



UFOP



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental



YANÉ ARRUDA CASTOR DE ALTAMIRANO

**ESTUDO DAS RELAÇÕES DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS
A PARTIR DA BIOMASSA DA MICROALGA *SPIRULINA* sp.
E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Ouro Preto

2021

Estudo das Relações de Produção de Biogás a partir da Biomassa da Microalga
Spirulina sp. e Geração de Energia Elétrica

Yanê Arruda Castor de Altamirano

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenharia Ambiental na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 15/12/2021

Orientador: Prof. Dr. Mateus de Souza Amaral – UFOP

Ouro Preto

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A465e Altamirano, Yane Arruda Castor de.

Estudo das relações de produção de Biogás a partir da biomassa da microalga spirulina sp. e geração de energia elétrica. [manuscrito] / Yane Arruda Castor de Altamirano. - 2021.

62 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Mateus de Souza Amaral.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Metano. 2. Biogás. 3. Spirulina. 4. Energia elétrica. I. Amaral, Mateus de Souza. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 504

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803

Estudo das Relações de Produção de Biogás a partir da Biomassa da Microalga
Spirulina sp. e Geração de Energia Elétrica

Yanê Arruda Castor de Altamirano

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenharia Ambiental na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 15/12/2021

Banca examinadora: 15/12/2021

**MATEUS DE SOUZA
AMARAL:34425894871**

Assinado de forma digital por MATEUS
DE SOUZA AMARAL:34425894871
Dados: 2022.01.14 10:51:21 -03'00'

Orientador: Prof. Dr. Mateus de Souza Amaral – UFOP



Assinado de forma digital por
SANDRA APARECIDA LIMA DE
MOURA:02504152752
Dados: 2022.01.12 16:55:58 -03'00'

Membro: Prof. Dra. Sandra Aparecida Lima de Moura



Membro: Prof. Dr. Marcus Vinicius Cangussu Cardoso



*Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos que sempre me apoiaram,
em especial minha mãe Patrícia, meu pai Alfredo José, minha vó Célia, meus
irmãos Kaynã e Yann, e a família Maria Bonita.
Sonho que se sonha junto é realidade, pra vocês o meu eterno agradecimento.*

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Patrícia Castor que sempre me incentivou a voar sem esquecer das minhas raízes, a minha maior apoiadora, a quem eu devo a vida e um agradecimento especial por ter sugerido a profissão que hoje estou me formando. Mãe, obrigada por me ensinar que ao infinito e além a gente consegue alcançar os nossos sonhos, e esse sonho realizado é nosso.

Ao meu pai doutor Alfredo José Altamirano que foi fundamental na minha vida pessoal e acadêmica, minha maior referência de homem estudioso que ama o que faz, que tem o conhecimento como maior aliado e os estudos como lição de vida. Obrigada por se fazer presente mesmo estando em outro país.

A minha vó Célia Arruda que sempre me apoiou, me ajudou, me impulsionou e me fez estar aqui hoje. Minha referência de mulher independente, forte e trabalhadora. Vó, se hoje estou me formando é por causa de você e toda ajuda que você me deu, eu nunca vou esquecer disso, muito obrigada.

Aos meus irmãos Kaynã e Yann, meu maior porto seguro, que em todas as fases da minha vida serão os meus maiores melhores amigos, agradeço muito por vocês existirem e por ter a sorte de ser a irmã de vocês, eu vou estar sempre aqui pra ajudar e impulsionar a crescermos juntos, nós três pra sempre!

A minha família Maria Bonita, todas ex-alunas e moradoras que eu tive o prazer de morar junto, vocês foram fundamentais pra essa conquista, obrigada por todo puxão de orelha e aprendizado, entrei nessa casa uma menina e saio uma mulher, uma mulher com ideais e pronta pra batalhar com honestidade, vocês me ensinaram dessa forma e eu não vou esquecer. Descobri o meu lugar no mundo.

A todos os meus amigos de Cabo Frio e Ouro Preto, em especial a Quadrilha, Lissa, Grambole, Negs e meus irmãos de período 14.2, eu não estaria aqui sem vocês, motivo das minhas gargalhadas sinceras e encontros bem vividos, eu amo muito todos vocês.

Ao ensino de qualidade e professores da UFOP pelos conhecimentos passados e indispensável auxílio, em especial o meu orientador doutor Mateus Amaral que não desistiu de mim na iniciação científica e me apoiou muito na monografia, também as professoras Lívia e Marina.

Por fim, agradeço a Deus que me proporcionou vivenciar os melhores anos da minha vida em uma cidade especial, me deu a vida pra estar aqui hoje realizando esta conquista, não me deixou desistir quando tudo parecia perdido, me fez enxergar de verdade a beleza da vida, te encontrei em 2020 e nunca mais vou te deixar. Obrigada por tudo, meu Deus, eu não vou te decepcionar.

RESUMO

As grandes quantidades de emissões de gases poluentes na atmosfera, litosfera e hidrosfera, sem o devido tratamento, é cada vez mais preocupante. As mudanças climáticas em todo o mundo já é realidade, as altas temperaturas, inundações, grandes chuvas e queimadas florestais em locais antes não vistos, vêm acontecendo com maior frequência anualmente. A partir disso, os estudos relacionados as alternativas mais sustentáveis para garantir a obtenção de um biocombustível por meio da biomassa das microalgas, é cada vez mais explorada, afim de minimizar o impacto no meio ambiente causado pela utilização de fontes fósseis, sendo ainda a forma de obtenção de energia mais utilizada. Como alternativa para a substituição de combustíveis que degradam o meio ambiente, o biogás é uma fonte de energia produzida a partir da metabolização dos materiais orgânicos, onde as bactérias digerem de forma anaeróbica estas substâncias. Para a obtenção do biogás é necessário a utilização principalmente do metano e do gás carbônico, gases poluentes dispersos na atmosfera em grandes quantidades pelas indústrias e empreendimento. Outra vantagem do biogás, é a utilização de resíduos orgânicos provenientes de diferentes meios, como efluentes industriais, suinocultura, lodo de esgoto, entre outros, facilitando no processo e tendo impacto positivo no meio ambiente. A melhor forma para obter um biogás de qualidade é analisar a biomassa, a sua composição e a colheita deste, também é necessário atentar-se as condições do meio e todo o processo. Tendo essas premissas, o presente trabalho teve como objetivo geral criar um cenário em que se relaciona a produção de biogás a partir da biomassa da microalga *Spirulina* sp. LEB-18 e a geração de energia. Tendo como resultados os seguintes pontos: para 8 horas dia⁻¹ produz 200m³dia⁻¹ de biogás e necessita de 740,74 m³ do volume de biomassa gerando 285,6 kWh de energia elétrica, em sua maior produtividade de 24 horas dia⁻¹ produz 600 m³dia⁻¹ e tem o volume de biomassa necessário de 2222,22 m³ para gerar 856,8 kWh. Além disso, por mês gera 25704 kWh de energia elétrica no alto da produção resultando no fornecimento de energia para 117 casas ou 468 pessoas.

Palavras Chaves: metano, biogás, microalga, *Spirulina* sp., energia elétrica.

ABSTRACT

The large amounts of emissions of polluting gases into the atmosphere, lithosphere and hydrosphere, without proper treatment, is increasingly worrying. Climate change around the world is already a reality, high temperatures, floods, heavy rains and forest fires in previously unseen places have been happening more often annually. From this, studies related to the most sustainable alternatives to ensure a form of biofuels through the biomass of microalgae, is more exploited, in order to minimize the impact on the environment caused by the use of fossil sources, being also the most used way of obtaining energy. As an alternative to the replacement of fuels that degrade the environment, biogas is a source of energy produced from the metabolization of organic materials, where bacteria anaerobically digest these materials. To obtain biogas it is necessary to use mainly methane and carbon dioxide, polluting gases dispersed in the atmosphere in large quantities by industries and enterprises. Another advantage of biogas is the use of organic waste from different media, such as industrial effluents, pig farming, sewage sludge, among others, facilitating the process and having a positive impact on the environment. The best way to obtain a quality biogas is to analyze the biomass, its composition and the harvest of this, it is also necessary to take care of the conditions of the environment and the whole process. Having these premises, the present work had as general objective to create a scenario in which the production of biogas from the biomass of microalgae *Spirulina* sp is related. LEB-18 and power generation. Having as results the following points: for 8 hours day⁻¹ produces 200m³dia⁻¹ of biogas and requires 740.74 m³ of biomass volume generating 285.6 kWh of electricity, in its highest productivity of 24 hours day⁻¹ produces 600 m³dia⁻¹ and has the required biomass volume of 2222.22 m³ to generate 856.8 kWh. In addition, per month generates 25704 kWh of electricity at the top of production resulting in the supply of power to 117 homes or 468 people.

Keywords: methane, biogas, microalgae, *Spirulina* sp., electrical energy.

RESUMEN

Las grandes cantidades de emisiones de gases poluentes en la atmósfera, litosfera e hidrosfera, sin tratamiento adecuado, es cada vez más preocupante. El cambio climático en todo el mundo ya es una realidad, las altas temperaturas, las inundaciones, las fuertes lluvias y los incendios forestales en lugares nunca antes vistos han estado ocurriendo con más frecuencia anualmente. A partir de esto, los estudios relacionados con las alternativas más sostenibles para asegurar una forma de biocombustibles a través de la biomasa de microalgas, se explotan cada vez más, con el fin de minimizar el impacto en el medio ambiente causado por el uso de fuentes fósiles, siendo también la forma más utilizada de obtener energía. Como alternativa a la sustitución de combustibles que degradan el medio ambiente, el biogás es una fuente de energía producida a partir de la metabolización de materiales orgánicos, donde las bacterias digieren anaeróticamente estas sustancias. Para obtener biogás es necesario utilizar principalmente metano y dióxido de carbono, gases contaminantes dispersos en la atmósfera en grandes cantidades por industrias y empresas. Otra ventaja del biogás es el uso de residuos orgánicos de diferentes medios, como efluentes industriales, cría de cerdos, lodos de depuradora, entre otros, facilitando el proceso y teniendo un impacto positivo en el medio ambiente. La mejor manera de obtener un biogás de calidad es analizar la biomasa, su composición y la cosecha de esta, también es necesario cuidar las condiciones del medio ambiente y todo el proceso. Teniendo estas premisas, el presente trabajo tuvo como objetivo general crear un escenario en el que se relacionara la producción de biogás a partir de la biomasa de microalgas *Spirulina* sp. LEB-18 y generación de energía. Teniendo como resultados los siguientes puntos: durante 8 horas diarias-1 produce 200m³dia-1 de biogás y requiere 740.74 m³ de volumen de biomasa generando 285.6 kWh de electricidad, en su mayor productividad de 24 horas día-1 produce 600 m³dia-1 y tiene el volumen de biomasa requerido de 2222.22 m³ para generar 856.8 kWh. Además, al mes genera 25704 kWh de electricidad en la parte superior de la producción dando como resultado el suministro de energía a 117 hogares o 468 personas.

Palabras Claves: metano, biogás, microalgas, *Spirulina* sp., energía eléctrica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Microalgas no microscópio a partir de cultivos em fotobiorreatores.....	6
Figura 2: Esquema de biorreatores em estágio de bancada, piloto e industrial, conforme a capacidade de trabalho	9
Figura 3: Representação de um processo fermentativo genérico	10
Figura 4: Fluxograma das etapas de geração de energia através do biodiesel de microalgas pela sede do NPDEAS	12
Figura 5: Biorreator de tanque agitado piloto	13
Figura 6: Sistemas abertos “Raceways”	14
Figura 7: FBR tubulares compactos localizados na Universidade Federal do Paraná.....	15
Figura 8: Esquema simplificado da digestão anaeróbia de matéria orgânica para obtenção de metano.....	21
Figura 9: Usina híbrida da EnerDinBo, utiliza dejetos da suinocultura para produzir energia elétrica.....	24
Figura 10: Processo integrado biodiesel - biogás	27
Figura 11: Fluxograma de produção de biogás para geração de energia elétrica	28
Figura 12: Equipamento experimental	30
Figura 13: Concentração da biomassa da microalga <i>Spirulina</i> sp. LEB-18.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais vantagens e limitações dos convencionais modelos de fotobiorreatores	17
Tabela 2: Produção de metano a partir da digestão anaeróbia de diversos substratos.....	23
Tabela 3: Comparativo energético do biogás equivalente a outros combustíveis	25
Tabela 4: Composição centesimal da biomassa de Spirulina sp. LEB-18 utilizada como substrato para produção de biogás	29
Tabela 5: Parâmetros relacionados a geração e produção de biogás por dia.....	35
Tabela 6: Produção de biogás e volume de biomassa por dia/m ³	35
Tabela 7: Parâmetros: período de geração, produção de biogás e volume de biomassa.....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL.....	3
1.1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.2	ESTRUTURA DO TEXTO.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	MICROALGAS.....	4
2.1.1	COMPOSIÇÃO DAS MICROALGAS	5
2.1.2	CRESCIMENTO CELULAR	7
2.2	BIORREATORES E FOTOBIORREATORES.....	8
2.2.1	MODELOS DE BIORREATORES E FOTOBIORREATORES	12
2.3	COLHEITA DE BIOMASSA	18
2.3.1	SEDIMENTAÇÃO E FLOCULAÇÃO	18
2.3.2	CENTRIFUGAÇÃO	19
2.4	DIGESTÃO ANAERÓBIA DE BIOMASSA ALGAL	20
2.4.1	ETAPAS DA FORMAÇÃO DE METANO	22
2.5	BIOGÁS.....	24
2.6	BOIDIESEL X BIOGÁS.....	26
3	METODOLOGIA	27
3.1	PRODUTIVIDADE DE METANO A PARTIR DA MICROALGA <i>SPIRULINA</i> SP. LEB-18 E A PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	28
3.2	ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS GERADO.....	31
3.3	RELAÇÃO PRODUÇÃO DE BIOGÁS E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	33

	XII
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5 CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

INTRODUÇÃO

Os problemas ambientais provenientes das emissões gasosas na atmosfera, são temas bem discutidos no âmbito acadêmico, isso ocorre, pois, as mudanças climáticas estão cada vez mais recorrentes no cotidiano atual. Com isso, há necessidade de mais estudos para solucionar a grande quantidade de emissão de gás carbônico, sendo este o efluente gasoso mais comum dispersado na atmosfera pelas grandes indústrias sem o devido tratamento.

