobic digestion trials, analyzing the daily and cumulative biogas and methane generation and biochemical biogas and methane potential (BBP and BMP) from biomass of the microalgae *Euglena sanguinea*. The results of daily biogas and methane generation from microalgae biomass are presented in Fig. 3.

**Fig. 3** Daily generation of biogas and methane from the microalgae *Euglena sanguinea*



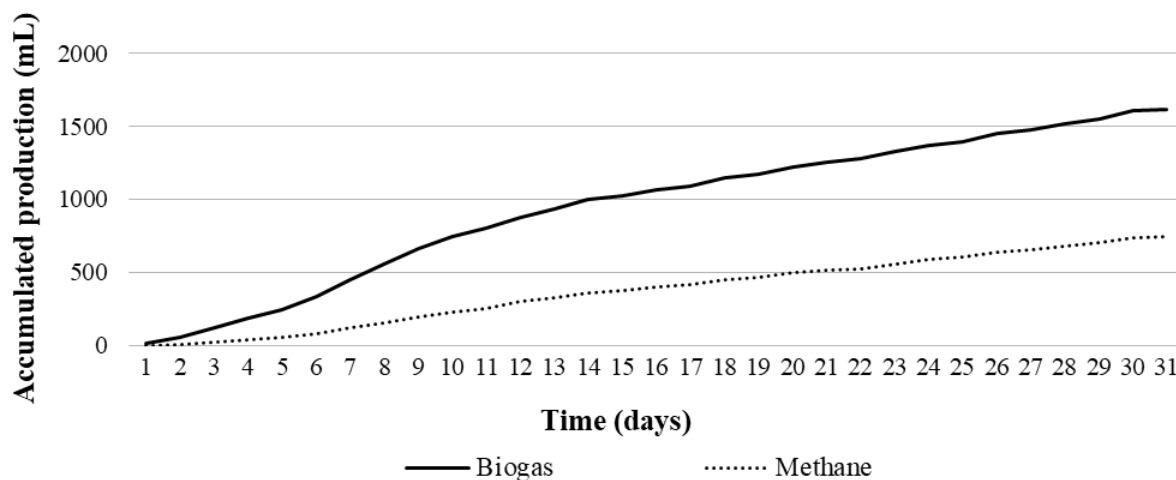
The daily biogas generation using microalgae as substrate increased from 13.34 mL on day 1 to a peak of 119.54 mL on day 7, remaining with values of 106.60 mL and 106.44 mL on days 8 and 9. Starting on day 10, the biogas production showed a reduction, which occurred due to the consumption of easily biodegradable components. The biogas production was reduced to a value around 50.00 mL/day, ending on the 31st day of the experiment. However, the percentage of methane showed an opposite behavior, increasing and maintaining stability until the end of the experiment.

The methane percentage of the triplicate composed of *E. sanguinea* reached  $22.02 \pm 2.81\%$  already on day 3 of the experiment, demonstrating a rapid initial increase in CH<sub>4</sub> production, but only on day 8 exceeded 30% concentration of the component in the biogas, which is in accordance with the fact that microalgae biomass has a certain degree of resistance to anaerobic digestion due to their recalcitrant cell walls. Starting on day 9, the percentage of methane increased rapidly, reaching  $50.35 \pm 2.51\%$  on day 11. According to Hu et al. [23], the rapid increase occurs due to the breakdown of microalgae cells, releasing biodegradable cellular elements such as carbohydrates and proteins into the medium. From day 12 onward, the increase in methane in the biogas was gradual, reaching  $61.24 \pm 3.33\%$  on day 23, and the maximum CH<sub>4</sub>,  $65.54 \pm 1.97\%$ , on day 31. According to Kings et al. [18], this behavior may be associated with the hydrolysis of slowly biodegradable components, such as lipids and cell wall.

The CH<sub>4</sub> content was greater than 60% from day 23 of the experiments. These results were divergent from those found by Fu et al. [24], who, using manure sludge and microalgae, found that methane accumulated rapidly after inoculation and methanogenesis ended in 20 days, with a maximum percentage of 77.32% methane. In the experiments of Mounmoon et al. [2], using the microalgae *Acutodesmus* sp. the methane content was recorded at  $58.3 \pm 6.0\%$  v/v in 21 days of evaluation.

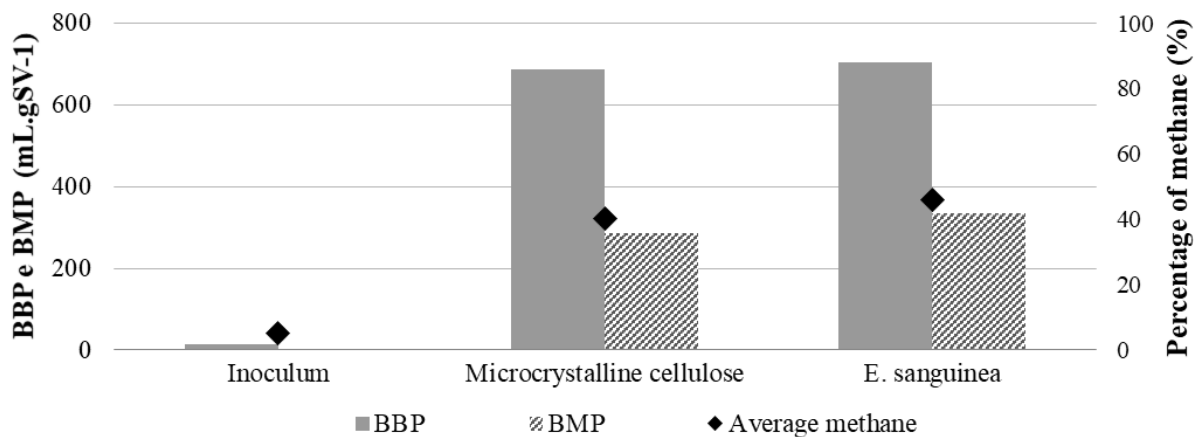
In their study, Silva et al. [25] evaluated the production of biogas from household solid organic waste, having the maximum methane recorded on the 15th day of the experiment, when it reached 75%. Silva et al. [26] analyzed the production of methane from a mixture of sewage sludge and pruning waste, the experiment lasted 60 days and reached a maximum of 48% methane in the generated gas. The accumulated volume of biogas and biomethane produced by the biomass of the microalgae *E. sanguinea* during the period of the experiment (31 days) can be seen in Fig. 4.

**Fig. 4** Cumulative production of biogas and methane from the microalgae *Euglena sanguinea*



The anaerobic digestion of *Euglena sanguinea* biomass showed a cumulative biogas production of  $1,619.63 \pm 283.00$  mL and CH<sub>4</sub> in the biogas of  $746.27 \pm 140.85$  mL. For the inoculum, the accumulated production was 32.06 mL of biogas and 1.52 mL of methane; and for microcrystalline cellulose, the accumulated production of biogas and methane was 1,779.92 mL and 746.27 mL, respectively. Regarding other substrates used in anaerobic digestion, the research of Guerini Filho et al. [27] showed that grape must and grape pomace obtained the values of biogas production of 7,624.48 mL and 1,314.76 mL, and methane production of 5,239.30 mL and 616.42 mL, respectively. The biogas and methane biochemical potential of the inoculum, microcrystalline cellulose, and *E. sanguinea* microalgae are shown in Fig. 5.

**Fig. 5** Biochemical biogas potential and biochemical methane potential



The production obtained for biogas was  $12.72 \pm 28.43 \text{ mL.gvs}^{-1}$  (inoculum),  $688.29 \pm 51.79 \text{ mL.gvs}^{-1}$  (microcrystalline cellulose) and  $703.19 \pm 127.31 \text{ mL.gvs}^{-1}$  (*E. sanguinea*). Methane production was  $0.67 \pm 1.51 \text{ mL.gvs}^{-1}$  (inoculum),  $285.65 \pm 15.16 \text{ mL.gvs}^{-1}$  (microcrystalline cellulose) and  $334.37 \pm 63.35 \text{ mL.gvs}^{-1}$  (*E. sanguinea*). The results obtained were higher than those found by Llamas et al. [28], who obtained methane yields after 38 days of digestion of  $200 \text{ mL.g vs}^{-1}$ , using *Chlorella vulgaris* microalgae biomass.

Kendir Çakmak and Ugurlu [12], under mesophilic conditions and using untreated *P. cruentum* biomass, obtained a net cumulative methane result of  $130 \text{ mL.g vs}^{-1}$ ; with red marine microalgae of the genus *Porphyridium purpureum*, they had a methane yield of  $264 \text{ mL.g vs}^{-1}$  and with *P. sordidum*, the methane yield was  $236 \text{ mL.g vs}^{-1}$ .

Regarding other substrates, Guerini Filho et al. [27], using grape must as a substrate for anaerobic digestion, demonstrated that the highest biogas and methane generation was  $1,151.71$  and  $837.69 \text{ mL.gvs}^{-1}$ , respectively. Bucker et al. [29], in anaerobic digestion experiments using fish waste and fish oil waste as substrate, had methane yields of  $540.45 \text{ mL.gvs}^{-1}$  and  $426.36 \text{ mL.gvs}^{-1}$ , respectively. Hu et al. [23] evaluated the co-digestion of microalgae and swine manure and found that the methane yield was  $547 \text{ mL.gvs}^{-1}$ .

The average  $\text{CH}_4$  concentration was 4.73%, 40.25% and 45.99 % for inoculum, microcrystalline cellulose and microalgae, respectively. The highest biogas and methane production, as well as the highest methane content, were obtained by the *E. sanguinea* microalgae biomass.

Biogas generation from microalgae through anaerobic digestion is a widely used technology that offers some advantages over other biofuel production routes, such as having high methane concentration (60-70 %) and low sulfur concentrations when compared to

biogas from other substrates [30-31]. Because of their advantages over other feedstocks, research into biogas production from microalgae has increased recently. The mineral composition of microalgae cells supplies the nutritional needs of anaerobic bacteria. Thus, microalgae biomass is a suitable substrate for anaerobic digestion. In addition, microalgae release less hydrogen sulfide during anaerobic digestion due to their low amount of sulfur amino acids [32].