O processo de biocombustíveis a partir das microalgas, é uma área de estudos cada vez mais crescente, visto que um dos fatores essenciais para a produção da biomassa utilizada nos processos de biocombustíveis, como biodiesel e biogás, é o dióxido de carbono.

As microalgas podem ser encontradas principalmente em água marinha, mas também podem estar presentes em água doce e no solo, sendo responsáveis por 60% de toda a produção primária da Terra, sendo a sua biomassa considerada a base de cadeias tróficas nos ambientes aquáticos (CHISTI, 2004). As microalgas possuem capacidade de armazenar energia solar e converter para energia biológica, assim no decorrer das cadeias tróficas são sintetizadas nova matéria orgânica a partir de substratos inorgânicos, CO₂ e água, fazendo com que a energia biológica seja parte da alimentação dos consumidores primários, parte do segundo nível trófico, dando sequência as cadeias alimentares de acordo com BOONAERT et al. (1999). Além disso, dependendo da espécie da microalga, podem conter elevadas concentrações de proteínas e nitrogênio, sendo utilizadas na produção de biocombustíveis, biofertilizante e nas indústrias alimentícias como forma de redução da carne e suplemento alimentar.

É necessário a identificação das características das cepas de microalgas a serem utilizadas (EROGLU, 2010), o meio de cultivo das microalgas como biorreatores e fotobiorreatores, suas condições e as técnicas de colheita da biomassa para a produção de biogás (BRENNAN, OWENDE, 2010). Todos os fatores citados precisam ser avaliados e monitorados para uma maior eficiência.

Uma das etapas essenciais para a produção do biogás é a digestão anaeróbia de biomassa de microalgas, a relação das composições de nitrogênio e carbono são fundamentais para um bom rendimento nesta produção segundo GOULARTE (2014), tendo como principais componentes de interesse o metano e dióxido de carbono.

Para um bom rendimento na produção de biometano é preciso substratos com elevado valor de lipídios, grau de biodegradabilidade alto e baixo teor de células lignocelulósicas (LABATUT; ANGENENT; SCOTT, 2011).

A partir da decomposição biológica da matéria orgânica na ausência de oxigênio, pode-se obter o biogás, que é, portanto, produto da digestão anaeróbia. A utilização de diversos tipos de resíduos orgânicos para a obtenção do produto é uma vantagem ambiental enorme (NOYOLA et al., 2006), pois reduz as grandes quantidades de resíduos descartados incorretamente.

As fontes de produção de biogás no Brasil têm a sua maior porcentagem por aterros sanitário, chegando em 51%, a indústria de alimentos e bebida fica em torno de 25%, a suinocultura que vem aumentando muitos os recentes estudos ficam por volta de 14% e o lodo de esgoto 6%, de acordo com os dados da Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2015). Ainda de acordo com a EPE, a produção de biogás no país é quase totalmente direcionada para a produção de energia elétrica ou térmica.

O biogás pode ser utilizado como combustível, adquire-se as formas de uso de motores a combustão interna, o aquecimento de caldeiras e fornos, turbinas a gás e microturbinas. É preciso atentar-se a parâmetros importantes para identificar em qual forma utilizar melhor o biogás ou tratá-lo da melhor maneira, como a vazão, composição e poder calorífico do biogás empregado. Dependendo destes fatores é necessário tratar o biogás em remoção do dióxido de carbono, umidade e do ácido sulfídrico, sendo, portanto, fatores que atuam principalmente no potencial de geração de energia elétrica, calor ou trabalho (PRATI, 2010).

O trabalho em questão, propõe uma abordagem sobre um cenário criado que relaciona a produção de biogás a partir da biomassa da microalga *Spirulina* sp. LEB-18 e a geração de energia.

1.1 Objetivo Geral

Abordar sobre um cenário estimativo que relaciona a produção de biogás a partir da biomassa da microalga *Spirulina* sp. LEB-18 e a geração de energia elétrica.

1.1.1 Objetivos Específicos

- ✓ Relacionar o período de geração do biorreator com a quantidade de produção de biogás gerada e o volume de biomassa necessário para a operação;
- ✓ Quantificar a geração de energia elétrica a partir da produção de biogás encontrada, através de dados da literatura;
- ✓ Apontar, de acordo com a tarifa mensal da Companhia Energética de Minas Gerais S.A. (CEMIG), quantas pessoas seriam beneficiadas com a geração de energia elétrica no cenário criado.

1.2 Estrutura do Texto

Os próximos capítulos apresentam uma revisão bibliográfica de importantes conceitos para contextualizar a proposta do trabalho, como composição e crescimento celular das microalgas, classificação de biorreatores e fotobiorreatores, colheita de biomassa, etapas da formação de metano, digestão anaeróbia de biomassa a partir de microalgas, produção de biogás e a geração de energia elétrica.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MICROALGAS

As microalgas são organismos aquáticos, com comprimentos microscópicos (5-50 μm) e predominantemente unicelulares heterogêneos. Podem ser caracterizadas como seres fotossintéticos, ou seja, microrganismos que produzem as substâncias orgânicas necessárias para servir de alimento a partir da fotossíntese, sendo o dióxido de carbono e a energia solar fontes principais para seu desenvolvimento.

Segundo GIORDANO et al. (2005), a divisão das microalgas vai depender do período em que surgiram no planeta, podendo ser dividido entre antigas ou mais recentes, compostas de espécies de organismos procariotos ou eucariotos. As definições de cores do organismo em questão são as mais variadas, tendo como base as condições do meio em que se está inserida, os pigmentos e o mecanismo foto autotrófico (SCHMITZ et al., 2012).

Para a realização da fotossíntese, as microalgas necessitam da água, dióxido de carbono e luz solar, ambos itens naturais que existem em abundância na Terra, e ainda podem produzir fontes de energia para a produção de biomassa como proteínas, lipídeos, hidrocarbonetos e polissacarídeos (ANDRADE et al., 2008). A produção de biomassa é cada vez mais estudada a fim de achar maneiras para a produção de biocombustíveis para a redução de gases poluentes na atmosfera como o dióxido de carbono, sendo também, as microalgas as maiores produtoras de oxigênio da Terra chegando em até 60% da produção primária do planeta, de acordo com CHISTI (2004).

As condições necessárias do meio de cultivo influenciam significativamente tanto no crescimento celular como no rendimento das microalgas, um importante fator também é a composição microalgal da espécie em questão. Os elementos que mais se devem ter destaque são o carbono, fosfato, nitrogênio, sais de magnésio,

potássio e cálcio, alguns microelementos também podem ajudar para manutenção de suas atividades vitais (BORGHETTI, 2009).

Como diferencial das plantas, as microalgas adaptam facilmente as condições que lhe opõem, podendo crescer rapidamente e serem expostas a variados meios de cultivo, também não se limitam apenas a água aquática, sendo possível o crescimento em água doce e águas residuárias, ou seja, diversos ecossistemas (DANESHVAR et al., 2021; SAJJADI et al., 2018). Outros fatores vantajosos destes microrganismos, é a sua performance como fonte alternativa de proteína, dependendo da espécie o teor proteico pode variar entre 40 e 70% da sua composição utilizando carbono inorgânico ou orgânico, além da formação de compostos químicos orgânicos naturais como o lipídeo, vitaminas, ésteres e carboidratos que servem na produção de bioprodutos que posteriormente podem ser comercializados também (MOHAN et al., 2021).

Questões ambientais para a redução das emissões de gases poluentes na atmosfera são temas atuais cada vez mais recorrentes, as microalgas têm papel fundamental neste estudo pois o processo de sequestro de carbono é uma das fontes essenciais do seu metabolismo (YU et al., 2017), sendo o dióxido de carbono um dos principais poluentes atuais do mundo, proveniente das grandes indústrias. Além do crescente estudo para o seu cultivo em águas residuais, como já foi citado, as microalgas podem ser cultivadas em diferentes meios, este problema ambiental de água não tratada sendo despejada diretamente nos rios pode ter como solução um pré tratamento com as microalgas removendo compostos e consumindo os nutrientes, também oferecendo vantagem no cultivo da mesma por não precisar utilizar grandes quantidades de água doce (ROUX, LAMOTTE e ACHARD, 2017).

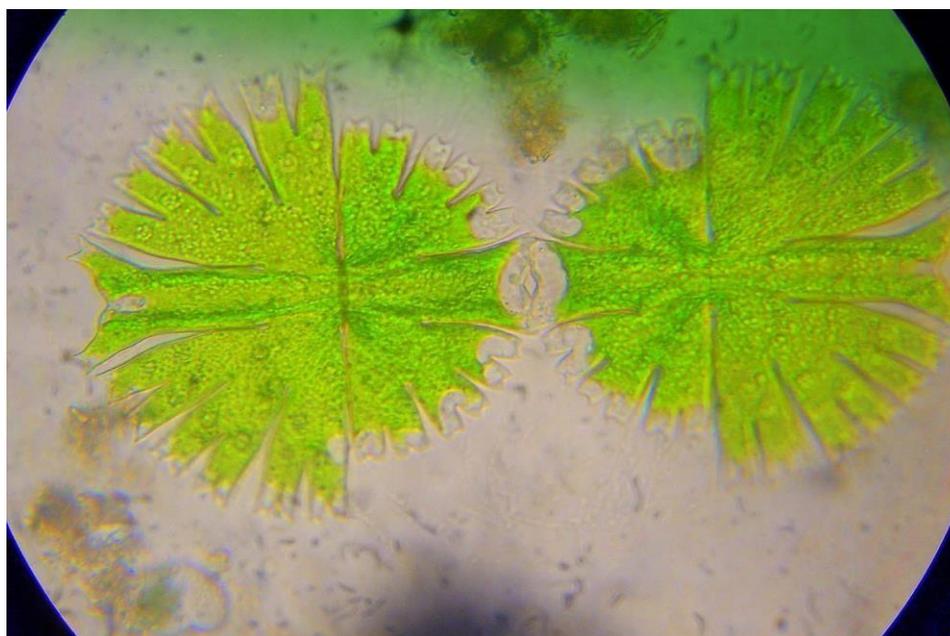
2.1.1 COMPOSIÇÃO DAS MICROALGAS

As microalgas podem ser classificadas dependendo de alguns critérios como a pigmentação, a natureza química dos produtos de reserva e pelos elementos da parede celular, de acordo com Tomaselli (2004). Critérios citológicos e morfológicos também são fatores relevantes a serem considerados, a geração de células flageladas, tal como a estrutura dos flagelos, a formação do núcleo e da divisão celular, a caracterização do cloroplasto e a membrana nuclear são itens importantes para definir o rendimento e a classificação da mesma (DERNER, 2006).

As principais formações dos compostos bioativos dos microrganismos algais da sua composição são os lipídeos, carboidratos e proteínas, a quantidade de cada composto vai depender da sua composição que vai ter relação com os fatores do meio como iluminação, fotoperíodo, pH, temperatura, nutrientes minerais, CO₂, entre outros. Estes compostos bioativos têm uma vasta aplicabilidade em setores variados, as grandes empresas alimentícias e a indústria farmacêutica são exemplos destes setores que exploram estes produtos (KOYANDE et al., 2019; LEVASSEUR, PERRE e POZZOBON, 2020).

A relação dos componentes das células microalgais variam de acordo com a espécie da planta microscópica, na Figura 1 é possível observar microalgas vistas através do microscópio e sua composição. Em relação aos lipídios adota-se uma classificação básica de lipídios neutros (triglicerídeos e colesterol) e lipídios polares como os fosfolipídios. Para a produção do biodiesel, outra fonte de energia limpa bastante explorada, os lipídios neutros, como os triglicerídeos, são essenciais (HUANG et al., 2010).

Figura 1 - Microalgas no microscópio a partir de cultivos em fotobiorreatores



Fonte: Projeto PDE – Professora Vera Lucia Bellin Mariano.

A matéria seca das microalgas pode ser definida por até 50% de carboidratos, a extração de polissacarídeos do carboidrato microalgal tem potência na produção de bioetanol, porém com a falta de avanços tecnológicos nesta extração ainda é uma alternativa pouco utilizada por ser mais cara que outras que já estão no mercado (KOYANDE et al., 2019). Outra substância muito relevante que compõe as microalgas são as proteínas, normalmente possuem níveis de aproximadamente 50% de teor proteico em relação a toda biomassa, sendo cada vez mais exploradas pelo setor alimentício, como forma de reduzir o consumo de carne e suprir a necessidade humana de proteína (SATHASIVAM et al., 2019).

2.1.2 CRESCIMENTO CELULAR

Para a realização do crescimento celular microalgal, um dos fatores principais é a fotossíntese, que é uma das funções biológicas fundamentais das células vegetais. Por causa da clorofila que está inserida nos cloroplastos, as microalgas conseguem absorver a energia proveniente da luz solar, fótons, e transformar em energia química.

As reações químicas vindas da fotossíntese podem ocorrer na presença de luz, chamadas reações lumínicas (fotoquímicas), e outras na ausência de luz, denominadas reações escuras. Dando enfoque nas reações fotoquímicas que serão mais relevantes para contextualizar este trabalho, elas ocorrem na membrana do talacóide, onde possui bicamada lipídica que contém complexos proteicos transmembranares associados a pigmentos, capazes de captar a energia da luz solar. Os pigmentos mais significativos para as microalgas são as clorofilas, caracterizadas por suas composições químicas, seus espectros de absorção da luz e suas funções (COLLA, L.; RUIZ, WALTER AUGUSTO; COSTA, 2012).

O crescimento celular microalgal é determinado pela curva de crescimento de cada espécie, que vai depender das condições do meio de cultivo. Segundo com Madigan et al. (2010), há seis fases que descrevem todo o ciclo de crescimento das microalgas, variando apenas a duração de cada fase de acordo com a espécie em questão, são elas: fase de latência (fase lag), fase de aceleração, fase exponencial (fase log), fase de desaceleração, fase estacionária e fase morte. É importante ressaltar que a fase log é onde tem o crescimento microalgal mais acelerado, chegando ao valor máximo de crescimento, onde também as células têm as

condições mais saudáveis, já na fase estacionária é onde tem a diminuição da concentração de nutrientes e aumento da concentração de produtos tóxicos.

Os macronutrientes também são fatores de muita importância para definir o crescimento celular, tais como hidrogênio, oxigênio e enxofre, que formam a estrutura das biomoléculas, e os micronutrientes como boro, cálcio, cobalto, entre outros podem interferir no funcionamento das funções das células, como o transporte de elétrons na reação de fotossíntese (COLLING KLEIN; BONOMI; MACIEL FILHO, 2018). Esses itens implicam na densidade do cultivo que está intimamente relacionada com o crescimento das microalgas (Myers e Graham, 1958).

A microalga *Spirulina* tem um padrão de cultivo, a diluição do meio Zarrouk, onde existe a manipulação das condições de cultivo, neste caso é utilizado altas concentrações de sais no meio, além disso estudos anteriores comprovam que a produtividade nos cultivos com meio Zarrouk diluído pode ser maior de acordo com REINEHR (2003) citado por MULITERNO (2005).

2.2

BIORREATORES E FOTOBIORREATORES

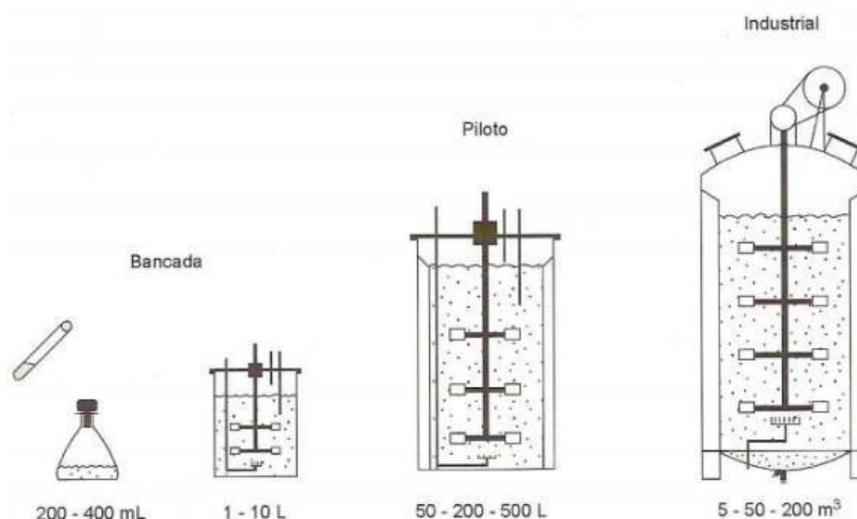
O crescente desenvolvimento da biotecnologia, é capaz de fornecer a biotransformação de matérias-primas em produtos, podendo utilizar agentes biológicos como antibióticos, enzimas, corantes, hormônios, entre outros, estes são exemplos de produtos mais comuns de estudos, essa transformação normalmente dá origem a um processo fermentativo. Estudos mais avançados têm focado em outra área com grande potencial de crescimento, que são as aplicações das técnicas de cultura de células e tecidos vegetais, estudos em larga escala que pretendem a produção em massa de cepas (ROSSI, 2006).

Para se obter um aumento na taxa de multiplicação, os sistemas de biorreatores têm sido uma opção a ser explorada, pois não é necessário a constante transferência de explantes (célula, tecido ou órgão de uma planta), o que acontece no modo tradicional (GEORGE, 1993). Ainda de acordo com George (1993) citado

por LEMOS et al. (2011), este método consiste em que as plantas podem se desenvolver melhor quando cultivadas em regulares intervalos de imersão em meio líquido seguindo por uma drenagem. A lógica é quanto maior contato superficial das plantas com o meio de cultura maior é a absorção, aumentando conseqüentemente a absorção dos nutrientes por todas as partes da planta como as folhas, caules e raízes, assim, elas produzem mais biomassa.

Para isso, os avanços tecnológicos vêm sendo de grande incentivo para a criação de modernos biorreatores para distintas necessidades de produção, onde controla-se as condições do meio como temperatura, pressão, pH, agitação, espuma, entre outros parâmetros CAMMAROTA (1991). A figura 2 mostra um exemplo de biorreator em escala laboratorial, planta piloto ou industrial de forma ilustrativa:

Figura 2: Esquema de biorreatores em estágio de bancada, piloto e industrial, conforme a capacidade de trabalho

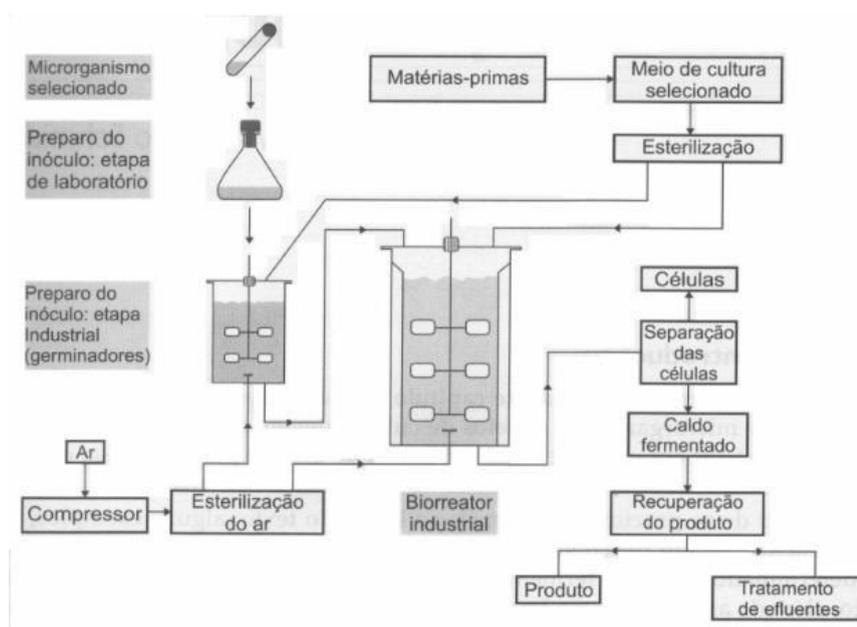


Fonte: CAMMAROTA (1991)

De acordo com CAMMAROTA (1991), os parâmetros a serem condicionados no meio vão depender da finalidade da obtenção do produto de interesse, a temperatura garante o crescimento do microrganismo podendo induzir a obtenção de uma proteína, o pH influencia no rendimento do processo e também no crescimento celular, a agitação interfere na transferência de massa e calor, etc. É

necessário a otimização dos parâmetros de cultivo para obter o produto final. A figura 3 representa um processo de fermentação genérico que ocorre:

Figura 3: Representação de um processo fermentativo genérico



Fonte: CAMMAROTA (1991)

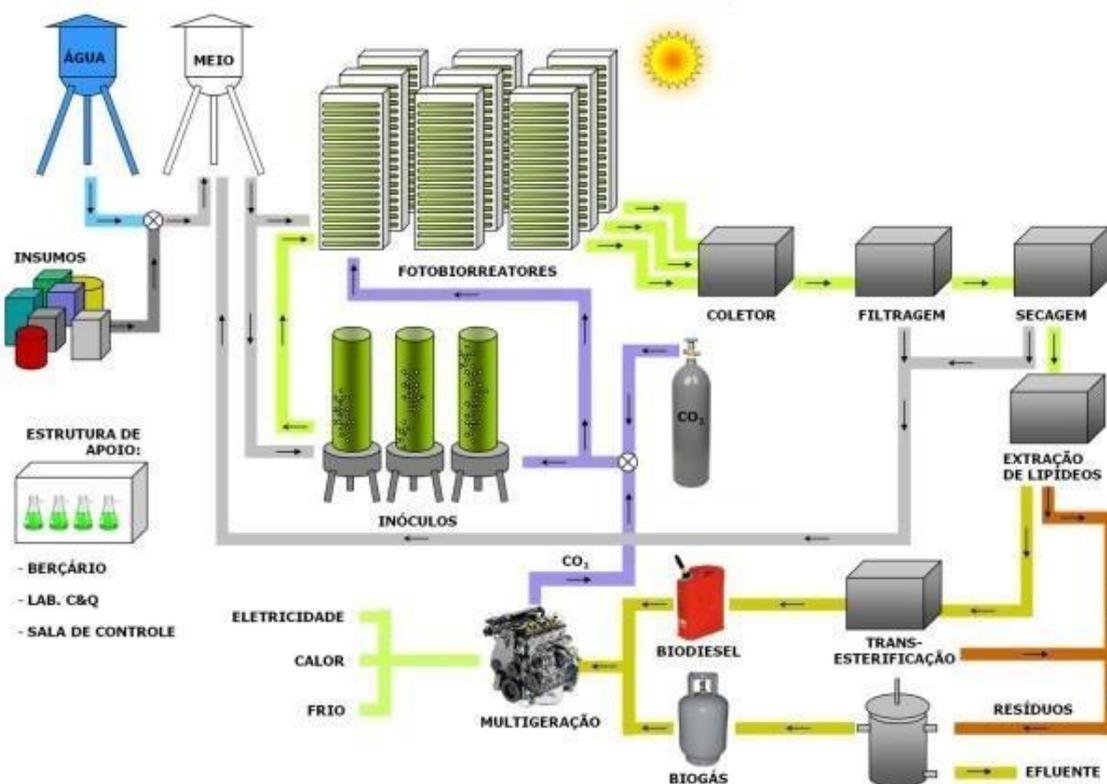
Os fotobiorreatores (FBR) são reatores onde os microrganismos fototróficos como as células microbianas, microalgas ou plantas são cultivados e utilizados para a realização de uma reação fotobiológica. Como um ambiente de cultivo fechado, os FBR fornecem uma maior proteção à contaminação vinda de outros microrganismos, pode oferecer um maior controle das condições necessárias (pH, temperatura, iluminação, etc) para o crescimento contínuo das microalgas e permite alcançar maiores produtividades volumétricas e concentrações de células pela maior relação superfície – volume, diferente dos sistemas abertos (DARZINS; PIENKOS; EDYE, 2010).

Para o setor de biocombustíveis de microalgas, segundo Fortes (2015) o mais utilizado atualmente são os fotobiorreatores, apesar de modo geral os sistemas abertos como as lagoas abertas ainda serem as mais utilizadas comercialmente por serem mais baratas de construir e operar, os cultivos FBR só têm a crescer com o avanço tecnológico e interesses financeiros.

Os fotobiorreatores são concebidos em função do tipo de processo e dos agentes biológicos empregados. Podem possuir características bem distintas no que se refere a fenômeno de transporte (calor, massa e quantidade de movimento).

Os projetos dos FBR dependem do material de construção adequado, eficiência de mistura, aquecimento/arrefecimento, fornecimento de CO₂ e remoção de O₂, apesar de bem exploradas em pequena escala, ainda faltam estudos a serem feitos em escala industrial para a produção de biocombustíveis (DARZINS; PIENKOS; EDYE, 2010). De acordo com Ribeiro (2012), a Figura 4 mostra um exemplo de fluxograma de um projeto de produção de biodiesel produzida por fotobiorreatores com microalgas no Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Auto-Sustentável (NPDEAS/UFPR), dando enfoque na linha roxa onde os gases provenientes da queima do biodiesel seriam misturados no ar de entrada do fotobiorreator acoplado no cultivo de microalgas e o fluxo verde onde a biomassa da microalga é recuperada do fotobiorreator, o restante do meio seria posteriormente utilizado nos próximos cultivos. A linha amarela mostra o óleo extraído da biomassa microalgal sendo usado para obtenção de biodiesel, que é utilizado como combustível para a geração do reaproveitamento energético. A linha alaranjada, composta principalmente por metano, poderiam ser reaproveitados no processo de biodigestão que gera biogás, utilizando os restos sólidos da extração do óleo.

Figura 4 - Fluxograma das etapas de geração de energia através do biodiesel de microalgas pela sede do NPDEAS



Fonte: SATYANARAYANA et al., 2011, citado por Ribeiro (2014).