In view of the efficiency in the sustainable generation of biofuels, several species of microalgae are being studied. The main components in the production of biofuels with microalgae are carbohydrates, lipids and proteins. Due mainly to the high protein and ester content, the faster growth and the need for less land area in cultivation compared to other oil crops, the capacity of microalgae biomass as biofuel feedstock has become extraordinary [16].

The commercial potential of *Euglena* was recognized after the discovery of high protein content and amino acid profiles. Several studies have reported large amounts of lipids in *Euglena* cells, composed of up to 13 different types of fatty acids of which approximately 50% were unsaturated fatty acids. The higher efficiency of lipid biosynthesis under photosynthetic, heterotrophic and anaerobic conditions has increased the biotechnological potential of *Euglena* as a source of lipids for biofuel production [16, 33-34].

## **Conclusion**

This research evaluated the potential for biogas and methane generation using *Euglena sanguinea* microalgae biomass as a substrate, on a laboratory scale, under mesophilic conditions via anaerobic digestion, according to German standard VDI 4630 (2006).

The results of the anaerobic digestion of the microalgae *Euglena sanguinea* indicated that the biochemical biogas potential (BBP) obtained was  $703.19 \text{ g.mL}_{SV}^{-1}$  and the biochemical methane potential (BMP) was  $334.37 \text{ g.mL}_{SV}^{-1}$ .

Given the above, it is inferred that the microalgae *Euglena sanguinea* presents high degradability according to the value obtained from VS analysis, which suggests high potential for use as a substrate for biogas generation with high concentration of methane.

## **Statements and Declarations**

**Funding Information** The authors declare that no funds, grants, or other support were received during the preparation of this manuscript.

**Competing Interests** The authors declare no competing interests.

**Author Contributions** All authors contributed to the preparation of this research. The collection, material preparation and testing were performed by Aline Antonia Castro, Joice Mörs, Jeferson da Silva Couto, Bruna Carolina Horn and Odorico Konrad. The analyses were done by Joice Mörs, Jeferson da Silva Couto and Bruna Carolina Horn. The writing was done by Aline Antonia Castro, Joice Mörs, Bruna Carolina Horn, Odorico Konrad and Alberto Bezama. The general revision and final approval were done by all authors.

## References

1. Xiar C et al. (2020) Life cycle and economic assessments of biogas production from microalgae biomass with hydrothermal pretreatment via anaerobic digestion. *Renewable Energy* 151:70–78
2. Mounghmoon T et al. (2020) Quantitative analysis of methane and glycolate production from microalgae using undiluted wastewater obtained from chicken-manure biogas digester. *Science of The Total Environment*.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136577>
3. Saratale GD, Jung MY, Oh MK (2016) Reutilization of green liquor chemicals for pretreatment of whole rice waste biomass and its application to 2,3-butanediol production. *Bioresource Technology* 205:90–96
4. Sivagurunathan P et al. (2017) Fermentative hydrogen production using lignocellulose biomass: An overview of pre-treatment methods, inhibitor effects and detoxification experiences. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77:28–42
5. Yukesh Kannah R et al. (2021) A review on anaerobic digestion of energy and cost effective microalgae pretreatment for biogas production. *Bioresource Technology*.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125055>
6. Carrillo-Reyes J et al (2021) Thermophilic biogas production from microalgae-bacteria aggregates: biogas yield, community variation and energy balance. *Chemosphere*.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129898>
7. Maroušek J et al. (2020) Advances in nutrient management make it possible to accelerate biogas production and thus improve the economy of food waste processing. *Energy*

Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects.  
<https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1776796>

8. Strauß C et al. (2019) Can Energy Cropping for Biogas Production Diversify Crop Rotations? Findings from a Multi-Site Experiment in Germany. *BioEnergy Research* 12:123–136
9. Menardo S, Balsari P (2012) An Analysis of the Energy Potential of Anaerobic Digestion of Agricultural By-Products and Organic Waste. *BioEnergy Research* 5:759–767
10. Sudhakar MP, Kumar BR, Mathimani T, Arunkumar K (2019) A review on bioenergy and bioactive compounds from microalgae and macroalgae-sustainable energy perspective. *J Clean Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.287>
11. Kannah RY et al. (2018) Food Waste Valorization by Microalgae. *Energy, Environment, and Sustainability.* [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7431-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7431-8_14)
12. Kendir Çakmak E, Ugurlu A (2020) Enhanced biogas production of red microalgae via enzymatic pretreatment and preliminary economic assessment. *Algal Research.* <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101979>
13. Saratale RG et al. (2018) A critical review on anaerobic digestion of microalgae and macroalgae and co-digestion of biomass for enhanced methane generation. *Bioresource Technology* 262:319–332
14. Ayala-Parra P et al. (2017) Nutrient recovery and biogas generation from the anaerobic digestion of waste biomass from algal biofuel production. *Renewable Energy* 108:410–416
15. Barbot YN, Al-Ghaili H, Benz R (2016) A Review on the Valorization of Macroalgal Wastes for Biomethane Production. *Marine Drugs.* <https://doi.org/10.3390/md14060120>
16. Kottuparambil S, Thankamony RL, Agusti S (2019) *Euglena* as a potential natural source of value-added metabolites. A review. *Algal Research* 37:154–159
17. VDI (2006) VDI 4630 - Fermentation of organic materials characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Verein Deutscher Ingenieure

18. Kings AJ et al. (2017) Cultivation, extraction and optimization of biodiesel production from potential microalgae *Euglena sanguinea* using eco-friendly natural catalyst. *Energy Conversion and Management* 141:224–235
19. Konrad O et al. (2016) Quantification and characterization of the production of biogas from blends of agro-industrial wastes in a large-scale demonstration plant. *Acta Scientiarum. Technology* 38:415–421
20. Konrad O et al. (2021) Comparison of two gas volume measurement systems by evaluating biochemical methane potential. *Environmental Quality Management* 31:201–207
21. APHA (2012) *Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater*, 22nd edn. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington
22. Rincón-Pérez J et al. (2021) Improvement of methane production at alkaline and neutral pH from anaerobic co-digestion of microalgal biomass and cheese whey. *Biochemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.107972>
23. Hu Y et al. (2021) Filamentous microalgae as an advantageous co-substrate for enhanced methane production and digestate dewaterability in anaerobic co-digestion of pig manure. *Waste Management* 119:399–407
24. Fu J et al. (2023) Anaerobic co-digestion of thermo-alkaline pretreated microalgae and sewage sludge: Methane potential and microbial community. *Journal of Environmental Sciences* 127:133–142
25. Silva CO et al. (2020) Resíduos sólidos orgânicos domésticos como substrato potencial para produção de biogás. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais* 11:204-212
26. Silva TC et al. (2021) Produção de biogás utilizando biomassa de poda e lodo de esgoto no Município de Recife (PE). *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* 14:217-228
27. Guerini Filho M et al. (2018) Energy recovery from wine sector wastes: A study about the biogas generation potential in a vineyard from Rio Grande do Sul, Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 29:44–49
28. Llamas M et al. (2020) Microalgae-based anaerobic fermentation as a promising technology for producing biogas and microbial oils. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118184>

29. Bückner F et al. (2020) Fish waste: An efficient alternative to biogas and methane production in an anaerobic mono-digestion system. *Renewable Energy* 147:798–805
30. Ganesh Saratale R et al. (2018) A critical review on anaerobic digestion of microalgae and macroalgae and co-digestion of biomass for enhanced methane generation. *Bioresource Technology* 262:319–332
31. Yin Z et al. (2020) A comprehensive review on cultivation and harvesting of microalgae for biodiesel production: Environmental pollution control and future directions. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122804>
32. González-González LM et al. (2018) Integrated biodiesel and biogas production from microalgae: Towards a sustainable closed loop through nutrient recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82:1137–1148
33. Mahapatra DM, Chanakya HN, Ramachandra TV (2013) *Euglena* sp. as a suitable source of lipids for potential use as biofuel and sustainable wastewater treatment. *Journal of Applied Phycology* 25:855–865
34. O’neill EC et al. (2015) The transcriptome of *Euglena gracilis* reveals unexpected metabolic capabilities for carbohydrate and natural product biochemistry. *Molecular BioSystems* 11:2808–2820

## 4 DISCUSSÃO GERAL

### 4.1 Discussão integrada dos artigos

Este capítulo apresenta a discussão geral dos artigos elaborados. Cada artigo corresponde a um objetivo específico, e o conjunto deles, atende ao objetivo geral da tese, que consiste na avaliação do potencial do uso de culturas de microalgas na produção e na purificação de biogás.

Inicialmente foram propostos dois artigos teóricos para apresentação e conhecimento aprofundado do tema quanto à concepção dos sistemas de microalgas, relacionado ao primeiro objetivo específico. Em seguida, foram elaborados dois artigos para o desenvolvimento do protótipo e a fase experimental de purificação de biogás, de acordo com o segundo e terceiro objetivos específicos. A purificação foi dividida em duas etapas: Artigo 3, que tratou apenas da dessulfurização de biogás, e Artigo 4, que apresentou a purificação quanto aos teores de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{CH}_4$ .

Ambos os artigos descreveram a etapa de construção dos protótipos de purificadores, proposto no segundo objetivo específico. A capacidade de geração de biogás e metano de microalgas está disposta no Artigo 5, correspondendo ao quarto objetivo específico.

O Artigo 1 apresentou uma revisão de literatura com foco nos principais aspectos do cultivo de microalgas. A importância da revisão da literatura está no fato de mostrar com clareza o problema, bem como analisar o estado atual das produções científicas, as tendências de pesquisas e as suas lacunas, de forma a direcionar investigações futuras, contribuindo para o desenvolvimento do conhecimento.

Ao longo de pesquisas contemporâneas publicadas sobre a temática referente ao cultivo de microalgas, o Artigo 1 fez uma ampla revisão para melhor entendimento das etapas do cultivo de microalgas em efluentes, e assim conhecer os desafios que poderiam ocorrer durante o desenvolvimento da etapa experimental da pesquisa. Esse artigo foi de muita relevância para a pesquisa experimental, pois foi possível comprovar a viabilidade técnica do cultivo de microalgas utilizando efluentes residuais como meio de nutrição, como forma de implantação de um sistema sustentável para o biogás.

Como resultado do estudo, o cultivo de microalgas em águas residuais mostrou-se como uma ferramenta eficaz para remoção de nutrientes, como fósforo, nitrogênio e potássio, e outros compostos contaminantes como metais pesados e fármacos, podendo assim ser utilizado como alternativa para o tratamento terciário.