Alguns pesquisadores acreditam que uma boa solução pode estar em uma combinação de sistemas (RODOLFI et al., 2009), assim a primeira etapa seria nos FBR para produzir inóculos fortes e viáveis, seguindo para um sistema de lagoas abertas para o cultivo em massa, porém faltam estudos que comprovem esta teoria (BOROWITZKA; MOHEIMANI, 2013).

2.2.1 MODELOS DE BIORREACTORES E FOTOBIORREACTORES

Para escolher o modelo ideal do biorreator, é necessário envolver a estrutura física e o produto final desejado, além disso saber a cinética das reações, os fenômenos de transporte e as formas de operações, questões fundamentais para o melhor desenvolvimento do projeto do biorreator, segundo CHISTI (1989) citado por ROSSI (2001).

O biorreator mais comum utilizado é o tanque agitado (STR), durante a Segunda Guerra Mundial foi empregado um modelo de STR para a produção do antibiótico penicilina no cultivo aeróbio (BAILEY, 1980; ROSSI (2001)). Ainda de acordo com ROSSI (2001), na indústria por volta de 90% dos biorreatores aeróbios usados são de tanque agitado tradicional como mostra a figura 5, sendo os 10% restantes de biorreatores pneumáticos, sem agitação mecânica como os airlifts e os colunas de bolhas (ROSSI, 2006). Apesar de bastante utilizados, os biorreatores STR não são ideais para o cultivo de microrganismos, pois pelo elevado grau de agitação pode causar danos no crescimento celular devido às zonas de cisalhamento existente no biorreator.

Figura 5: Biorreator de tanque agitado piloto



Fonte: Bioengineering AG, citado por ROSSI (2001)

Para o cultivo das microalgas existe o sistema aberto e o sistema fechado. Em sistemas abertos pode oferecer condições ideais que vão ajudar o crescimento e desenvolvimento de microalgas idênticas à do ambiente externo, normalmente esses sistemas são em piscinas ou tanques expostos ao meio ambiente, enquanto os sistemas fechados são normalmente os fotobiorreatores (REIS, 2014).

O sistema aberto comumente utilizado em países como Estados Unidos e Israel são os Raceways como mostra na figura 6, são métodos de produção que possuem um revestimento de pistas de grandes áreas e com recirculação por chicanas, estas chicanas guiam o trajeto da água em relação as microalgas. Usualmente nestes

modelos Raceways a alimentação da cultura e a circulação são contínuas, evitando assim a deposição da biomassa no fundo do canal dos equipamentos, outro aspecto importante a ser destacado é que por ser um sistema aberto a condições climáticas está sujeito a sofrer enormes alterações na temperatura dependendo da época do dia e do ano, tendo a evaporação em épocas mais quente um fator que deve ser controlado assiduamente (GUIMARÃES, 2012).

Figura 6: Sistemas abertos “Raceways”



Fonte: [Algae Wastewater Treatment: Sewage Into Tap Water - https://making-biodiesel-books.com](https://making-biodiesel-books.com). Acesso em: 10 de dezembro de 2021.

A geometria do compartimento que engloba a cultura microalgal define a classificação dos fotobiorreatores em “tubulares” e “planares” (UGWU, 2008). As placas planas oferecem a possibilidade de serem iluminados artificialmente ou a incidência de luz natural, também há a placa tubular e coluna de bolha.

De acordo com CHEW et al. (2018), nas placas tubulares ocorrem a injeção de ar no interior do equipamento, produzindo bolhas de ar que favorecem a troca

gasosa, transferência de massa e contém grande quantidade de biomassa nas regiões inferiores. A melhor forma de se ter uma maior produtividade volumétrica de biomassa é pela disposição dos tubos de forma vertical, pois a densidade de fluxo dos fótons é mais baixa nas paredes do FBR, também oferecem a vantagem na eficiência fotossintética média. As placas utilizam formatos em diâmetros pequenos para facilitar a penetração de luz (CHEW et al., 2018). Os FBR com placas tubulares como na Figura 7, possuem as desvantagens de precisarem utilizar material mais rebuscado para construí-lo, sendo um custo maior, as culturas de algas precisam de uma alta tensão de cisalhamento e pequena área de superfície se a escala de produção fosse maior (UGWU; AOYAGI; UCHIYAMA, 2008).

Figura 7 - FBR tubulares compactos localizados na Universidade Federal do Paraná



Fonte: Ribeiro (2014).

Diferentemente dos fotobiorreatores de placas tubulares, os de tanque agitado são com material de menor custo, como aço ou vidro, quando controlado adequadamente as condições é ideal para o crescimento de microalgas heterotróficas. O funcionamento dos FBR acontece através de movimento mecânico do agitador, garantindo a transferência indicada de calor e massa. Apesar do reator oferecer uma boa mistura e transferência em cultivo interno com aeração, os

parâmetros de superfície e volume quando relacionados possuem uma pequena área, assim diminui a fotossíntese das microalgas (CHEW et al., 2018).

Os FBR de placas planas possuem um formato retangular, facilitando altas densidades de células pelo seu contato superfície e volume, e também são fabricados de vidro transparente ou semitransparente. O fotobiorreator também pode ser tanque Raceway, FBR aberto mais utilizado para a produção de biomassa em escalas maiores, o material do equipamento utilizado pode ser concreto, PVC ou terra compacta (CHEW et al., 2018).

A produtividade global em cada sistema é influenciada pelas propriedades de cepas de microalgas selecionadas, condições de cultura, equipamentos, área de instalação e os custos operacionais (BOROWITZKA, 1999). A Tabela 1 mostra as vantagens e limitações de cada tipo de fotobiorreator, de acordo com DA PONTE (2016):

Tabela 1 - Principais vantagens e limitações dos convencionais modelos de fotobiorreatores

Fotobiorreator (FBR)	Vantagens	Limitações
FBR Tubular	Ampla área iluminada	Possibilidade de incrustação e entupimento
	Adequado para cultura em área externa	Geralmente requer ampla área para instalação.
	Relativamente barato e de boa produtividade de biomassa	Forma gradientes de pH, devido a diferenciada concentração de O ₂ e CO ₂ ao longo dos tubos.
FBR plano ou janela	Alta produtividade de biomassa	Tradicional dificuldade de aumento de escala.
	Fácil esterilização	Tradicional dificuldade de controle de temperatura, dependendo da localização geográfica.
	Baixo acúmulo de O ₂	Alguma possibilidade de incrustação.
	Bom tamanho de caminho ótico.	
	Ampla área iluminada	
	Adequado para cultura em área externa	
FBR de coluna	Compacto	Baixa área iluminada
	Alta transferência de massa	Tradicionalmente mais caro quando comparado ao tanque aberto
	Baixo consumo de energia elétrica.	Tradicionalmente sofisticada construção
	Boa capacidade de agitação com baixa tensão de cisalhamento.	
	Fácil esterilização pelo menor número de peças móveis	
	Reduzido efeito de fotoinibição e fotoxidação.	

Fonte: DA PONTE (2016), adaptação de (OJO, 2015).

Todas as geometrias oferecem vantagens e limitações, como custos de operação, cultivo em grande escala, iluminação, controle de temperatura e evaporação (KIRNEV et al., 2020; PEGALLAPATI e NIRMALAKHANDAN, 2013). Porém, caso não seja feito o acompanhamento adequado, o sistema fechado pode gerar superaquecimento, crescimento de algas bentônicas, problemas de limpeza e alto acúmulo de oxigênio dissolvido (NARALA et al., 2016).

2.3 COLHEITA DE BIOMASSA

De acordo com Fortes (2015), para a separação da biomassa do meio de cultura, que pode conter restos celulares que não são de interesse, é preciso uma ou mais etapas de separação sólido-líquido. Isso ocorre pois é preciso a liberação de metabolitos, ocasionados na ruptura celular. As principais formas de colheita da biomassa é através da sedimentação, centrifugação ou filtração, tendo também a floculação como um possível processo adicional. O custo total de toda a produção pode chegar de 20-30% em relação a recuperação de células de microalgas (Gudin e Therpenier, 1986), a dimensão das microalgas e sua baixa concentração no meio de cultura ainda é uma das questões que carecem de estudos avançados (RICHMOND, 2004).

Para a realização da colheita de biomassa, independente da espécie, não existe uma padronização, é necessário avaliar todo o meio de cultura, os processos e produto desejado para decidir quais etapas são mais eficazes. Durante a análise, vale ressaltar que um processo de colheita quando otimizado e adaptado oferece mais benefícios econômicos, atendendo necessidades dos microrganismos e o principal objetivo posterior a colheita (GUDIN; CHAUMONT, 1991).

2.3.1 SEDIMENTAÇÃO E FLOCULAÇÃO

Cada processo deve ser analisado com atenção, por exemplo, utilizar a operação de sedimentação pode oferecer um risco no processo, pois a formação de aglomerados de algas sedimentadas pode dificultar a penetração de luz ou distribuição uniforme dos nutrientes. Entretanto, quando adicionado substâncias químicas ideais, pode reduzir a carga da superfície das células e formar aglomerados que podem vir a otimizar o processo de agrupamento.

A adição de polímeros faz com que obtenha um conjunto de células em uma massa, esta operação é chamada de floculação (MACKAY, 1996; BOONAERT et al., 1999). Quando as células estão muito distantes predomina a repulsão eletrostática,

que são células negativas que repelem outras células negativas. Quando as células estão em distâncias curtas, proporcionando a atração intermolecular ou forças de Van der Waals, apesar da força ser maior em comparação com grandes distâncias, ela ocorre de forma mais rápida. A adição de coagulantes ideais pode ajudar na melhoria do processo, pois reduz as forças eletrostáticas repulsivas e aumenta a distância à qual a atração pode ocorrer. Os coagulantes necessários possuem cátions bivalentes ou trivalentes capazes de reduzir a carga negativa da superfície das células, precipitando células adicionais. Então, a redução da repulsão eletrostática ocorre pela redução da carga de superfície em células negativas com sais como: cloreto férrico (FeCl_3), sulfato de alumínio ou alúmen ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), de acordo com Fortes (2015).

Para a colheita da biomassa por floculação, a desvantagem é de ter o maior custo econômico ou possuir mais dificuldades técnicas pela complexidade de inserir os coagulantes ideais no processo podendo causar toxicidade do floculante e um alto custo de energia (OH, 2001). Apesar disso, a colheita de células de microalgas por floculação permite o recolhimento de maiores quantidades de cultura a serem tratadas, o ideal é se a floculação fosse um pré-tratamento a outras operações, como a centrifugação.

2.3.2 CENTRIFUGAÇÃO

A centrifugação é a mais utilizada para a separação das microalgas, pois além de ter um custo econômico menor, a limpeza é mais fácil podendo ter a centrífuga esterilizável e pode ser usada para todas as espécies de microalgas. A centrífuga contém um tanque de sedimentação, que com a força gravitacional aumenta essa taxa de sedimentação, isso facilita o tempo de detenção da biomassa no campo centrífugo, dependendo da taxa de sedimentação e da distância da biomassa. Outra vantagem também, é o crescente avanço tecnológico que agrega no material utilizado nas centrífugas, como por exemplo o aço estrutural que pode chegar a altas velocidades sem ter o perigo da corrosão, assim, separam os sólidos de baixa densidade em enorme escala (MACKAY, 1996).

Atualmente, existem três tipos de centrífugas que são fornecidas para agrupar as concentrações das microalgas, pelo fator dependente do tamanho das partículas:

centrífuga tubular, centrífuga de disco e centrífuga decanter. A centrífuga tubular pode atingir grande força permitindo uma boa desidratação, mas com capacidade limitada, comumente utilizada em pequenos volumes e em cultivos diluídos, como na escala banda. A centrifugação de disco vai depender do tipo de sólido, pode-se também controlar o teor de umidade da biomassa, tendo como características principais a serem destacadas para um bom funcionamento a distância, força centrífuga, teor de biomassa e ângulo dos discos (MACKAY, 1996). Ainda de acordo com Mackay (1996), a centrífuga decanter tem forças menores com qualidade do meio separado da biomassa não tão boas como as centrífugas de discos, porém são as mais utilizadas para lamas com alto valor de biomassa.

2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA DE BIOMASSA ALGAL

A digestão anaeróbia é um processo biológico e com ausência de oxigênio o material orgânico é transformado em biogás, este tem como principais componentes o metano e o dióxido de carbono. Para um bom rendimento na produção de biometano é necessário substratos com elevado valor de lipídios, grande grau de biodegradabilidade e baixo teor de células lignocelulósicas (LABATUT; ANGENENT; SCOTT, 2011), além das concentrações de carbono e nitrogênio serem fundamentais para o desempenho da digestão anaeróbia e serem fatores limitantes de acordo com GOULARTE (2014).

A digestão anaeróbia é fundamental para a co-digestão anaeróbia, pois se trata de uma mistura de substratos com diferentes características, podendo diluir substâncias tóxicas que podem estar em alguns substratos, fornecer nutrientes que estão em falta em um substrato, melhorar efeitos sinérgicos sobre microrganismos e aumentar a produção de biogás (MATA-ALVAREZ et al., 2011). De acordo com SILVA (2009), o processo de conversão da matéria orgânica pela digestão anaeróbia pode-se dividir em quatro etapas diferentes para a formação do metano: a hidrólise, a acidogênese, a acetogênese e a metanogênese, na Figura 8 pode-se

observar de uma maneira geral a biodigestão anaeróbia, adaptado de Chernicharo (1997) e apresentado por GOULARTE (2014).

Figura 8 - Esquema simplificado da digestão anaeróbia de matéria orgânica para obtenção de metano



Fonte: Adaptação de Chernicharo (1997), apresentado por GOULART (2014).