O estudo mostrou ainda que, quanto ao modo de crescimento, o cultivo mixotrófico apresenta maior rendimento de biomassa. No modo mixotrófico, as microalgas são capazes de metabolizar tanto o carbono inorgânico, principalmente CO<sub>2</sub>, quanto o carbono orgânico na presença de luz. Desta forma, o rendimento total da biomassa é a soma dos rendimentos da biomassa autotrófica e heterotrófica (GIRARD et al., 2014; PATEL et al., 2019; AZIZ et al., 2020a) e desta forma, mostra-se como a modalidade de maior produtividade.

Com relação à colheita da biomassa de microalgas, foi mostrado que esta é uma etapa intimamente dependente da morfologia, da densidade e do tamanho das células, das características desejadas do produto final e da possibilidade de reutilização do meio de cultura (ENAMALA et al., 2018). A seleção da técnica de colheita adequada depende dessas características das microalgas. No entanto, ainda nenhum método foi caracterizado como econômico e apropriado para a produção de microalgas em larga escala (MANTZOROU; VERVERIDIS, 2019; ZHUANG et al., 2016).

Portanto, um grande desafio na produção de microalgas está relacionado com os métodos de colheitas (ZHUANG et al., 2016). Como as células das microalgas apresentam um tamanho muito reduzido, a sua recuperação torna-se difícil e onerosa. Por isso, as técnicas de colheita são consideradas como um fator relevante para a determinação dos custos envolvidos no processo de produção.

Devido as características apresentadas pelas células das microalgas, como a baixa densidade, variando de 0,3g.L<sup>-1</sup> a 5 g.L<sup>-1</sup>, e pequenas dimensões, de 2 a-20 µm, configura-se numa tarefa tecnicamente difícil a colheita de maneira eficiente (GULTOM; HU, 2013). A

centrifugação, apesar de apresentar resultados satisfatórios, é um processo que demanda muito gasto com energia. Uma alternativa mais viável sob a ótica técnica e econômica seria o uso da floculação-sedimentação com centrifugação (BOSE et al., 2019). Porém, esse método apresenta outros problemas como a dificuldade de separação e desperdício de toxinas (WU et al., 2021).

Assim, selecionar espécies de microalgas com características que facilitem a colheita torna-se primordial. As espécies filamentosas são mais fáceis de serem colhidas em comparação as espécies unicelulares (KISHI; TODA, 2018). As espécies filamentosas, por exemplo a *Anabaena cylindrica* e a *Spirulina platensis* (50-500  $\mu\text{m}$ ), por apresentarem comprimento relativamente longo, podem ser facilmente coletadas com um tamanho maior de tela, a uma taxa de fluxo mais alta, e assim, reduzindo substancialmente o custo do processo (BOSE et al., 2019).

Quanto ao projeto do fotobiorreator, para obter um desempenho eficiente na produção de biomassa, é necessário apresentar características construtivas como uma ótima relação área/volume, material construtivo deve ser resistente e transparente, com boa durabilidade (OKORO et al., 2019; TANG et al., 2020).

A composição do meio e as condições de cultivo desempenham um papel importante no crescimento celular e no acúmulo de lipídios das microalgas. Vários parâmetros influenciam o crescimento da microalga, como fatores bióticos, abióticos e operacionais. Os fatores abióticos consistem em luz, temperatura, concentração de nutrientes,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , pH, salinidade e produtos químicos tóxicos (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; KUMAR et al., 2016).

Os fatores bióticos consideram a competição com patógenos, como bactérias, fungos, vírus, e com outras microalgas. Os fatores operacionais compreendem a tensão de cisalhamento produzida pelo projeto do biorreator, mistura, turbulência, frequência de colheita, tempo de retenção hidráulico, taxa de diluição e profundidade (TANDON; JIN, 2017; ENAMALA et al., 2018; OKORO et al., 2019; YIN et al., 2020).

A otimização dos parâmetros de crescimento, como intensidade de luz, fotoperíodo, vazão de gás, consumo de  $\text{CO}_2$  e concentração de nutrientes, permite o aumento da produtividade de biomassa e a redução dos custos operacionais. A aeração ideal evitará a sedimentação das células e a incidência de zonas mortas, aglomerações e incrustações que levam à perda de produtividade. (GUO; YAO; HUANG, 2015; OKORO et al., 2019).

O Artigo 2, por meio de uma pesquisa bibliométrica, analisou o interesse da comunidade acadêmica mundial pelo tema relacionado a biotecnologia de microalgas, a fim de revelar o status atual das tendências das pesquisas no meio científico e sugerir o desenvolvimento de novos estudos.

A utilização de informações publicadas em documentos científicos tem o potencial de apontar os principais direcionamentos de pesquisa em um tema. Os levantamentos bibliométricos estão sendo extensivamente usados para difundir resultados de pesquisas na área de biomassa e bioenergia (FERRARI et al., 2020), bioenergia a partir de resíduos (OBILEKE et al., 2022), bem como a situação dos estudos sobre bioenergia relacionada a mudanças climáticas (ZHANG; YU; LI, 2021), apresentando uma nova abordagem e apontando opções para pesquisadores e promotores de políticas (AMPESE et al., 2022).

Uma abordagem importante feita neste artigo refere-se à análise de palavras-chave. Essa análise forneceu um bom indicativo sobre o desenvolvimento das pesquisas com maior ocorrência no campo temático estudado, como, por exemplo, o cultivo de microalgas ligado à biomassa, biocombustíveis e nutrientes. Também revelou informações sobre as espécies de microalgas mais pesquisadas, como a *Chlorella*, a *Chlorella Vulgaris* e a *Scenedesmus*.

Em contrapartida, as palavras-chave que apresentaram menor ocorrência foram adsorção, metais pesados, biofilme, imobilização, metano e floculação. Este fato indica que existe uma lacuna no campo de pesquisas nessas áreas. Estes temas estão relacionados às questões muito relevantes dentro do tema, apontando para uma área de estudo futuro do assunto no meio acadêmico.

Novamente nesse artigo, a colheita de microalgas aparece como um fator limitante ao cultivo, devido ao alto custo requerido com energia (ANSARI et al., 2019). Porém houve uma baixa frequência de repetição desta palavra. Assim, estudos sobre métodos viáveis de colheita, são orientações importantes para futuras pesquisas.

As conexões estabelecidas de todas as palavras-chave mostraram que a maior parte das pesquisas sobre microalgas estão relacionadas à produção de biomassa, métodos de cultivo e desenvolvimento de biocombustível, sugerindo a relevância das pesquisas relacionadas com as condições de cultura de microalgas para a produção de biocombustíveis.

Os resultados da pesquisa mostraram que os estudos sobre a temática continuam crescendo, indicando a grande relevância do tema no meio científico atual e que existe grande

cooperação entre as comunidades acadêmicas entre os países. Segundo Khudzari et al. (2018), a colaboração complementar entre as comunidades internacionais pode ser capaz de promover um crescimento mais acelerado e amplo sobre o tema de pesquisa.

O Artigo 3 apresentou a primeira fase experimental da pesquisa, onde foi avaliada a capacidade de remoção de  $H_2S$  do biogás. Nesse artigo foi feita a descrição da etapa de construção do protótipo de purificador, composto por um reator e uma coluna de transferência. Foram utilizados dois sistemas de purificadores, um contendo a cultura de microalgas/bactérias e no outro somente água, com o intuito de verificar o real potencial dos microrganismos no processo de dessulfurização.

Os resultados da pesquisa e as discussões foram referentes às análises da concentração de  $H_2S$  do biogás afluente e efluente aos protótipos, quanto ao potencial de dessulfurização pelos dois sistemas. A concentração medida por cromatografia gasosa de  $H_2S$  no biogás bruto foi superior a 1.000 ppm. Os resultados apresentaram remoção de 100% de  $H_2S$  no sistema biológico com microalgas, após 180 minutos de operação do sistema.

Para o sistema contendo água, a concentração do gás sulfídrico foi aumentando ao longo do tempo de operação, sugerindo saturação do componente no meio líquido, caso o sistema seja operado ininterruptamente. Assim, os resultados demonstraram que a presença da cultura de microalgas foi responsável pelo melhor desempenho na dessulfurização do biogás.

Os efeitos da temperatura e do pH sobre os sistemas de dessulfurização foram avaliados. No intervalo estudado, as temperaturas estavam variando entre 13,6 a 39,4°C. Tendo em vista que a concentração efluente de  $H_2S$  no sistema fotossintético foi decrescente ao longo do tempo, chegando a zero, entende-se que o intervalo de temperatura foi favorável à dessulfurização no purificador proposto. No sistema contendo água, a concentração de  $H_2S$  efluente foi aumentando gradativamente ao longo do tempo, independente da variação da temperatura registrada no período.

Para o sistema contendo microalgas, apesar de terem sido verificadas reduções significativas nos valores de pH, essas variações não influenciaram na remoção do  $H_2S$ . Mesmo quando os valores do pH eram mais baixos, a remoção completa do gás sulfídrico foi verificada. Para o sistema contendo água, a variação do pH diário medido após a injeção do biogás permaneceu numa faixa entre 4,34 e 5,41. Foi observada uma coloração turva esbranquiçada no reator pela possível existência de íons sulfurados, pois, diferentemente do sistema de microalgas, o enxofre não foi absorvido e acumulou-se no reator.

O Artigo 4 apresentou a segunda fase experimental da pesquisa, onde o mesmo protótipo de purificador foi utilizado para a verificação do potencial de purificação de biogás, com relação aos gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{CH}_4$ . Nesta etapa foi utilizado apenas um conjunto de purificador contendo a cultura de microalgas/bactérias. Este critério foi estabelecido tendo em vista os resultados obtidos no Artigo 3 referentes ao sistema contendo água.

Os resultados mostraram que a menor concentração de  $\text{CO}_2$  no biogás purificado foi de 9,15 %, registrada no primeiro dia das leituras. Nas medições subsequentes, os teores do gás carbônico no biogás purificado variaram de 14,03% a 18,46%. O maior percentual de remoção de  $\text{CO}_2$  foi de 72,02%, no mesmo dia em que o maior valor do pH foi registrado. A menor taxa de remoção foi de 42,46%, registrada no último dia do experimento.

Os teores de  $\text{CH}_4$  no biogás purificado oscilaram de 71,4% a 76,2%, enquanto as concentrações afluentes estavam em torno de 63,08% a 64,32 %. O aumento na concentração de  $\text{CH}_4$  variou de 11,92 % a 20,8%. O teor de oxigênio no biogás afluente à coluna de absorção variou de 0,17% a 0,71% e a concentração efluente oscilou entre os valores de 1,24% a 3,26%.

Os impactos da temperatura e do pH foram avaliados. Nesse estudo foi possível verificar que o pH desempenhou um papel importante na purificação de biogás utilizando microalgas. O pH, quando mantido com valores mais elevados, resultava em eficiência de remoção de  $\text{CO}_2$  mais elevada. O pH mais alto foi de 8,66, que correspondeu à maior remoção de  $\text{CO}_2$  (72,02%), e conseqüentemente, à menor concentração deste componente no biogás purificado (9,15%).

A temperatura é um parâmetro importante no cultivo pois atua na capacidade de crescimento das microalgas. Quanto maior for a temperatura, maior será a capacidade de fixação do  $\text{CO}_2$  presente no biogás pelas microalgas. A solubilidade do biogás no meio líquido também depende da temperatura. A transferência de massa e a temperatura são grandezas inversamente proporcionais. Temperaturas mais baixas resultam em maior solubilidade do  $\text{CO}_2$  e possibilitam aumento de remoção deste componente do biogás pelas microalgas (MEIER et al., 2017).

Neste estudo a temperatura não foi controlada. Não foi possível fazer uma correlação entre os valores de temperatura e os índices de purificação do biogás. Neste caso, uma alternativa viável seria a manutenção da alcalinidade com valores altos, como forma de controle da solubilidade entre gás/líquido. Se o meio de cultivo apresentar alcalinidade média

a alta, o impacto da temperatura não é relevante. Temperaturas mais altas podem ser compensadas pela elevação da alcalinidade, que é um aspecto essencial para garantir melhor transferência de massa entre gás e líquido (RODERO et al., 2018).

Em contrapartida, sendo a atividade fotossintética essencial para a remoção de CO<sub>2</sub> do meio de cultivo, o controle da temperatura torna-se relevante. As temperaturas mais altas favorecem o crescimento de microalgas, pois propiciam o aumento do metabolismo e da atividade fotossintética, resultando no acréscimo da produtividade de biomassa. (JACOB et al., 2020). As temperaturas ótimas de crescimento geralmente variam entre 20 °C e 30 °C (SUBHASH et al., 2014). Se a temperatura não for mantida de maneira ideal, pode ocorrer danos nas vias bioquímicas no interior das células e baixo acúmulo de lipídios (KURPAN et al., 2015).

No experimento, foi observada baixa concentração de biomassa microalgácea no reator, resultado do baixo nível de atividade fotossintética, que provavelmente não foi suficiente para promover a retirada do CO<sub>2</sub> presente no meio de cultivo, o que levou ao aumento da concentração deste componente no meio. Meier et al. (2017) também registraram baixo índice de fotossíntese pelas microalgas, levando à diminuição do pH pelo aumento da concentração de carbono inorgânico dissolvido no fotobiorreator.

Devido a essa baixa concentração de biomassa de microalgas na fase de purificação do biogás, não foi possível a realização dos ensaios de digestão anaeróbia para verificação da capacidade de geração de biogás e metano. Assim, no Artigo 5 foi utilizada a biomassa de microalga que não pertencia ao ciclo de purificação.

O Artigo 5 mostrou a capacidade de produção de biogás e metano da microalga *Euglena sanguinea*. Os resultados da digestão anaeróbia da biomassa da microalga apresentaram produção acumulada de biogás de  $1.619,63 \pm 283,00$  mL e o volume CH<sub>4</sub> no biogás de  $746,27 \pm 140,85$  mL. O rendimento obtido foi de  $715,87 \text{ mL.gvs}^{-1}$  de biogás e de  $335,12 \text{ mL.gvs}^{-1}$  de metano. Os resultados representam uma produtividade de  $27,02 \pm 4,89$  m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de microalgas e  $12,85 \pm 2,43$  m<sup>3</sup> de metano.

O principal propósito para a utilização dos biocombustíveis reside no fato da necessidade urgente de preservação do meio ambiente, pela possibilidade de substituição aos combustíveis fósseis, responsáveis pela emissão de gases que aumentam o aquecimento global. Os biocombustíveis de primeira e segunda geração são os mais utilizados, porém, devido à concorrência com culturas alimentares e à alta demanda por terras aráveis, sua

sustentabilidade tem sido contestada. Neste cenário, os biocombustíveis à base de microalgas tem sido a solução, porque podem ser produzidos em águas residuais ou salinas, não concorrendo com áreas nobres de terras cultiváveis (CHEN et al., 2018b; MISHRA et al., 2018).

A composição celular microalgácea está relacionada à espécie e é altamente dependente das condições ambientais de cultivo. Três grupos principais de elementos fazem parte da composição bioquímica das microalgas: proteínas, carboidratos e lipídios, em proporções variadas (SUDHAKAR et al., 2019). Estes três componentes competem entre si durante a fase de crescimento das microalgas, podendo influenciar consideravelmente nas características do biocombustível no processo de conversão (HO et al., 2020).

Por apresentar estrutura celular simples, as microalgas podem aprimorar sua capacidade fotossintética, por meio do sequestro de carbono, e produzir energia, em virtude da rápida acumulação de lipídios em sua biomassa (SAJJADI et al., 2018). A geração de biogás decorre do tipo de substrato usado na alimentação da digestão anaeróbia, das condições climáticas, do local de produção e do tipo de tecnologia utilizada. O conjunto desses fatores determina a composição do biogás gerado (KADAM; PANWAR, 2017).

A produção de metano de microalgas pode variar de  $0,227 \text{ m}^3 \text{ kgvs}^{-1}$  em algas verdes a  $0,226 \text{ m}^3 \text{ kgvs}^{-1}$  em algas marrons. Estes valores são consideravelmente superiores a outros tipos de biomassa, como açúcar ( $0,189 \text{ m}^3 \text{ kgvs}^{-1}$ ) e biomassa lignocelulósica ( $0,172 \text{ m}^3 \text{ kgvs}^{-1}$ ) (SONG et al., 2015; ZABED et al., 2020). O teor de  $\text{CH}_4$  obtido do biogás de microalgas é de 7 a 13% maior do que o teor obtido da silagem de milho, que é considerado o substrato mais disseminado na indústria de biogás (RAWAT et al., 2011; WIRTH et al., 2018).

Comparado com outros processos de geração de biocombustíveis, o principal benefício da digestão anaeróbia de microalga é uma maior eficiência energética, porque não é preciso a extração de óleos e lipídios, e o principal produto, que é o metano, fica preso na fase gasosa (GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ et al., 2012). No processo de fermentação metanogênica, as macromoléculas de proteínas, lipídios e açúcares, ou seja, todas as partes da estrutura da microalga, são aproveitadas. Como substrato para o processo de digestão anaeróbia, podem ser utilizados a biomassa bruta de microalgas e os resíduos produzidos durante a geração de outros tipos de biocombustíveis microalgais, agregando ainda mais os benefícios ambientais devido à redução de aterros (MENDEZ et al., 2014; JANKOWSKA; SAHU; OLESKOWICZ-POPIEL, 2017).

Vários estudos relataram grandes quantidades de lipídios em células da microalga *Euglena*. O potencial biotecnológico da biomassa dessa espécie como fonte de lipídios para produção de biocombustíveis tem aumentado em condições fotossintéticas heterotróficas e anaeróbias (KOTTUPARAMBIL; THANKAMONY; AGUSTI, 2019; MAHAPATRA; CHANAKYA; RAMACHANDRA, 2013; O'NEILL et al., 2015).

Desta forma, os resultados obtidos no presente estudo demonstraram a capacidade de utilização da biomassa de microalga *Euglena sanguinea* como fonte de biogás e de metano.

## 4.2 Energias renováveis

No cenário mundial, onde a questão energética tornou-se uma preocupação comum a todas as nações, tanto pelo fato da poluição ambiental gerada pelos combustíveis fósseis, quanto pela dependência econômica entre os países, não existe outra alternativa a não ser o desenvolvimento de tecnologias para promover a disseminação do uso de fontes alternativas de energia, que se mostrem eficazes em reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>.

Encontrar fontes de energias limpas e renováveis é um dos problemas mais desafiadores para a humanidade. Sendo assim, este trabalho buscou desenvolver tecnologia para a produção de biocombustíveis, tendo como foco a sustentabilidade em todas as fases do processo, desde a obtenção de microrganismo, sua nutrição com digestato da própria produção de biogás, a confecção do purificador, com materiais de fácil obtenção e baixo custo, e o processo de purificação fotossintética em sistemas de microalgas. Portanto, o objetivo principal foi a avaliação do processo aplicado na purificação e na produção do biogás, utilizando a biotecnologia fotossintética baseada em microalga.

Os biocombustíveis são produzidos a partir de elementos biodegradáveis e sustentáveis, provenientes de biomassa. Podem ser transformados por vias químicas, bioquímicas e termoquímicas, em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, como o bioetanol, o biodiesel, o biogás e o biohidrogênio (ALASWAD et al., 2015; JAVED et al., 2019).

A biomassa representa todo o material orgânico vegetal, podendo advir tanto de vegetação terrestre e aquática, como do lixo orgânico, por exemplo (CHEN et al., 2018a). Por ser considerada abundante e ecológica, a biomassa é considerada uma fonte de energia renovável, baseada no ciclo do carbono. Pelo processo de fotossíntese, as plantas convertem o

CO<sub>2</sub> e a água, na presença da luz solar, em material vegetal, armazenando a energia solar, na forma de energia química, em biomassa (SUGANYA et al., 2016).

No Brasil, o Artigo 6º da Lei nº 12.490 de 16 de setembro de 2011 estabelece que os biocombustíveis são substâncias provenientes de biomassa renovável, que podem substituir em parte ou totalmente os combustíveis fósseis, como biodiesel, etanol e outros produtos regulamentados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), sendo empregados, diretamente ou mediante alterações, em motores a combustão interna ou para outro tipo de geração de energia (BRASIL, 2020a).