O gás metano (CH₄) é produzido a partir da degradação biológica anaeróbia da biomassa, o mesmo é responsável pela capacidade calorífica do biogás, de acordo com COSTA (2006) citado por LEMOS (2019).

Segundo HENRARD (2013), os estudos de Zamalloa et al. (2012) sobre digestão anaeróbia utilizando as microalgas como substrato, obtiveram resultados para a microalga *Scenedesmus obliquus* de 74,3 % (v/v) e para a *Phaeodactylum tricornutum* de 75,1 % (v/v) de metano no biogás. Para a produção de biogás utilizando a biomassa da microalga *Spirulina* sp. LEB-18, os estudos de Costa et al. (2008) obtiveram 77,67 % (v/v) de CH₄ no biogás, quando comparado a outros substratos as microalgas aparecem em vantagem, pois utilizando resíduos sólidos urbano o teor de metano no biogás fica por volta de 57-68% (KIM et al., 2011) e utilizando dejetos bovinos e ovinos fica em torno de 47-55% (ALVAREZ; LIDÉN, 2009).

2.4.1 ETAPAS DA FORMAÇÃO DE METANO

A primeira etapa, hidrólise, tem as bactérias anaeróbicas facultativas, chamadas de bactérias hidrolíticas, que transformam os polímeros orgânicos em compostos simples com menor massa molecular, chamados de monômeros orgânicos, também transformam a partir de enzimas extracelulares em acetato, hidrogênio, dióxido de carbono, ácidos orgânicos de cadeia curta, aminoácidos e glicose (CHERNICHARO, 1997). A composição do substrato é fundamental para definir o tempo de duração desta etapa, os carboidratos sofrem um processo mais rápido de degradação, já as proteínas e lipídeos tem uma maior duração de tempo (SIALVE; BERNET; BERNARD, 2009). De acordo com Soares (2017), existem as bactérias mais comumente utilizadas em reatores anaeróbios, como: *Lactobacillus*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Desulfobacter*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, entre outros.

A acidogênese é a etapa em que as bactérias formadoras de ácidos, conhecidas por bactérias fermentativas, também produzem hidrogênio e convertem os produtos provenientes da hidrólise em ácidos graxos voláteis, álcoois, gás carbônico, ácido láctico, entre outros (AZEVEDO, 2010).

As bactérias acetogênicas, na etapa acetogênese, utilizam os produtos formados das fases anteriores para produzir hidrogênio, metabolizar ácidos graxos de cadeia longa, ácidos voláteis, acetato, átomos de carbono, grandes compostos neutros, H_2 e CO_2 (MENES, 2007). Estas bactérias possuem a propriedade de viver em simbiose com as bactérias metanogênicas, essas que consomem hidrogênio, fator ideal para a sobrevivência das acetogênicas que só vivem em baixas pressões de hidrogênio (SALMINEN, RINTALA, 2002).

A etapa de metanogênese é a última fase do processo de degradação aeróbia, também é subdividido entre as bactérias acetotróficas e hidrogenotróficas. O primeiro grupo tem a capacidade de produzir metano proveniente da redução de ácido acético, e o segundo grupo produz metano a partir do hidrogênio e do dióxido de carbono (AZEVEDO, 2010). As bactérias, que produzem metano a partir de hidrogênio, têm seu crescimento acelerado em comparação com as que utilizam

ácido acético, assim as metanogênicas acetotróficas normalmente definem a velocidade de transformação de material orgânico complexo (CHERNICHARO, 1997). Um grande volume de metano pode indicar um bom funcionamento no processo de digestão anaeróbia, e também quando os compostos orgânicos são convertidos em precursores imediatos do metano. É necessário que o biorreator anaeróbio seja inoculado com um lodo rico em microrganismos metanogênicos, e de boa qualidade para melhorar o sistema (FORESTI, 1999). Na tabela 2, pode-se analisar o rendimento da produção de metano a partir da digestão anaeróbia de diversos substratos, apresentador por Goulart (2014).

Tabela 2 - Produção de metano a partir da digestão anaeróbia de diversos substratos

Substrato	Produção de CH ₄ (m ³ .kg ⁻¹ SV)	Referência
<i>Ulva</i> sp.	0,16-0,27	Bruhn et al., 2011
Glicerol	0,513	Hutnan et al., 2009
<i>Spirulina</i> sp. LEB 18	0,56	Andrade, 2009
Resíduos de vegetais e frutas	0,383	Gunaseelan, 1997
Resíduos de cenoura	0,417	Gunaseelan, 1997
Resíduos de tomate	0,42	Gunaseelan, 1997
Óleo de peixe	0,6-0,8	Bruhn et al., 2011
Lodo de esgoto	0,243	Labatut et al., 2011
Madeira	0,32	Gunaseelan, 1997
Resíduos de matadouro	0,57	Bruhn et al., 2011
Resíduos municipais	0,43	Gunaseelan, 1997

Fonte: Goulart (2014).

A alternativa com a digestão anaeróbia para o tratamento dos diversos tipos de resíduos com elevadas concentrações de material orgânico é de muita relevância, devido ao menor custo operacional e por substituir os combustíveis fósseis, sendo um dos maiores problemas ambientais atuais com as grandes taxas de emissões de gases poluentes provenientes das indústrias. A digestão anaeróbia, comparada a outros processos de produção de biocombustíveis, é operacionalmente mais simples

e dispensa a secagem e o pré-tratamento químico da matéria-prima, com menor gasto energético e menor geração de resíduos.

2.5 BIOGÁS

A partir da decomposição biológica da matéria orgânica na ausência de oxigênio, pode-se obter o biogás, que é, portanto, produto da digestão anaeróbia, produzindo principalmente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Uma grande vantagem do biogás é a utilização de diferentes tipos de resíduos orgânicos para a obtenção do produto, podem ser utilizados resíduos de animais e vegetais, efluentes industriais, lodo de esgoto, resíduos sólidos, entre outros (NOYOLA et al., 2006). Na Figura 9 é possível ver a usina EnerDinBo, localizada em Ouro Verde do Oeste (PR) que utiliza dejetos da suinocultura para a produção de biogás e conseqüentemente produzir energia elétrica.

Figura 9: Usina híbrida da EnerDinBo, utiliza dejetos da suinocultura para produzir energia elétrica



Fonte: [Biogás e biometano em alta - Editora Brasil Energia](#). Acesso em: 28 de agosto de 2021.

De acordo com WEREKO-BROBBY e GAGEN (2000), a composição do biogás normalmente fica em cerca de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de

uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio.

Segundo DE ABREU (2007), para um menor poder calorífico é necessário uma alta concentração de dióxido de carbono em sua composição, pois se trata de um gás inerte. Para uso veicular pede-se uma baixa concentração de dióxido de carbono, que se recomenda um biogás com 95% de metano, já em motores geradores não é preciso retirar o dióxido de carbono se o biogás demonstrar concentrações de metano acima de 60%.

De forma ilustrativa, GOULART (2014) criou uma tabela comparativa da eficiência energética do biogás e outros combustíveis, descrita no Tabela 3.

Tabela 3 - Comparativo energético do biogás equivalente a outros combustíveis

Combustíveis	1 m³ de biogás equivale a
Gasolina	0,613 L
Querosene	0,579 L
Óleo Diesel	0,553 L
GLP	0,454 L
Lenha	1,536 kG
Álcool hidratado	0,790 L
Eletricidade	1,428 kWh

Fonte: Gaspar (2003), apresentado por GOULART (2014).

Para a obtenção de uma maior produção de biogás, é necessário controlar de forma eficaz a concentração de sólido voláteis, estes representam os sólidos orgânicos presentes na composição, também vai depender das condições ideais do pH, alcalinidade, temperatura e da presença de outros compostos como sulfatos e nitratos (NOYOLA et al., 2006). Outro fator condicionante para uma boa produção de biogás, é o controle dos componentes de carbono e nitrogênio, pois respectivamente, o carbono é utilizado pelas bactérias para obter energia para o funcionamento do metabolismo celular através de carboidratos, enquanto o nitrogênio e nitrato são usados para a construção das estruturas celulares e na síntese proteica através das proteínas (IGONI et al., 2008), esta relação vai variar de acordo com o substrato escolhido (LI, STEPHEN, PARK, 2011), para não haver

um acúmulo de produtos intermediários no digestor que inibem o processo da atividade metanogênica é preciso fazer este controle das concentrações.

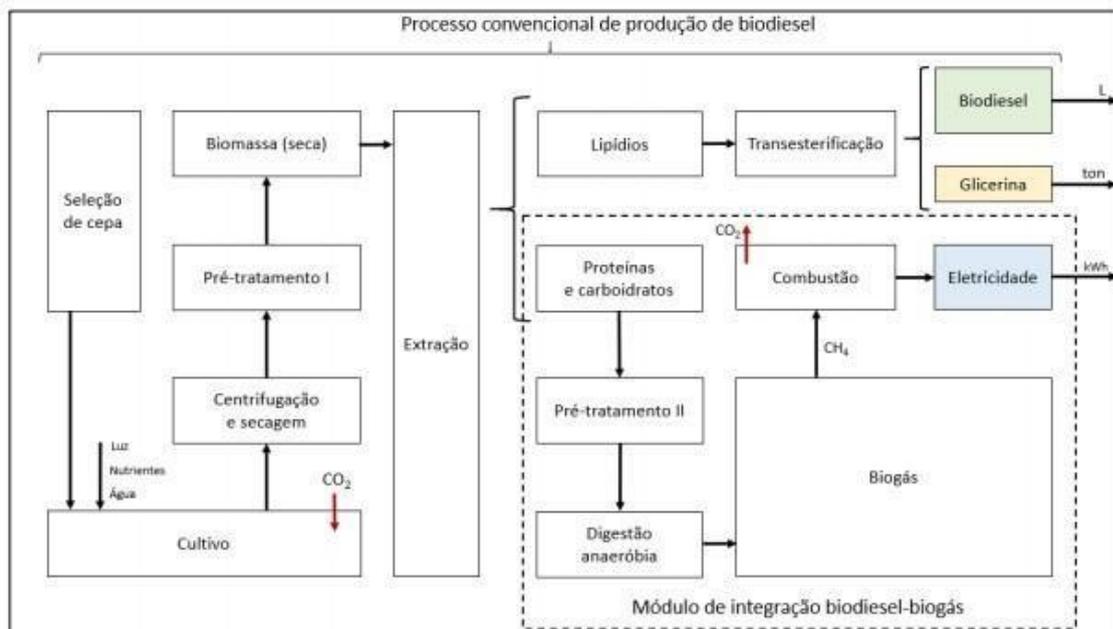
O bioprocesso anaeróbico utilizado para obtenção do biogás é muito usado para o tratamento de resíduos agroindustriais, um fator bem relevante para questões ambientais sendo um efluente produzido em larga escala que precisa de destinação. Comparado a outros biocombustíveis, o biogás apresenta a vantagem de poder ser produzido através de processamento biológico de toda a fração orgânica da biomassa microalgal (Cooney et al., 2007).

2.6 BIODIESEL X BIOGÁS

Os processos de biocombustíveis, biodiesel e biogás, podem ser correlacionados para que ambos os processos possam realizar simultaneamente, isso acontece pois o glicerol produto resultante do processo de produção do biodiesel constitui um subproduto que pode ser aproveitado para a produção de biogás, devido ao seu alto teor de carbono facilmente degradável (AMON et al., 2006), também assimilável por bactérias e leveduras sob condições anaeróbias.

A partir de um desenho esquemático realizado por OLIVEIRA (2021), pode-se observar um processo integrado entre biodiesel e biogás na Figura 10, experimento realizado pelo mesmo. O CO₂ em vermelho, é gerado na combustão do metano e transportado para o cultivo, o pré-tratamento I é a ruptura celular para a extração de lipídios e o pré-tratamento II é a preparação das frações de proteínas e carboidratos para a digestão anaeróbia.

Figura 10 - Processo integrado biodiesel - biogás



Fonte: OLIVEIRA (2021).

Como citado anteriormente, o carbono é de extrema importância para o processo de biogás, de acordo com Robra et al. (2010), uma possível alternativa para o uso do glicerol seria introduzi-lo na geração de biogás pois apresenta um nível de carbono ideal para a realização dos processos anaeróbios, apenas carecendo da composição certa do nitrogênio. Segundo Amon et al. (2004), o glicerol tem potencial para melhorar o desempenho da produção de biogás, pois é constituído por mais de 20% de metanol, tornando-se um meio de cultura alternativo para certas bactérias metanogênicas. Para o processo de digestão anaeróbia, estas vantagens tornam o glicerol um co-substrato em potencial.

3

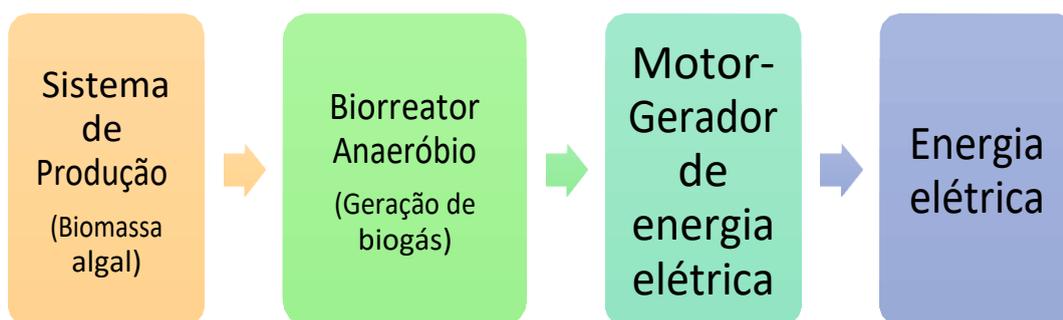
METODOLOGIA

A metodologia empregada no presente estudo, utilizou as bases de informações de artigos científicos para realizar um cenário de utilização da biomassa algal até a geração de energia elétrica. Foi realizado uma estimativa de cenário, que utilizou de base os estudos do Adriano Seizi Arruda Henrard (2013) que demonstrou a produtividade de geração de metano a partir da biomassa da microalga *Spirulina* sp. LEB-18 e a produção de biogás, e para a estimativa de geração de energia

elétrica a partir do biogás foi utilizado o artigo de Franco M. Martins e Paulo A. V. de Oliveira (2011).

Para ilustrar o cenário criado presente neste trabalho foi realizado um fluxograma simples, em que o sistema de produção gera biomassa a partir das microalgas, seguindo para o biorreator anaeróbico que transforma a biomassa em metano que é utilizado como combustível substituto da gasolina no motor que impulsiona o gerador gerando energia elétrica, o fluxograma apresentado na figura 11 foi uma adaptação do fluxograma apresentado por MARTINS et al. (2011).

Figura 11: Fluxograma de produção de biogás para geração de energia elétrica



Fonte: Autora, 2021

3.1 Produtividade de metano a partir da biomassa da microalga *Spirulina* sp. LEB-18 e a produção de biogás

De acordo com HENRARD (2013), o estudo realizado utilizou uma mista cultura de microrganismos anaeróbios vindas de um reator anaeróbico. Foi necessário a adaptação do inóculo para a utilização da biomassa microalgal da *Spirulina* sp. LEB-18, com temperatura de 29°C até encontrar o equilíbrio de concentrações necessárias para a produção de biogás, a digestão anaeróbica de microalgas ressalta um aspecto positivo para a produção de biogás, pois apresenta uma alta concentração de metano de 60 a 70% e baixas concentrações de enxofre quando comparado a outros gases de outros substratos (SIALVE et al., 2009). Então, foi utilizado o substrato da biomassa da microalga *Spirulina* sp. LEB-18

cultivada e colhida para a alimentação do biorreator que gerou o biogás (HENRARD, 2013). Um aspecto positivo da utilização da biomassa microalgal, foi poder reaproveitar o meio de cultivo restante após a filtração para retornar ao biorreator e ser inserido novamente no início do processo.

Foram medidas as concentrações do teor de proteína, umidade, carboidratos, cinzas e lipídeos da composição da biomassa de *Spirulina* sp. LEB-18. A tabela 4 realizada por HENRARD (2013) apresenta a composição centesimal da biomassa de *Spirulina* sp. LEB-18 que foi utilizada como substrato para a produção de biogás.

Tabela 4: Composição centesimal da biomassa de *Spirulina* sp. LEB-18 utilizada como substrato para produção de biogás

Componente	Concentração % (p/p)
Proteínas	60,4 ± 1,3
Carboidratos	22,2 ± 1,8
Lipídios	10,4 ± 0,8
Cinzas	7,0 ± 0,9

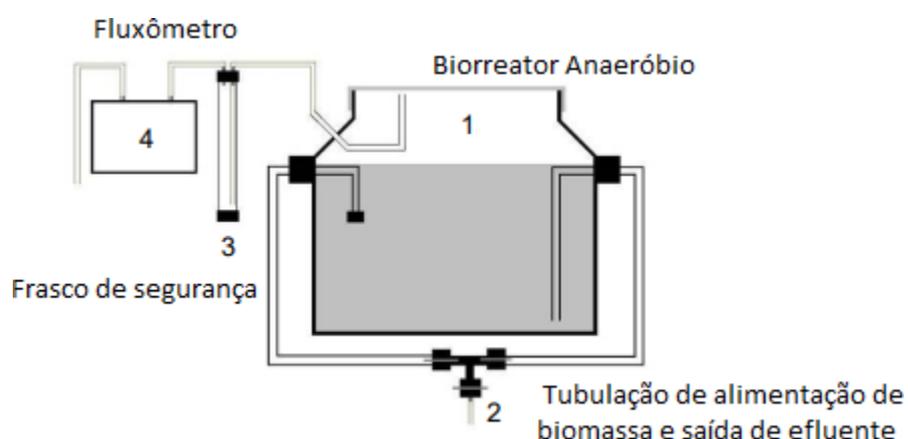
Fonte: Adriano Seizi Arruda Henrard (2013)

Os estudos apresentados por HENRARD (2013) teve um comparativo entre os resultados de biorreatores de escala piloto e biorreatores em escala de bancada, para o cenário estimativo presente neste trabalho apenas os resultados de biorreatores de escala piloto (outdoor) sem controle de temperatura foram utilizados, dando enfoque no Ensaio 1 que foram realizados nos meses de janeiro e fevereiro em que as temperaturas do meio líquido variam de 26 a 38 graus.

Para a produção de biogás a partir da biomassa microalgal foi utilizado a operação em batelada com ciclos diários de alimentação da biomassa de *Spirulina* sp. LEB-18, 7,0 g.L⁻¹. No efluente dos biorreatores foram observados os parâmetros como alcalinidade, pH, sólidos totais e voláteis, e diariamente era medido por um fluxômetro (G0,6, LAO, Brasil) o volume de biogás produzido, também foi realizado o acompanhamento da composição

do gás (metano, ácido sulfídrico, hidrogênio e dióxido de carbono) pelo cromatografia gasosa (GC CP3800 Varian, NDL). A figura 8 mostra o equipamento experimental utilizado para a produção de biogás a partir da microalga *Spirulina* sp. LEB-18 e seus repartimentos.

Figura 12: Equipamento experimental



Fonte: HENRARD (2013) adaptada pela autora

Foi necessário calcular, através do balanço de massa de sólidos, a decomposição da biomassa de *Spirulina* sp. LEB-18 alimentada (XT) sobre a decomposição da fração orgânica da biomassa (X_{org}), levando em conta a entrada e a saída de biomassa nos biorreatores.

Para calcular a produção específica de biogás (P_E , m^3) foi necessário determinar o volume de biogás produzido ($V_{gás}$, m^3) por dia entre o volume útil do biorreator ($V_{biorreator}$, m^3), seguindo o modelo da Equação 1:

$$P_E = \frac{V_{gás}}{V_{biorreator}} \quad \text{Equação (1)}$$

A produtividade da geração de metano foi calculada pela fração orgânica da biomassa ($Y_{CH_4/Org}$), foi necessário determinar a massa de metano produzido (m_{CH_4} , g) entre a massa da fração orgânica da biomassa decomposta (m_{Org} , g), seguindo o modelo da Equação 2:

$$Y_{\frac{CH_4}{Org}} = \frac{m_{CH_4}}{m_{Org}} \quad \text{Equação (2)}$$

3.2 Estimativa da geração de energia elétrica a partir do biogás gerado

Foi utilizado de base o artigo de Franco M. Martins e Paulo A. V. de Oliveira (2011) para fazer a estimativa da geração de energia elétrica a partir do biogás, foi realizado o estudo em relação a dejetos de suínos e sua produção de biogás, no presente trabalho foram utilizados os dados a partir do quantitativo do biogás seguindo para o conjunto motor-gerador ideal que consegue gerar energia elétrica de acordo com vários parâmetros.

No cenário criado, a partir da produção do biogás, ele foi transportado do biorreator anaeróbio para o conjunto motor-gerador por tubulações adaptadas que conseguem remover a umidade que se desenvolve na produção da digestão anaeróbia, outro fator relevante é o alto efeito corrosivo do ácido sulfídrico que também se desenvolve na digestão anaeróbia, para evitar isso é recomendado filtros de limalha de ferro no processo. Foi utilizado o gerador de eletricidade trifásico (220/380 VAC), 3600 rpm, 60 Hz com capacidade de 50 kVA, ligado ao Motor VOLKSWAGEN, AP200-4 cilindros, adaptado para receber o biogás e com trocador de calor que refrigera e aproveita a água do motor para geração de água quente.

Para conseguir estimar um cenário realista e viável, foi preciso calcular a demanda de biogás em função do período de geração de energia e a quantidade necessária de biomassa algal para fornecer o volume da biomassa requerido na alimentação do biorreator. Foi necessário fazer uma adaptação dos cálculos de MARTINS et al. (2011) para encaixar nos dados obtidos anteriormente da produção de biogás a partir da biomassa algal.

Para a demanda de biogás necessária foi estimado através da Equação 3:

$$D_{\text{bio}} = C_m t_g$$

Equação (3)

D_{bio} - quantidade de biogás a ser produzida pelo biorreator, $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$;

C_m - consumo médio de biogás do motor-gerador, $\text{m}^3 \text{ hora}^{-1}$, e

t_g - período de geração, horas dia^{-1} .

Para estimar o volume do biorreator foi utilizado a Equação 4:

$$V_{\text{bio}} = \frac{1}{k} D_{\text{bio}}$$

Equação (4)

sendo,

V_{bio} - volume de biomassa no biodigestor, m^3 , e

k - índice de eficiência de produção de biogás no biodigestor, $\text{m}^3 \text{ biogás m}^3 \text{ biomassa}^{-1}$.

Para o melhor entendimento dos cálculos, ao relacionarmos as equações (1) e (3) dos dois artigos de base distintos, temos que:

$$V_{\text{gás}} = D_{\text{bio}}$$

Onde, ambos se referem ao volume de biogás a ser produzido pelo biorreator por dia, a partir daqui adotou-se o $V_{\text{gás}}$.

E ainda, relacionando incógnitas das equações (1) e (4) citadas acima, temos que:

$$V_{\text{biorreator}} = V_{\text{bio}}$$

Ambos se referem ao volume de biomassa no biorreator, adotou-se o V_{bio} .

Para determinar a quantidade de biogás necessária produzida pelo biorreator ($V_{gás}$) foi preciso saber a demanda do conjunto motor-gerador. Entre as variações do consumo do gerador (C_m) (DE OLIVEIRA, 2006), adotou-se a demanda de $25 \text{ m}^3 \text{ hora}^{-1}$, com uma margem de segurança para o equipamento na operação. Ainda segundo OLIVEIRA & HIGARASHI (2006), há variações do índice de eficiência de produção de biogás (k) entre $0,35$ a $0,60 \text{ m}^3 \text{ biogás m}^3 \text{ biomassa}^{-1}$. Adotou-se o valor de $0,40 \text{ m}^3 \text{ biogás m}^3 \text{ biomassa}^{-1}$ em um Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) de 30 dias. Calculou-se a quantidade necessária de biomassa microalgal para iniciar a operação com base no artigo de MARTINS et al. (2011), afim de determinar o volume de biogás demandado para a realização de todo o processo.

Determinando todos os parâmetros foi possível calcular o volume do biorreator necessário, assim relacionar período diário (t_g) em que o conjunto motor-gerador gera energia, a produção de biogás e o volume de biomassa.

3.3 Relação produção de biogás e geração de energia elétrica

Foi utilizado o parâmetro de Goulart (2014), mostrado na tabela 2, em que foi exposto que 1 m^3 de biogás refere-se a $1,428 \text{ kWh}$. Assim, pode-se calcular de forma simples quanto de energia é gerado em todo processo.

Por fim, para a obtenção de resultado de quantas casas e pessoas seriam beneficiadas com a geração de energia elétrica fornecida pelo cenário criado, foi utilizado a tarifa do mês de novembro de 2021 da Companhia Energética de Minas Gerais S.A. (CEMIG). Em uma casa com em média quatro pessoas ficou em torno de 218 o consumo kWh mensal.

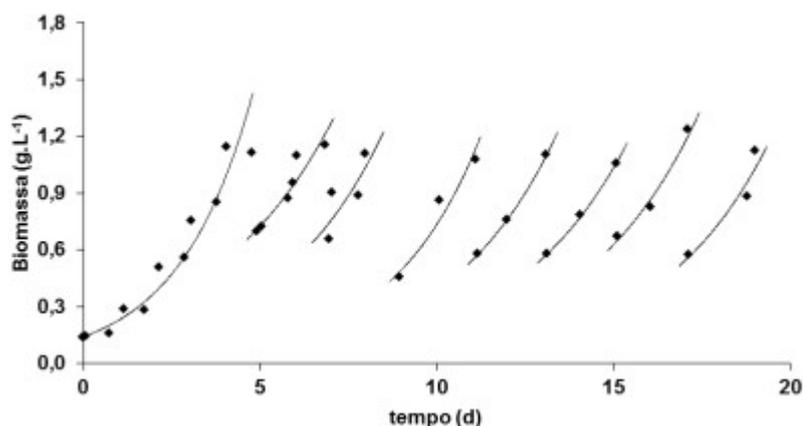
4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho relacionou artigos e trabalhos científicos com base nas equações anteriormente apresentadas, utilizando o valor de produção específica de biogás exposta por HENRARD (2013), foi de $0,27 \text{ m}^3$. A *Spirulina* sp. LEB-18 pode sofrer variações de crescimento dependendo do meio de cultivo, neste estudo foi cultivado em meio Zarrouk contendo $2,8 \text{ g.L}^{-1}$ de bicarbonato e obteve concentração

de $0,145 \text{ g.L}^{-1}$, na figura X pode-se observar as concentrações de biomassa com o passar dos dias.