Os biocombustíveis líquidos mais difundidos no Brasil são o etanol, proveniente da cana-de-açúcar, e o biodiesel, em fase de crescimento de produção, advindo de óleos vegetais ou de gorduras animais, podendo ser agregado ao diesel de petróleo em quantidades estabelecidas na legislação nacional (BRASIL, 2020b).

O aumento da demanda por combustíveis renováveis teve como precedente o papel das políticas legislativas do governo nacional destinadas a reduzir ou eliminar as emissões de dióxido de carbono dos combustíveis fósseis (ADENIYI; AZIMOV; BURLUKA, 2018). Ao longo dos anos, o governo brasileiro formulou importantes políticas públicas de incentivo aos biocombustíveis, incluindo o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) na década de 1970, a tecnologia de combustível flex, introduzida em 2003, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), em 2005, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), promulgada pela Lei nº 13.576 em 26 de dezembro de 2017 e o Programa Combustíveis do Futuro, lançado em 20 de abril de 2021 (SARAVANAN; PUGAZHENDHI; MATHIMANI, 2020).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2020) enfatizou como finalidade mais importante da RenovaBio, a promoção da expansão adequada da produção e uso de todos os biocombustíveis da matriz energética brasileira, com foco no abastecimento regular e colaboração em termos de possibilidade para promover a competitividade de diferentes biocombustíveis no mercado nacional. A RenovaBio também visa a contribuir no cumprimento dos compromissos do Brasil no Acordo de Paris no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança climática (EPE, 2020).

O Brasil apresenta oportunidades competitivas no campo de biocombustíveis devido à grande biodiversidade, ampla disponibilidade de biomassa e uma exitosa experiência em biocombustíveis com bioetanol e biodiesel (CARBONELL et al., 2021). Por isso, o Brasil é

um dos grandes produtores no ramo de biocombustíveis, ocupando a segunda posição mundial na geração de etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de óleos e gorduras (MÜHL; DE OLIVEIRA, 2022).

A cadeia do biogás também está em desenvolvimento no Brasil e a bioenergia tem sido continuamente integrada ao sistema de fornecimento de energia (PINTO et al., 2022). A agenda brasileira de energia verde introduziu o biogás no início dos anos 2000, motivado pelo mercado de créditos de carbono. Entre os anos de 2005 a 2013, aproximadamente 1.000 biodigestores haviam sido instalados no país, utilizando o processamento de dejetos animais. Depois disso, vários projetos foram propostos pelo governo federal e pela iniciativa privada, registrando um acréscimo de mais de seis vezes na produção de biogás de dejetos animais entre 2014 e 2019 (MOREIRA et al., 2022).

O número de usinas de biogás no Brasil passou de 366 em 2018 para 653 em 2020 (KANDA et al., 2022). Em 2021 o Brasil já possuía 811 usinas, apontando um crescimento de 25% em relação a 2020 e 220% em relação a 2018, com uma produção de aproximadamente 2,82 bilhões de  $\text{Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$  de biogás. Os principais usos do biogás compreendem a geração de energia elétrica (73%), produção de biometano (19%) e energia térmica (6%) (MÜHL; DE OLIVEIRA, 2022).

O Brasil possui o maior potencial de produção de biogás do mundo, estimado em 84,6 bilhões de  $\text{Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ , porém, somente uma pequena parcela desta capacidade foi explorada. Esse potencial elevado resulta das extensas atividades agropecuárias no país, onde o ramo sucroenergético está em evidência (KANDA et al., 2022). O estado de São Paulo detém 37% da produção nacional de biogás, seguido por Minas Gerais, com 10,8% e Paraná com 9,6% (CIBIOGÁS, 2022).

A maioria das usinas de biogás está localizada nas regiões Sudeste e Sul do Brasil. O estado de Minas Gerais possui 261 plantas de biogás, seguido por Paraná (171), São Paulo (69), Goiás (69) e Santa Catarina (68) (CIBIOGÁS, 2022).

A geração de eletricidade é a principal aplicação do biogás no Brasil. A maioria das usinas está interligada à rede elétrica, usando sistemas de compensação, onde os consumidores que geram eletricidade com o biogás são restituídos pelo excedente que introduzem na rede. Esses agentes que tanto produzem como consomem a energia são denominados de prossumidores. A geração de calor é o segundo uso mais comum do biogás. Em 2019, apenas 3% do biogás produzido no Brasil foi atualizado para biometano

(KANDA et al., 2022), enquanto que em 2021, esse percentual aumentou para 19% (CIBIOGÁS, 2022).

Desta forma, para conter os efeitos do aquecimento global, devido ao aumento das emissões de GEE, o desenvolvimento de tecnologias mais verdes e a produção de biogás tem surgido como uma ferramenta eficiente. Além disso, a implantação de usinas de biogás mostra-se como uma estratégia competente para fortalecer o agronegócio local e, simultaneamente, promove tecnologias de baixo carbono. Esse modelo de biotecnologia enlaça as principais bases do desenvolvimento sustentável, quais sejam, avanços tecnológicos em conversão de biomassa, proteção ambiental e desenvolvimento socioeconômico, contribuindo para o fortalecimento da economia, promovendo a geração de renda e criando novos empregos para o setor local (PINTO et al., 2022).

### **4.3 Biogás de microalgas**

Para uma abordagem de produção mais limpa, a escolha de substrato adequado e o aperfeiçoamento do processo de geração de biogás por meio da digestão anaeróbia são fatores expressivos para controlar os teores de poluentes no biogás bruto.

As primeiras pesquisas sobre biocombustíveis de microalgas foram realizadas na década de 1950, por Oswald e Golueke, da Califórnia, nos Estados Unidos da América. Eles utilizaram a biomassa de várias espécies de microalgas, cultivadas em lagoas de alta concentração, para a produção de biogás, por meio da digestão anaeróbia (SHAH et al., 2018).

Como atributos importantes das microalgas, destacam-se a exigência de pouco espaço para crescer, composição celular com alto teor de óleo, boa adaptabilidade de crescimento em ambientes naturais ou artificiais, tornando-se, dessa forma, uma matéria-prima ecologicamente correta (DANESHVAR et al., 2018). Outros méritos atribuídos às microalgas são a capacidade de fotossíntese oxigenada e produção de hidrogênio; requisitos de crescimento simples e limitados à luz, dióxido de carbono e outros nutrientes inorgânicos (KUMAR et al., 2016; SILVA; BERTUCCO, 2016). As microalgas podem crescer rapidamente, e todos os compostos gerados são considerados atóxicos e biodegradáveis, para a maioria das espécies. No decorrer do processo de crescimento, ocorre a biofixação de gases de efeito estufa (ALASWAD et al., 2015).

Devido às suas vantagens sobre outras matérias-primas, as pesquisas sobre a produção de biogás a partir de microalgas têm aumentado recentemente. A composição mineral das células das algas supre às necessidades nutricionais das bactérias anaeróbias. Sendo assim, a biomassa microalgácea é um substrato apropriado para a digestão anaeróbia. Além disso, as microalgas, devido à sua baixa quantidade de aminoácidos sulfurados, liberam menos sulfeto de hidrogênio durante a digestão anaeróbia (GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2018).

As principais desvantagens do biogás de microalgas estão relacionadas aos elevados custos econômicos e energéticos do cultivo e colheita da biomassa. Uma alternativa que pode promover a redução nos custos, seria a utilização de águas residuais ou gases de combustão como fonte de nutrientes para o cultivo de microalgas. Vale destacar também que os rejeitos de microalgas após a digestão anaeróbia podem ser usados como fertilizante natural para a agricultura (KOLLER et al., 2012; PASSOS et al., 2014).

A produção em escala comercial de biogás de microalgas apresenta elementos críticos como custo total do processo, rendimento e a tecnologia empregada no sistema produtivo, que precisam estar bem consolidados. Os métodos tradicionais usados na obtenção de biogás de microalgas não fornecem os resultados satisfatórios, por isso, é preciso desenvolver novas técnicas, que permitam reduzir as perdas durante o processo e aumentar o rendimento (KOSE; ONCEL, 2017).

Os resultados alcançados em pesquisas de laboratório e projetos em escala piloto têm alcançado êxito, mas, o que impossibilita a concretização da tecnologia para a implantação de uma produção em larga escala é a existência de outras variáveis, como a demanda do mercado e as condições ambientais locais (KOSE; ONCEL, 2017). O dimensionamento de todo o projeto precisa ser eficaz para o que se deseja produzir, levando em consideração os aspectos econômicos e ambientais, de forma a obter um projeto que assegure a sustentabilidade e eficácia no resultado desejado, ou seja, energia limpa, acessível e renovável.

#### **4.4 Rotas biotecnológicas de purificação**

Como já mencionado, o biogás da digestão anaeróbica pode substituir o gás natural como alternativa de energia verde. A geração de biogás com resíduos orgânicos e posterior conversão em combustíveis sustentáveis, tem potencial para diminuir as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera e, ao mesmo tempo, aprimorar a pegada de carbono do transporte.

Devido ao teor relativamente baixo de metano no biogás bruto, para garantir o uso eficiente no setor de transporte, é necessário aumentar o poder calorífico do biogás pela redução do teor de CO<sub>2</sub> (MUÑOZ et al., 2015). Uma etapa relevante no processo de geração de biogás está relacionada à purificação dos gases indesejados e prejudiciais, atentando aos padrões de qualidade exigidos. Neste sentido, existem diversas tecnologias disponíveis comercialmente, abarcando métodos de limpeza por via úmida, separação criogênica, absorção física e química, adsorção por oscilação de pressão, separação por membrana e métodos biológicos. Os processos físico-químicos apresentam custo elevado e produzem resíduos, comprometendo a viabilidade econômica e ambiental. (ABDEEN et al., 2016; KADAM; PANWAR, 2017; KHAN et al., 2017).

Os métodos biológicos são uma opção econômica e ecológica para a purificação do biogás (ALFARO et al., 2018). Os processos biológicos mais usados para aumentar o conteúdo de CH<sub>4</sub> do biogás são a bioconversão de CO<sub>2</sub> assistida por H<sub>2</sub>, a redução fermentativa de CO<sub>2</sub>, a utilização eletroquímica e microbiana de CO<sub>2</sub> e a fixação de CO<sub>2</sub> à base de microalgas (WU et al., 2021).