Figura 13: Concentração da biomassa da microalga *Spirulina* sp. LEB-18



Fonte: HENRARD (2013)

Como citado anteriormente, adotou-se o valor de consumo médio de biogás do motor-gerador de $25 \text{ m}^3 \text{ hora}^{-1}$, relacionando com o período de geração pode-se então calcular o volume de biogás a ser produzido pelo biorreator diariamente. Foi utilizado os valores do período de geração do motor-gerador de acordo com o tempo em que ele poderia ficar funcionando 8, 12, 16, 20 e 24 horas dia^{-1} . Então se o período foi de 8 horas dia^{-1} para a produção de $200 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$, sendo 12 horas dia^{-1} a produção de biogás seria de $300 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$, 16 horas dia^{-1} produziria $400 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$, 20 horas dia^{-1} forneceria $500 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ e 24 horas dia^{-1} no período de geração teria a produção de $600 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$, assim como foi relacionado na tabela 5 a seguir:

Tabela 5: Parâmetros relacionados a geração e produção de biogás por dia

Parâmetros relacionados	
Período de Geração (tg) horas dia ⁻¹	Produção de biogás (Vgás) m ³ dia ⁻¹
8	200
12	300
16	400
20	500
24	600

Fonte: Autora, 2021

Relacionando os parâmetros das Equações (1) e (3) com o valor de produção específica de biogás de 0,27 m³, temos o volume de biomassa (Vbio) em m³ da microalga *Spirulina* sp. LEB-18 necessários para o funcionamento do processo, sendo o volume de biogás a ser produzido pelo biorreator (Vgás) de 200 m³d⁻¹ o volume necessário de biomassa (Vbio) em m³ seria de 740,74 m³, para 300 m³d⁻¹ seria necessário 1111,11 m³ de biomassa para o funcionamento de toda a operação, assim os resultados foram calculados e mostrados na tabela 6 a seguir:

Tabela 6: Produção de biogás e volume de biomassa por dia/m³

Parâmetros relacionados	
Produção de biogás (Vgás) m ³ dia ⁻¹	Volume de biomassa (Vbio) m ³
200	740,74
300	1111,11
400	1481,48
500	1851,85
600	2222,22

Fonte: Autora, 2021

A partir de todos os parâmetros com valores definidos, o período de geração do motor-gerador, a produção de biogás e o volume de biomassa necessário foi possível relacioná-los de forma sucinta como mostra a tabela 7, essa tabela foi

adaptada com os valores associados, porém é uma adaptação da que foi apresentada por MARTINS et al. (2011).

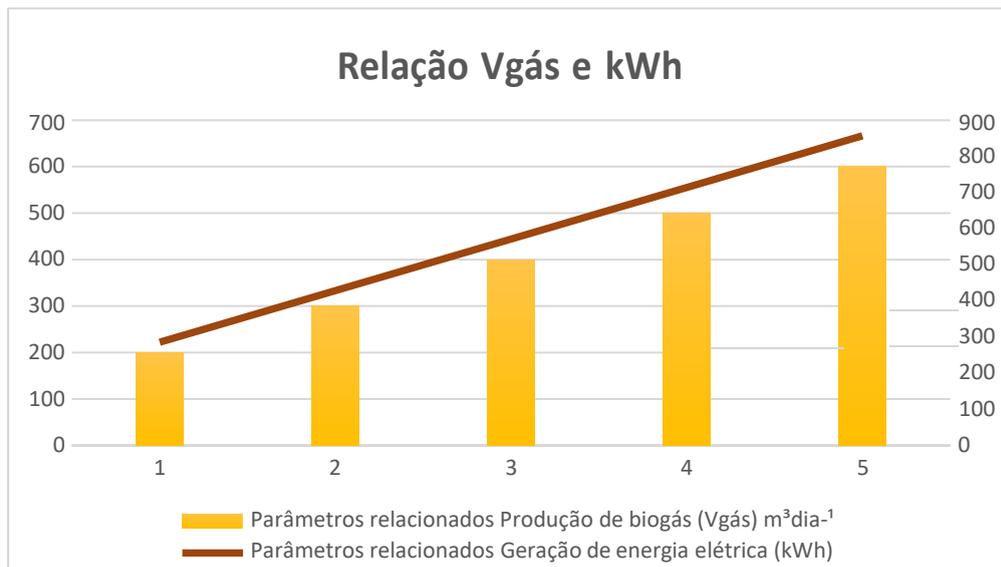
Tabela 7: Parâmetros: período de geração, produção de biogás e volume de biomassa

Parâmetros relacionados		
Período de Geração (tg) horas dia ⁻¹	Produção de biogás (Vgás) m ³ dia ⁻¹	Volume de biomassa (Vbio) m ³
8	200	740,74
12	300	1111,11
16	400	1481,48
20	500	1851,85
24	600	2222,22

Fonte: Autora, 2021

De acordo com HENRARD (2013), foi calculada a produção específica de metano a partir da quantidade de biomassa da microalga *Spirulina* sp. LEB-18 encontrada, exposta a temperaturas variantes entre 26 a 38 graus nos meses de janeiro e fevereiro, foi de 0,27 m³ no alto da produtividade chegando a quase 100% da biomassa, resultados melhores dos que foram encontrados por Ras et al. (2011) na digestão anaeróbia de biomassa da microalga *Chlorella vulgaris* de 0,17 m³ e os encontrados por Yen e Brune (2007) da biomassa da microalga *Scenedesmus* sp. para produzirem biogás de forma anaeróbia que foi de 0,14 m³.

Outra relação importante a ser destacada é a que relaciona a demanda de biogás com a geração de energia elétrica a partir desse processo, de acordo com GOULART (2014) na tabela 2 apresentada na revisão bibliográfica, 1 m³ de biogás equivale a 1,428 kWh, com essa relação pode-se calcular a partir da produção de biogás quanto de energia elétrica foi gerado. Para um produção de biogás de 200 m³dia⁻¹ foi calculado uma geração de energia elétrica de 285,6 kWh, para 300 m³dia⁻¹ seria gerado 428,4 kWh, para 400 m³dia⁻¹ seria gerado de energia elétrica 571,2 kWh, em uma produção de biogás de 500 m³dia⁻¹ seria gerado 714 kWh e por fim, para 600 m³dia⁻¹ de biogás seria gerado 856,8 kWh. Com isso, de forma lúdica pode-se obter o gráfico a seguir:



Fonte: Autora, 2021

Pode-se analisar, que existe vantagem em questão de produção de energia elétrica a partir de biogás, sendo essa vantagem um crescimento linear em relação a produção de biogás e geração de energia elétrica, quanto maior o crescimento da produção de biogás, conseqüentemente maior a geração de energia elétrica. Porém, para se obter esse resultado é necessário uma grande quantidade de biomassa algal que, como visto anteriormente, também demanda um enorme espaço outdoor para grandes produções de biomassa.

Um aspecto relevante a ser considerado, é a quantidade de produção de metano a partir da biomassa da microalga *Spirulina* sp. LEB-18, mostrou-se muito eficaz chegando a quase 100% da composição da biomassa em sua alta produtividade de outdoor, isso mostra um biogás limpo e em ótimas condições de uso, ou seja, menos poluentes sendo despejados na atmosfera. Também é preciso ressaltar a vantagem que apresentou a microalga *Spirulina* sp. LEB-18 em relação a biomassa de outras microalgas como a *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus* sp. expostas por outros autores anteriormente, sendo necessário observar as condições e o local em que foram inseridas essas microalgas nos estudos passados.

Embora seja possível comercializar a energia extra fornecida, seria necessário estudos e cálculos mais precisos para viabilizar tal custo. No entanto, a propriedade em que seria instalado essa operação poderia substituir ou reduzir significativamente a aquisição da energia elétrica distribuída pelas redes de transmissão públicas ou privadas, dependendo da cidade. Os equipamentos e toda

a estrutura necessária para criar o cenário no presente trabalho, também deveria ser estudado economicamente, pois grandes instalações necessitam de uma quantidade de energia, dependendo do valor gerado os investimentos na geração com o uso do biogás poderia ser justificado.

Relacionando a maior produtividade da produção de biogás de $600 \text{ m}^3/\text{dia}^{-1}$ de biogás gerando 856,8 kWh de energia elétrica por dia com a tarifa do mês de novembro da Companhia Energética de Minas Gerais S.A. (CEMIG) que ficou por volta de 218 kWh mensais, por mês o cenário criado gera 25704 kWh mensais, então utilizando a tarifa do mês obtivesse o resultado de 117 casas ou apartamentos com aproximadamente 4 pessoas em cada uma, fornecendo energia então para 468 pessoas mensalmente. Um resultado que destaca uma eficácia no projeto, porém demonstra que poderia ser melhor aproveitado em pequenas vilas, ou para projetos de produção industrial de pequena escala, ou para a agropecuária de pequeno porte que não demanda tanta energia e mantém a produção ativa.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho, conseguiu alcançar o objetivo geral de abordar um cenário estimativo que relaciona a produção de biogás a partir da biomassa da microalga *Spirulina* sp. LEB-18 e a geração de energia elétrica, utilizando referências bibliográficas para os cálculos e estimando valores próximos da realidade. Foi de relevância para os cálculos os resultados obtidos em biorreatores de escala piloto (outdoor), que apesar de ter um bom resultado depende de grandes espaços para a sua instalação, outro fator importante é que em modelos Raceways as condições climáticas são fundamentais para guiar o rendimento da biomassa, conseqüentemente de todo o processo.

A partir da revisão bibliográfica realizada, fica claro que a utilização da biomassa das microalgas como fonte de biogás é promissora, sendo uma alternativa para a redução de combustíveis fósseis e uma forma de utilizar o gás carbônico minimizando as emissões deste gás na atmosfera. As microalgas apresentam alta taxa de crescimento celular em condições ideais, além de ter alta capacidade de biofixação do CO₂, tendo então grandes vantagens para o contínuo avanço destes estudos. Porém, com custos altos nos processos e pouco incentivo do governo, a utilização das microalgas ainda apresenta estudos reduzidos e pouca aplicação em grande escala, sendo mais explorados por empresas privadas com disponibilidade econômica de investir.

Para a síntese de biogás, foi apresentado a produção de metano a partir de biomassa de microalgas, ressaltando o controle das condições necessárias nos biorreatores como pH, temperatura, densidade, entre outros. A digestão anaeróbia para produzir metano, quando comparada a outros processos de produção de biocombustíveis é operacionalmente mais simples e dispensa a secagem e o pré-tratamento químico da matéria-prima, tendo menor gasto energético e menor geração de resíduos. Para um bom rendimento na produção de biometano é necessário substratos com elevado valor de lipídios, alto grau de biodegradabilidade e baixo teor de células lignocelulósicas. Além disso, a digestão anaeróbia ainda apresenta uma fonte de nutrientes ideais para melhorar os efeitos sinérgicos sobre microrganismos e aumentar a produção de biogás.

Em relação a geração de energia elétrica a partir do biogás, é necessário ressaltar a importância da biomassa de microalgas para um bom rendimento que vá conseguir atender futuras famílias com essa energia, ou então uma boa estrutura que consiga suprir necessidades de indústrias e da agropecuária. Fica claro que, a utilização de diferentes tipos de resíduos como fonte de substrato para a geração de biogás se bem estudado é uma vantagem econômica, também um fator de segurança energética por diminuir a demanda e ainda diminuir significativamente a poluição causada, além de poder utilizar o excedente do processo como biofertilizante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, R., LIDÉN, G. Low temperature anaerobic digestion of mixtures of llama, cow and sheep manure for improved methane production. *Biomass and Bioenergy*. v. 33, p. 527-533, 2009.

ANDRADE, M. R.; COSTA, J. A. V. Cultivo da microalga *Spirulina platensis* em fontes alternativas de nutrientes. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 32, n. 5, p. 1551-1556, 2008.

AMON, T.; AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; BODIROZA, V.; PÖTSCH, E.; ZOLIITSCH, W. Optimizing methane yield from anaerobic digestion of manure: Effect of dairy system and of glycerin supplementation. *International Congress Series*. v. 1293, p. 217-220, 2006.

AMON, T., KRYVORUCHKO, V., AMON, B., SCHREINER, M. Untersuchungen zur Wirkung von Rohglycerin aus der Biodieselerzeugung als leistungssteigerndes Zusatzmittel zur Biogaserzeugung aus Silomais, Körnermais, Rapspresskuchen und Schweinegülle. SEEG: Mureck, Austria, 2004.

AZEVEDO et al., Garret; Flávia; de Los Angeles Perez Fernandez Palha, Maria. Estudos das condições ambientais para a produção de biogás a partir de glicerol co-produto do biodiesel. 2010. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

BANERJEE, Anirban; CHISTI, Yusuf; BANERJEE, U. C. Streptokinase—a clinically useful thrombolytic agent. *Biotechnology advances*, v. 22, n. 4, p. 287-307, 2004.

BOONAERT, C. J. P. et al. Cell separation, Flocculation: *Encyclopedia of Bioprocess Technology*. In: FLICKINGER, M. C.; DREW, S. W. (Ed). *Fermentation, Biocatalysis and Bioseparation*. John Wiley & Sons, Inc., 1999. vol. 1, 531–547

BORGHETTI, A. I. Avaliação do crescimento da microalga *Chlorella minutissima* em meio de cultura com diferentes concentrações de manipueira. 2009. Dissertação (Mestrado em Processos Biotecnológicos) – Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2009.

BOROWITZKA, Michael A. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of biotechnology*, v. 70, n. 1-3, p. 313-321, 1999.

BOROWITZKA, Michael A.; MOHEIMANI, Navid R. (Ed.). *Algae for biofuels and energy*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2013.

BRENNAN, Liam; OWENDE, Philip. Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 14, n. 2, p. 557-577, 2010.

CAMMAROTA, M. C. Avaliação de um biorreator fúngico para remoção de cor do efluente de branqueamento de polpa kraft. Rio de Janeiro, UFRJ: Escola de Engenharia Química. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, 1991.

CARVALHO, Yasmin Oliveira. Estudo do cultivo da biomassa de *Chlorella vulgaris* e aplicação em tratamento de efluentes com biorreator em escala piloto. 2017.

CHERNICHARO, C, A, L. Reatores anaeróbios. Série: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 5ª Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária – UFMG, v. 5, p. 245, 1997.

CHEW, Justin et al. High protein copy number is required to suppress stochasticity in the cyanobacterial circadian clock. *Nature communications*, v. 9, n. 1, p. 1-10, 2018.

CHISTI, M.Y. *Airlift Bioreactors*. Elsevier Applied Sciences, London, 345p., 1989.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, v. 25, n. 3, p. 294–306, 1 maio 2004.

COLLA, L. M., Augusto-Ruiz, W., & Costa, J. A. V. (2008). Metabolismo de carbono e nitrogênio em microalgas. *VETOR - Revista De Ciências Exatas E Engenharias*, 12(1), 61–78, 2008.

COONEY, M.; MAYNARD, N.; CANNIZZARO, C.; BENEMANN, J. Two-phase anaerobic digestion for production of hydrogen-methane mixtures. *Bioresource Technology*, v. 98, p. 2641–2651, 2007.

COSTA, J. A. V., SANTANA, F. B., ANDRADE, M. R., LIMA, M. B., FRANCK, D. T. Microalga biomass and biomethane production in the South of Brazil. *Journal of Biotechnology*. v. 4, p. 73, 2008.

DANESHVAR, Ehsan et al. Insights into upstream processing of microalgae: A review. *Bioresource Technology*, p. 124870, 2021.

DARZINS, Al; PIENKOS, Philip; EDYE, Les. Current status and potential for algal biofuels production. A report to IEA Bioenergy Task, v. 39, n. 13, p. 403-412, 2010.

DA PONTE, Deusa Angelica Mota Portela. Performance de um fotobiorreator opaco com distribuição de filhas ópticas plásticas para iluminação interna. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DA SILVA, Felipe Pereira et al. POLIPROPILENO VERDE A PARTIR DO GLICEROL: ESTUDO DE MERCADO E INSTALAÇÃO DE UMA PLANTA NO BRASIL. *Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia-ISSN: 1984-5693*, v. 11, 2019.

DE ABREU, Érika Ferreira. Estudo de diversidade microbiana metanogênica em reatores UASB tratando esgoto sanitário. Tese Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2007.

DE OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, Martha Mayumi. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos. Embrapa Suínos e Aves-Documents (INFOTECA-E), 2006.

DERNER, Roberto Bianchini. Efeito de fontes de carbono no crescimento e na composição bioquímica das microalgas *Chaetoceros muelleri* e *Thalassiosira fluviatilis*, com ênfase no teor de ácidos graxos poliinsaturados. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias, Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Carina, Florianópolis, 2006.

EROGLU, Ela; MELIS, Anastasios. Extracellular terpenoid hydrocarbon extraction and quantitation from the green microalgae *Botryococcus braunii* var. Showa. *Bioresource technology*, v. 101, n. 7, p. 2359-2366, 2010.

FORESTI, Roberta; MOTTERLINI, Roberto. The heme oxygenase pathway and its interaction with nitric oxide in the control of cellular homeostasis. *Free radical research*, v. 31, n. 6, p. 459-475, 1999.

FORTES, Mariana Monteiro. *Fotobiorreatores para o Cultivo de Microalgas Destinadas à Produção de Biodiesel*. Rio de Janeiro, 2015. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

GEORGE, E.F. *Plant propagation by tissue culture* London: The technology Exegetics, 574p., 1993.

GIORDANO, Mario; BEARDALL, John; RAVEN, John A. CO₂ concentrating mechanisms in algae: mechanisms, environmental modulation, and evolution. *Annu. Rev. Plant Biol.*, v. 56, p. 99-131, 2005.

GONÇALVES, Ricardo Franci; ARAÚJO, Vera L.; CHERNICHARO, Carlos A. Tratamento secundário de esgoto sanitário através da associação em série de reatores UASB e biofiltros aerados submersos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 1997. p. 450-61.

GOULARTE, Pâmela Guder. *Produção de biogás a partir da co-digestão de resíduos da geração de energia*. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos - Escola de Química e Alimentos – EQA, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande, 2014.

GUDIN, Claude; CHAUMONT, Daniel. Cell fragility—the key problem of microalgae mass production in closed photobioreactors. *Bioresource technology*, v. 38, n. 2-3, p. 145-151, 1991.

GUDIN C., THERPENIER C.. Bioconversion of solar energy into organic chemicals by microalgae. *Adv. Biotechnol. Processes*, pp. 73-110, 1986.

GUIMARÃES, Luís Pedro Costa. *Projeto e construção de um fotobiorreator para crescimento acelerado de microalgas*. 2012. Tese de Doutorado.

HENRARD, Adriano A. et al. Produção de Biogás a partir de biomassa microalgal. In: III Congresso Brasileiro de Carvão. Gramado, RS. 2011.

HUANG, Ye-Chuan et al. Study on the flavor contribution of phospholipids and triglycerides to pork. *Food Science and Biotechnology*, v. 19, n. 5, p. 1267-1276, 2010.

HUNTLEY, Mark E.; REDALJE, Donald G. CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, v. 12, n. 4, p. 573-608, 2007.

HENRARD, Adriano A. et al. Produção de Biogás a partir de biomassa microalgal. In: III Congresso Brasileiro de Carvão. Gramado, RS. 2011.

HENRARD, Adriano Seizi Arruda et al. Produção e purificação de biogás utilizando microalga spirulina sp. LEB-18. 2013.

IGONI, A. Hilkih et al. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Applied energy*, v. 85, n. 6, p. 430-438, 2008.

KIM, H.-W., NAM, J.-Y., SHIN, H.-S. A comparison study on the high-rate co-digestion of sewage sludge and food waste using a temperature-phased anaerobic sequencing batch reactor system. *Bioresource Technology*. v. 102, p. 7272-7279, 2011.

KIRNEV, P. C. S. et al. Technological mapping and trends in photobioreactors for the production of microalgae. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 36, n. 3, p. 1-9, 2020.

KLEIN, Bruno Colling; BONOMI, Antonio; MACIEL FILHO, Rubens. Integration of microalgae production with industrial biofuel facilities: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 1376-1392, 2018.

KOYANDE, Apurav Krishna et al. Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans. *Food Science and Human Wellness*, v. 8, n. 1, p. 16-24, 2019.

LABATUT, Rodrigo A.; ANGENENT, Lergus T.; SCOTT, Norman R. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresource technology*, v. 102, n. 3, p. 2255-2264, 2011.

LEMOS, Eurico Eduardo Pinto de et al. Micropropagação de clones de banana cv. Terra em biorreator de imersão temporária. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 23, p. 482-487, 2001.

LEMOS, Israel Silva. Avaliação do potencial metanogênico em reatores em batelada tratando esgoto sintético em diferentes condições: biomassa de crescimento disperso e aderido. 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado em Recursos hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

LEVASSEUR, Wendie; PERRÉ, Patrick; POZZOBON, Victor. A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification. *Biotechnology advances*, v. 41, p. 107545, 2020.

LI, Yebo; PARK, Stephen Y.; ZHU, Jiyang. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 15, n. 1, p. 821-826, 2011.

MACKAY, Charles R. Chemokine receptors and T cell chemotaxis. *The Journal of experimental medicine*, v. 184, n. 3, p. 799-802, 1996.

MADIGAN, M. T. et al. *Microbiologia de Brock*. 12. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

MARTINS, Franco M.; DE OLIVEIRA, Paulo AV. Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás na suinocultura. *Engenharia Agrícola*, v. 31, p. 477-486, 2011.

MATA-ALVAREZ, Joan et al. Codigestion of solid wastes: a review of its uses and perspectives including modeling. *Critical reviews in biotechnology*, v. 31, n. 2, p. 99-111, 2011.

MENES, R. J. *Microbiología, Ecología y Bioquímica*. In: SCHMIDELL, W. et al. *Tratamento biológico de águas residuais*. Florianópolis: Paper Print, 2007.

MOHAN, Manu K. et al. Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Composites*, v. 115, p. 103855, 2021.

MULITERNO, Adriana et al. Cultivo mixotrófico da microalga *Spirulina platensis* em batelada alimentada. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 29, n. 6, p. 1132-1138, 2005.

MYERS, Jack; GRAHAM, Jo-Ruth. On the mass culture of algae. II. Yield as a function of cell concentration under continuous sunlight irradiance. *Plant physiology*, v. 34, n. 3, p. 345, 1959.

NARALA, Rakesh R. et al. Comparison of microalgae cultivation in photobioreactor, open raceway pond, and a two-stage hybrid system. *Frontiers in Energy Research*, v. 4, p. 29, 2016.

NOYOLA, Adalberto; MORGAN-SAGASTUME, Juan Manuel; LOPEZ-HERNANDEZ, Jorge E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. *Reviews in environmental science and bio/technology*, v. 5, n. 1, p. 93-114, 2006.

OH, Hee-Mock et al. Harvesting of *Chlorella vulgaris* using a bioflocculant from *Paenibacillus* sp. AM49. *Biotechnology Letters*, v. 23, n. 15, p. 1229-1234, 2001.

OLIVEIRA, Bruno Alves de. Avaliação econômica da produção simultânea de biodiesel e biogás a partir da biomassa de microalgas. 2021.

PEGALLAPATI, Ambica Koushik; NIRMALAKHANDAN, Nagamany. Internally illuminated photobioreactor for algal cultivation under carbon dioxide-supplementation: Performance evaluation. *Renewable energy*, v. 56, p. 129-135, 2013.

PRATI, LISANDRO. Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores. Monografia do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, v. 14, p. 15, 2010.

REIS, Jose et al. Innovative Approach for Requirements Verification of Closed Systems. In: *Embedded Real Time Software and Systems (ERTS2014)*. 2014.

RIBEIRO, Rita Flavia Laurenti. Avaliação de tortas de oleaginosas com potencial para produção de biodiesel na obtenção de materiais adsorventes para remoção de metais em meio aquoso. 2012.

RICHMOND, Amos. Principles for attaining maximal microalgal productivity in photobioreactors: an overview. *Asian pacific phycology in the 21st Century: Prospects and challenges*, p. 33-37, 2004.

ROBRA, S. et al. Generation of biogas using crude glycerin from biodiesel production as a supplement to cattle slurry. *Biomass and Bioenergy*, v. 34, n. 9, p. 1330-1335, 2010.

ROSSI, G. The design of bioreactors. *Hydrometallurgy*, v. 59, n. 2-3, p. 217-231, 2001.

RODOLFI, Liliana et al. Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. *Biotechnology and bioengineering*, v. 102, n. 1, p. 100-112, 2009.

RODRIGUES, Caroline Varella. Codigestão anaeróbia do glicerol bruto em resíduos orgânicos agroindustriais visando à geração de biogás. 2021.

ROUX, Jean-Maxime; LAMOTTE, Hadrien; ACHARD, Jean-Luc. An overview of microalgae lipid extraction in a biorefinery framework. *Energy Procedia*, v. 112, p. 680-688, 2017.

ROSSI, Márcio José et al. Tecnologia para produção de inoculantes de fungos ectomicorrízicos utilizando cultivo submerso em biorreator airlift. 2006.

SALMINEN, E.; RINTALA, J. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste—a review. *Bioresource technology*, v. 83, n. 1, p. 13-26, 2002.

SAJJADI, Baharak 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.

SATHASIVAM, Ramaraj et al. Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine. *Saudi journal of biological sciences*, v. 26, n. 4, p. 709-722, 2019.

SCHMITZ, Roberta; MAGRO, Clinei D.; COLLA, Luciane Maria. Aplicações ambientais de microalgas. *Revista CIATEC–UPF*, v. 4, n. 1, p. 48-60, 2012.

SIALVE, Bruno; BERNET, Nicolas; BERNARD, Olivier. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology advances*, v. 27, n. 4, p. 409-416, 2009.

SILVA, Wellington Regis. Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais. 201 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

SOARES, Caroline Monique Tietz; FEIDEN, Armin; TAVARES, Sidnei Gregorio. Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás. *Nativa*, v. 5, p. 522-528, 2017.

TOMASELLI, L. The microalgal cell. In: RICHMOND, A. (Ed). *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Oxford: Blackwell Science, 2004. p.3-19.

UGWU, C. U.; AOYAGI, Hi; UCHIYAMA, H. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource technology*, v. 99, n. 10, p. 4021-4028, 2008.

WEREKO-BROBBY, C. Y.; HAGEN, E.B. *Biomass conversion and technology*. Energy Engineering, John Wiley & Sons Ltd, England, p. 203, 2000.

YU, Kai Ling et al. Microalgae from wastewater treatment to biochar–feedstock preparation and conversion technologies. *Energy conversion and management*, v. 150, p. 1-13, 2017.

ZAMALLOA, C., BOON, N., VERSTRAETE, W. Anaerobic digestibility of *Scenedesmus obliquus* and *Phaeodactylum tricornutum* under mesophilic and thermophilic conditions. *Applied Energy*. v. 92, p. 733-738, 2012.