Sob a ótica tecnológica, a maior parte dos processos biológicos demonstrou ser eficiente na purificação do biogás. Diversos projetos de biorreatores foram testados para o processo de purificação a montante e a jusante. Vale ressaltar que cada modelo tem suas limitações inerentes. Por isso, pesquisadores no mundo todo estão trabalhando para superar os obstáculos existentes, de forma a melhorar os parâmetros operacionais, projetando novos modelos de purificadores para impulsionar a biopurificação do biogás. Os estudos focam em tecnologias sustentáveis, utilizando métodos avançadas para avaliação de sustentabilidade, como práticas fundamentadas em energia que podem melhorar aspectos econômicos e ambientais (AGHBASHLO et al., 2019a, 2019b; DAS; RAVISHANKAR; LENS, 2022).

Um projeto de purificação sustentável de biogás deve levar em conta a possibilidade de conversão de todos os gases do processo em combustível, dentro de um circuito fechado, onde a capacidade de sustentabilidade é o que norteia o potencial real do modelo proposto (RODERO et al., 2018).

Um sistema de purificação fotossintético de biogás de dois estágios é composto por dois subsistemas principais, denominados de Coluna de Absorção e Fotobiorreator (WU et al., 2021).

A coluna de absorção é a primeira unidade no processo de purificação fotossintética de biogás. A coluna de absorção é preenchida por um líquido alcalino de microalgas, contendo um difusor de gases localizado na parte inferior, com a finalidade de formar de bolhas de tamanho reduzido e uniforme. As microalgas atuam como fase sólida, com a função de melhorar a taxa de absorção de CO<sub>2</sub>, elevando a retenção do biogás e das taxas de transferência de massa (BOSE et al., 2019).

O fotobiorreator tem a função de promover alta produção de biomassa e garantir taxas adequadas de crescimento de microalgas, utilizando a luz de forma eficiente. Os benefícios dos fotobiorreatores fechados estão relacionados com a possibilidade de impedir a troca direta de gases, bem como a contaminação entre a cultura e a atmosfera (ACIEN et al., 2017). Para purificação fotossintética, foram desenvolvidos os fotobiorreatores do tipo saco plástico, tubular, coluna de bolhas e placa plana. O fotobiorreatores fechados apresentam muitas vantagens, como monitoramento mais fácil dos parâmetros que interferem no crescimento de microalgas; condições de cultura constantes; possibilidade de cultivo com elevada densidade; alta relação entre a área e o volume, melhorando a eficácia na transferência de massa com uma área de ocupação do solo menor; perdas menores de água por evaporação (ZHOU et al., 2017).

A purificação do biogás por meio do cultivo microalgas é uma tecnologia inovadora, permitindo a oportunidade única de remoção, sequestro e uso de CO<sub>2</sub> no próprio local da geração dos biocombustíveis (BOSE et al., 2019). A habilidade fotossintética de captura de dióxido de carbono pelas microalgas pode ser usada para purificar o biogás, uma vez que são capazes de fixar grande quantidade de CO<sub>2</sub> por meio de sua alta taxa de crescimento e ainda podem apresentar boa adaptabilidade em diferentes condições ambientais. Como resultado do processo, a biomassa de microalgas formada pode ser considerada matéria-prima para a produção de biocombustíveis ou ser usada como outros produtos de valor agregado (TALEBI et al., 2013; MUÑOZ et al., 2015; TABATABAEI et al., 2020b).

As tecnologias que utilizam processos biológicos apresentam uma nova abordagem para compensar as emissões através da mitigação biológica direta de carbono, onde o CO<sub>2</sub> dos gases de combustão de fontes pontuais é usado para cultivar organismos autotróficos fotossintéticos (WU et al., 2021).

A tecnologia de microalgas é ainda considerada mais ecológica e econômica do que o processo de purificação quimioautotrófico de biogás devido à sua capacidade de remover

CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S em um processo de estágio único (MARÍN et al., 2019). Um processo viável de purificação de biogás baseado na tecnologia de microalgas deve promover taxas de crescimento altas e estáveis das comunidades de microalgas. Portanto, são necessários critérios para selecionar as cepas de microalgas adequadas. Estratégias para otimizar as configurações do sistema e as condições operacionais para maiores taxas de fixação de CO<sub>2</sub> de microalgas devem ser desenvolvidas (GRANADA-MORENO et al., 2017; MARÍN et al., 2019).

Muitos estudos estão sendo feitos para melhorar as estratégias no processo de purificação fotossintética do biogás. A capacidade de captura de CO<sub>2</sub> pelo cultivo de microalgas está condicionada a fatores ambientais, como temperatura, pH, concentração de oxigênio e fonte de luz. A intensidade da luz adequada é essencial para garantir a capacidade de captura de CO<sub>2</sub> e a concentração de biomassa microalgas (WU et al., 2021; ZHOU et al., 2017).

O nível de pH é considerado como um fator crítico para determinar a taxa de transferência de massa de CO<sub>2</sub> para a fase líquida, o crescimento de microalgas e atividade de microalgas na coluna de transferência. Em ambiente alcalino, pode ocorrer a melhoria na solubilidade do CO<sub>2</sub> do biogás como HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ou CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (JENSEN et al., 2018; RODERO et al., 2020; ZHU et al., 2020), além de promover a estabilidade das culturas de microalgas, evitando a contaminação ou invasão de espécies indesejáveis. A alcalinidade é o principal parâmetro ambiental que influencia a qualidade do biometano (FRANCO-MORGADO et al., 2017).

A temperatura do meio de cultivo pode afetar diretamente o equilíbrio gás/líquido e a cinética de crescimento da biomassa. A concentração de oxigênio proveniente da fotossíntese, constitui um componente perigoso no biometano devido aos riscos de explosão, quando acumulado em maiores quantidades. O acúmulo de O<sub>2</sub> acima de 25 mg.L<sup>-1</sup> pode prejudicar o crescimento das microalgas. Além disso, teor de O<sub>2</sub> inferior a 1% é uma exigência para a maioria dos padrões para uso do biometano (MEIER et al., 2017).

De acordo com Wu et al. (2021), os parâmetros operacionais recomendados seriam a preferência pela luz artificial, com comprimentos de onda e intensidades de luz controlados, a manutenção da alcalinidade no meio de cultivo, promovendo a melhoria da transferência de massa e aumentando a biofixação de CO<sub>2</sub> através de microalgas. As temperaturas mais altas na

fase clara e temperaturas mais baixas na fase escura promoveriam a maior fixação fotossintética de CO<sub>2</sub>.

Em suma, ao substituir o uso do gás natural pelo biometano, o biogás ocupará uma posição relevante como recurso de energia renovável, da mesma forma como a energia solar, eólica e biomassa. O biometano poderá ser usado diretamente como combustível em motores de combustão e células de combustível. Também poderá ser explorado como material básico para a síntese de gás ou produção de hidrogênio e produtos químicos (ZHOU et al., 2017).

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a capacidade de purificação de biogás utilizando o processo fotossintético com microalgas em escala piloto, e analisou a eficiência de produção de biogás a partir da biomassa da microalga *Euglena sanguinea*. Para a purificação foi utilizado protótipo de purificador do tipo tanque interligado à coluna de absorção, em escala piloto. A avaliação do potencial de geração de biogás foi realizada em escala laboratorial, utilizando a norma VDI 4630 (2006).

Para a avaliação da remoção de H<sub>2</sub>S no sistema de microalgas, foram usados os resultados da cromatografia do biogás efluente à coluna de absorção, que demonstraram a remoção de 100% de H<sub>2</sub>S neste sistema.

Na verificação da capacidade de purificação, os resultados mostraram que a menor concentração de CO<sub>2</sub> no biogás purificado foi de 9,15 %, registrada no primeiro dia das leituras. Nas medições subsequentes, os teores do gás carbônico no biogás purificado variaram de 14,03% a 18,46%. O maior percentual de remoção de CO<sub>2</sub> foi de 72,02% e a menor taxa de remoção foi de 42,46%.

Os teores de CH<sub>4</sub> no biogás purificado oscilaram de 71,4% a 76,2%, e as concentrações afluentes apresentaram valores entre 63,08% a 64,32 %. O aumento na concentração de CH<sub>4</sub> variou de 11,92 % a 20,8%. O teor de oxigênio no biogás afluente à coluna de absorção variou de 0,17% a 0,71% e a concentração efluente oscilou entre os valores de 1,24% a 3,26%.

As análises da digestão anaeróbia da biomassa de *Euglena sanguinea* apresentaram produção acumulada de biogás de 1.619,63 ± 283,00 mL e o volume CH<sub>4</sub> no biogás de 746,27 ± 140,85 mL. O rendimento obtido foi de 715,87 mL.gvs<sup>-1</sup> de biogás e de 335,12 mL.gvs<sup>-1</sup>

de metano. A produtividade alcançada foi de  $27,02 \pm 4,89$  m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de microalgas e  $12,85 \pm 2,43$  m<sup>3</sup> de metano.

Os resultados positivos obtidos nesse trabalho demonstram que a aplicação de biotecnologia fotossintética com microalgas pode ser um processo viável para obtenção de biogás purificado e, assim, auxiliar na diminuição da emissão de GEE na atmosfera.

Da mesma forma, as análises da geração de biogás e de metano utilizando a biomassa da microalga *Euglena sanguinea* apontaram ótimos resultados, que comprovam ser um substrato adequado à digestão anaeróbia, sugerindo uma promissora fonte de energética renovável.

A seguir, estão elencadas sugestões para serem abordadas em trabalhos futuros:

- Estudar o efeito da temperatura na purificação de biogás;
- Aprofundar o desenvolvimento de meios de cultivo de maneira a aumentar a concentração de biomassa de microalga no reator;
- Estudar mecanismos para o controle da manutenção do equilíbrio de pH nos cultivos de microalgas;
- Estudar o efeito de diferentes vazões de líquido e de biogás na coluna de absorção;
- Aumentar o tempo dos experimentos;
- Avaliar economicamente o potencial de utilização da biomassa microalgácea para produção de biogás.

## REFERÊNCIAS

- ABDEEN, F. R. H. et al. A review of chemical absorption of carbon dioxide for biogas upgrading. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 24, n. 6, p. 693–702, 2016.
- ADARME, O. F. H. et al. Methane and hydrogen production from anaerobic digestion of soluble fraction obtained by sugarcane bagasse ozonation. **Industrial Crops and Products**, v. 109, p. 288–299, 2017.
- ADENIYI, O. M.; AZIMOV, U.; BURLUKA, A. Algae biofuel: Current status and future applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 316–335, 2018.
- AGHBASHLO, M. et al. Comprehensive exergoeconomic analysis of a municipal solid waste digestion plant equipped with a biogas genset. **Waste Management**, v. 87, p. 485–498, 15 mar. 2019a.
- AGHBASHLO, M. et al. Biopower and biofertilizer production from organic municipal solid waste: An exergoenvironmental analysis. **Renewable Energy**, v. 143, p. 64–76, 1 dez. 2019b.
- ALASWAD, A. et al. Technologies and developments of third generation biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 1446–1460, 2015.
- ALFARO, N. et al. Evaluation of process performance, energy consumption and microbiota characterization in a ceramic membrane bioreactor for ex-situ biomethanation of H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. **Bioresource Technology**, v. 258, p. 142–150, 1 jun. 2018.
- AMPESE, L. C. et al. Research progress, trends, and updates on anaerobic digestion technology: A bibliometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 331, p. 130004, 10 jan. 2022.
- ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2, p. 452–466, 2018a.
- ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2, p. 452–466, 1 mar. 2018b.
- ANGELIDAKI, I. et al. Biogas Upgrading: Current and Emerging Technologies. **Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels**, p. 817–843, 1 jan. 2019.
- ANSARI, F. A. et al. Techno-economic estimation of wastewater phycoremediation and

- environmental benefits using *Scenedesmus obliquus* microalgae. **Journal of Environmental Management**, v. 240, p. 293–302, 15 jun. 2019.
- AZIZ, M. M. A. et al. Two-stage cultivation strategy for simultaneous increases in growth rate and lipid content of microalgae: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109621, 2020.
- BOS, K.; GUPTA, J. Stranded assets and stranded resources: Implications for climate change mitigation and global sustainable development. **Energy Research & Social Science**, v. 56, p. 101215, 1 out. 2019.
- BOSE, A. 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.
- BRASIL. **Lei n. 12.490, de 16 de setembro de 2011**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2011/lei/112490.htm#:~:text=Altera as Leis n<sup>o</sup>s 9.478,o § 1<sup>o</sup> do art.](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/112490.htm#:~:text=Altera as Leis n%27s 9.478,o %27 1%27 do art.)>. Acesso em: 10 mar. 2020a.
- BRASIL. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis>>. Acesso em: 20 mar. 2020b.
- CARBONELL, S. A. M. et al. Bioeconomy in Brazil: Opportunities and guidelines for research and public policy for regional development. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 6, p. 1675–1695, 1 nov. 2021.
- CARRILLO-REYES, J. et al. Thermophilic biogas production from microalgae-bacteria aggregates: biogas yield, community variation and energy balance. **Chemosphere**, v. 275, p. 129898, 1 jul. 2021.
- CARUS, M.; DAMMER, L. The Circular Bioeconomy - Concepts, Opportunities, and Limitations. **Industrial Biotechnology**, v. 14, n. 2, p. 83–91, 1 abr. 2018.
- CASTRO, A. A. et al. Cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais: revisão de literatura. **Geama**, v. 6, n. 2, p. 60–71, 2020.
- CASTRO, A. A. et al. Dessulfurização de biogás por processo fotossintético com microalgas e absorção por lavagem com água. **Research, Society and Development**, v. 2022, p. 1–15, 2022a.
- CASTRO, A. A. et al. Biological purification of biogas by photosynthetic process using microalgae. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e228111335327–e228111335327, 5 out. 2022b.
- CASTRO, A. A.; KONRAD, O. Panorama global da produção científica sobre microalgas no tratamento de águas residuais. **Revista Valore**, v. 5, p. e-5047, 2020.
- CHEAH, W. Y. et al. Biosequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> and flue gas-containing CO<sub>2</sub> by microalgae. **Bioresource Technology**, v. 184, p. 190–201, 2015.
- CHEN, Y. DI et al. Waste biorefineries — integrating anaerobic digestion and microalgae cultivation for bioenergy production. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 50, p. 101–110, 2018a.
- CHEN, H. et al. Algal biofuel production coupled bioremediation of biomass power plant wastes based on *Chlorella* sp. C2 cultivation. **Applied Energy**, v. 211, p. 296–305, 2018b.
- CIBIOGÁS. **Mapa do Biogás**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojODc2NThhOGItOTc2Ny00ZDc1LWl5MTMtYjY>>

wZTRIYjFiOWQ3IiwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MW E4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a3c113b0d>. Acesso em: 26 out. 2022.

DANESHVAR, E. et al. Microalgal growth and nitrate removal efficiency in different cultivation conditions: Effect of macro and micronutrients and salinity. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 2, p. 1848–1854, 2018.

DANTAS, T. E. T. et al. How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 213–227, 1 abr. 2021.

DAS, J.; RAVISHANKAR, H.; LENS, P. N. L. Biological biogas purification: Recent developments, challenges and future prospects. **Journal of Environmental Management**, v. 304, p. 114198, 15 fev. 2022.

DIAMOND, J. **Colapso: como as sociedades escolhem os fracassos ou o sucesso**. 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Record, 2007.

ENAMALA, M. K. et al. Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 49–68, 2018.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética - Relatório Síntese BEN 2020. 2020.

FERRARI, G. et al. Bibliometric Analysis of Trends in Biomass for Bioenergy Research. **Energies 2020**, Vol. 13, Page 3714, v. 13, n. 14, p. 3714, 19 jul. 2020.

FRANCO-MORGADO, M. 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, ago. 2017.

FRANK, A. G. **Formatos alternativos de teses e dissertações | Ciência Prática**. Disponível em: <<https://cienciapratica.wordpress.com/2013/04/15/formatos-alternativos-de-teses-e-dissertacoes/>>. Acesso em: 3 out. 2022.

GIRARD, J. M. et al. Mixotrophic cultivation of green microalgae *Scenedesmus obliquus* on cheese whey permeate for biodiesel production. **Algal Research**, v. 5, n. 1, p. 241–248, 2014.

GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, C. et al. Thermal pretreatment to improve methane production of *Scenedesmus* biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 40, p. 105–111, 2012.

GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, L. M. et al. Integrated biodiesel and biogas production from microalgae: Towards a sustainable closed loop through nutrient recycling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1137–1148, 2018.

GRANADA-MORENO, C. I. et al. Microalgae community shifts during the biogas upgrading in an alkaline open photobioreactor. **Journal of Applied Microbiology**, v. 123, n. 4, p. 903–915, 1 out. 2017.

GULTOM, S.; HU, B. Review of microalgae harvesting via co-pelletization with filamentous fungus. **mdpi.com**, v. 6, p. 5921–5939, 2013.

GUO, X.; YAO, L.; HUANG, Q. Aeration and mass transfer optimization in a rectangular airlift loop photobioreactor for the production of microalgae. **Bioresource Technology**, v. 190, p. 189–195, 2015.

HO, S. H. et al. Microalgal Torrefaction for Solid Biofuel Production. **Trends in**

**Biotechnology**, p. 1023–1033, 2020.

JACOB, J. M. et al. Microalgae: A prospective low cost green alternative for nanoparticle synthesis. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, 2020.

JANKOWSKA, E.; SAHU, A. K.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 692–709, 2017.

JAVED, F. et al. Microalgae-based biofuels, resource recovery and wastewater treatment: A pathway towards sustainable biorefinery. **Fuel**, v. 255, 2019.

JENSEN, M. B. et al. Venturi-type injection system as a potential H<sub>2</sub> mass transfer technology for full-scale in situ biomethanation. **Applied Energy**, v. 222, p. 840–846, 15 jul. 2018.

JORDAAN, S. M. et al. The role of energy technology innovation in reducing greenhouse gas emissions: A case study of Canada. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 1397–1409, 1 out. 2017.

KADAM, R.; PANWAR, N. L. Recent advancement in biogas enrichment and its applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 892–903, 2017.

KANDA, W. et al. Policy coherence in a fragmented context: the case of biogas systems in Brazil. **Energy Research & Social Science**, v. 87, p. 102454, 1 maio 2022.

KAPOOR, R. et al. Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: a review. **Environmental Science and Pollution Research** 2019 26:12, v. 26, n. 12, p. 11631–11661, 15 mar. 2019.

KARLSSON, T. . et al. **Manual Básico do Biogás**. 1. ed. Lajeado: Editora Univates, 2014.

KHAN, I. U. et al. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. **Energy Conversion and Management**, v. 150, p. 277–294, 2017.

KISHI, M.; TODA, T. Carbon fixation properties of three alkalihalophilic microalgal strains under high alkalinity. **Journal of Applied Phycology**, v. 30, n. 1, p. 401–410, 1 fev. 2018.

KOLLER, M. et al. Characteristics and potential of micro algal cultivation strategies: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 37, p. 377–388, 2012.

KOSE, A.; ONCEL, S. S. Algae as a promising resource for biofuel industry: facts and challenges. **International Journal of Energy Research**, v. 41, n. 7, p. 924–951, 10 jun. 2017.

KOTTUPARAMBIL, S.; THANKAMONY, R. L.; AGUSTI, S. Euglena as a potential natural source of value-added metabolites. A review. **Algal Research**, v. 37, p. 154–159, 1 jan. 2019.

KUMAR, K. et al. Recent developments on biofuels production from microalgae and macroalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 235–249, 2016.

KURPAN, D. P. N. et al. Impact of temperature and light intensity on triacylglycerol accumulation in marine microalgae. **Biomass and Bioenergy**, v. 72, p. 280–287, 2015.

MAHAPATRA, D. M.; CHANAKYA, H. N.; RAMACHANDRA, T. V. Euglena sp. as a suitable source of lipids for potential use as biofuel and sustainable wastewater treatment. 2013.

MANTZOROU, A.; VERVERIDIS, F. Microalgal biofilms: A further step over current

- microalgal cultivation techniques. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 3187–3201, 15 fev. 2019.
- MARÍN, D. et al. Influence of liquid-to-biogas ratio and alkalinity on the biogas upgrading performance in a demo scale algal-bacterial photobioreactor. **Bioresource Technology**, v. 280, p. 112–117, 1 maio 2019.
- MAROUŠEK, J. et al. Advances in nutrient management make it possible to accelerate biogas production and thus improve the economy of food waste processing. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1776796>, 2020.
- MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 217–232, 2010.
- MAURYA, R. et al. Recent Advances and Future Prospective of Biogas Production. **Advances in Feedstock Conversion Technologies for Alternative Fuels and Bioproducts: New Technologies, Challenges and Opportunities**, p. 159–178, 1 jan. 2019.
- MD KHUDZARI, J. et al. Bibliometric analysis of global research trends on microbial fuel cells using Scopus database. **Biochemical Engineering Journal**, v. 136, p. 51–60, 15 ago. 2018.
- MEIER, L. et al. Photosynthetic biogas upgrading using microalgae: Effect of light/dark photoperiod. **Renewable Energy**, v. 106, p. 17–23, 2017.
- MENDEZ, L. et al. Effect of high pressure thermal pretreatment on *Chlorella vulgaris* biomass: Organic matter solubilisation and biochemical methane potential. **Fuel**, v. 117, p. 674–679, 2014.
- MISHRA, A. et al. Biofuel production and phycoremediation by *Chlorella* sp. ISTLA1 isolated from landfill site. **Bioresource Technology**, v. 253, p. 121–129, 2018.
- MODGIL, S.; GUPTA, S.; BHUSHAN, B. Building a living economy through modern information decision support systems and UN sustainable development goals. **Production Planning and Control**, v. 31, n. 11–12, p. 967–987, 9 set. 2020.
- MOREIRA, L. C. et al. Simulation and economic evaluation of process alternatives for biogas production and purification from sugarcane vinasse. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 163, p. 112532, 1 jul. 2022.
- MÜHL, D. D.; DE OLIVEIRA, L. Features of anaerobic digestion plants in the brazilian agricultural sector. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, v. 1, p. 100001, 1 abr. 2022.
- MUÑOZ, R. et al. A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 14, n. 4, p. 727–759, 2015.
- NERINI, F. F. et al. Connecting climate action with other Sustainable Development Goals. **Nature Sustainability** 2019 2:8, v. 2, n. 8, p. 674–680, 15 jul. 2019.
- NOORAIN, R. et al. Biogas purification performance of new water scrubber packed with sponge carriers. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 103–111, mar. 2019.
- O'NEILL, E. C. et al. The transcriptome of *Euglena gracilis* reveals unexpected metabolic capabilities for carbohydrate and natural product biochemistry. **Molecular BioSystems**, v. 11, n. 10, p. 2808–2820, 15 set. 2015.

- OBILEKE, K. C. et al. Bioenergy from bio-waste: a bibliometric analysis of the trend in scientific research from 1998–2018. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 4, p. 1077–1092, 1 abr. 2022.
- OKORO, V. et al. Microalgae cultivation and harvesting: Growth performance and use of flocculants - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109364, 2019.
- ONU. **Organização das Nações Unidas - Agenda 2030**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 22 mar. 2020.
- PASSOS, F. et al. Pretreatment of microalgae to improve biogas production: A review. **Bioresource Technology**, v. 172, p. 403–412, 2014.
- PATEL, A. et al. Microalgae: Antiquity to era of integrated technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 535–547, 2017.
- PATEL, A. et al. A perspective on biotechnological applications of thermophilic microalgae and cyanobacteria. **Bioresource Technology**, v. 278, p. 424–434, 2019.
- PINTO, R. L. DA S. et al. An overview on the production of synthetic fuels from biogas. **Bioresource Technology Reports**, v. 18, p. 101104, 1 jun. 2022.
- RAWAT, I. et al. Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3411–3424, 2011.
- RAZZAK, S. A. et al. Integrated CO<sub>2</sub> capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 622–653, 2013.
- RAZZAK, S. A. et al. Biological CO<sub>2</sub> fixation with production of microalgae in wastewater – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 379–390, 2017.
- RODERO, M. DEL R. 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.
- RODERO, M. DEL R. et al. Performance evaluation of a control strategy for photosynthetic biogas upgrading in a semi-industrial scale photobioreactor. **Bioresource Technology**, v. 307, p. 123207, 1 jul. 2020.
- RYBARCZYK, P. et al. Treatment of malodorous air in biotrickling filters: A review. **Biochemical Engineering Journal**, v. 141, p. 146–162, 15 jan. 2019.
- SADHUKHAN, J. et al. Perspectives on “game changer” global challenges for sustainable 21st century: plant-based diet, unavoidable food waste biorefining, and circular economy. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, p. 103390, 2020.
- SAJJADI, B. et al. Microalgae lipid and biomass for biofuel production: A comprehensive review on lipid enhancement strategies and their effects on fatty acid composition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, p. 200–232, 2018.
- SARATALE, R. G. et al. A critical review on anaerobic digestion of microalgae and macroalgae and co-digestion of biomass for enhanced methane generation. **Bioresource Technology**, v. 262, p. 319–332, 2018.
- SARAVANAN, A. P.; PUGAZHENDHI, A.; MATHIMANI, T. A comprehensive assessment of biofuel policies in the BRICS nations: Implementation, blending target and gaps. **Fuel**, v.

272, 2020.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, v. 129, p. 457–472, 2018.

SHAH, S. H. et al. Potential of microalgal biodiesel production and its sustainability perspectives in Pakistan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 76–92, 2018.

SILVA, C. E. DE F.; BERTUCCO, A. Bioethanol from microalgae and cyanobacteria: A review and technological outlook. **Process Biochemistry**, v. 51, n. 11, p. 1833–1842, 2016.

SONG, M. et al. Overview of anaerobic digestion process for biofuels production from marine macroalgae: A developmental perspective on brown algae. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 32, n. 4, p. 567–575, 2015.

SUBHASH, G. V. et al. Temperature induced stress influence on biodiesel productivity during mixotrophic microalgae cultivation with wastewater. **Bioresource Technology**, v. 169, p. 789–793, 2014.

SUDHAKAR, M. P. et al. A review on bioenergy and bioactive compounds from microalgae and macroalgae-sustainable energy perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 1320–1333, 2019.

SUGANYA, T. et al. Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 909–941, 2016.

TABATABAEI, M. et al. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 2: Mainstream and downstream strategies. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1392–1407, 2020.

TAKABE, Y. et al. Feasibility of microalgae cultivation system using membrane-separated CO<sub>2</sub> derived from biogas in wastewater treatment plants. **Biomass and Bioenergy**, v. 106, p. 191–198, 2017.

TALEBI, A. F. et al. Fatty acids profiling: A selective criterion for screening microalgae strains for biodiesel production. **Algal Research**, v. 2, n. 3, p. 258–267, 2013.

TANDON, P.; JIN, Q. Microalgae culture enhancement through key microbial approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1089–1099, 2017.

TANG, D. Y. Y. et al. Potential utilization of bioproducts from microalgae for the quality enhancement of natural products. **Bioresource Technology**, v. 304, p. 122997, 2020.

TOLEDO-CERVANTES, A. 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.

UNIVATES. **Resolução nº 70/Reitoria/Univates, de 31 de agosto de 2018. Regimento do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Taquari**. Disponível em:

<[https://www.univates.br/ppgad/media/docs/ppgad\\_resolucao\\_070\\_18.pdf](https://www.univates.br/ppgad/media/docs/ppgad_resolucao_070_18.pdf)>. Acesso em: 3 out. 2022.

VDI. Fermentação de materiais orgânicos - Caracterização do substrato, amostragem, coleta de dados do material, testes de fermentação. **Beuth**, 2006.

- VUPPALADADIYAM, A. K. et al. Impact of Flue Gas Compounds on Microalgae and Mechanisms for Carbon Assimilation and Utilization. **ChemSusChem**, v. 11, n. 2, p. 334–355, 23 jan. 2018.
- WALL, D. M.; MCDONAGH, S.; MURPHY, J. D. Cascading biomethane energy systems for sustainable green gas production in a circular economy. **Bioresource Technology**, v. 243, p. 1207–1215, 2017.
- WANG, Z. W. et al. Effects of hydrothermal treatment on enhancing enzymatic hydrolysis of rapeseed straw. **Renewable Energy**, v. 134, p. 446–452, 1 abr. 2019.
- WIRTH, R. et al. Anaerobic gaseous biofuel production using microalgal biomass – A review. **Anaerobe**, v. 52, p. 1–8, 2018.
- WU, L. et al. Upgrading biogas produced in anaerobic digestion: Biological removal and bioconversion of CO<sub>2</sub> in biogas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111448, 1 out. 2021.
- XIAO, C. et al. Life cycle and economic assessments of biogas production from microalgae biomass with hydrothermal pretreatment via anaerobic digestion. **Renewable Energy**, v. 151, p. 70–78, 1 maio 2020.
- YANG, L. et al. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 1133–1152, 2014.
- YIN, Z. et al. A comprehensive review on cultivation and harvesting of microalgae for biodiesel production: Environmental pollution control and future directions. **Bioresource Technology**, v. 301, p. 122804, 2020.
- ZABED, H. M. et al. Recent advances in biological pretreatment of microalgae and lignocellulosic biomass for biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, p. 105–128, 2019.
- ZABED, H. M. et al. Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 109503, 2020.
- ZHANG, Y.; YU, Q.; LI, J. Bioenergy research under climate change: a bibliometric analysis from a country perspective. **Environmental Science and Pollution Research** 2021 28:21, v. 28, n. 21, p. 26427–26440, 23 jan. 2021.
- ZHOU, K.; CHAEMCHUEN, S.; VERPOORT, F. Alternative materials in technologies for Biogas upgrading via CO<sub>2</sub> capture. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 1414–1441, 2017.
- ZHOU, W. et al. Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: Advances and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1163–1175, 2017.
- ZHU, B. et al. Molecular characterization of CO<sub>2</sub> sequestration and assimilation in microalgae and its biotechnological applications. **Bioresource Technology**, v. 244, p. 1207–1215, 2017.
- ZHU, X. et al. The role of endogenous and exogenous hydrogen in the microbiology of biogas production systems. **World Journal of Microbiology and Biotechnology** 2020 36:6, v. 36, n. 6, p. 1–7, 22 maio 2020.
- ZHUANG, L. L. et al. Enhanced attached growth of microalgae *Scenedesmus*. LX1 through ambient bacterial pre-coating of cotton fiber carriers. **Bioresource Technology**, v. 218, p. 643–649, 1 out. 2016.



**UNIVATES**

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