



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

AILSON JOSÉ LOURENÇO ALVES

O CULTIVO DE MICROALGAS E SUAS APLICAÇÕES:
Uma revisão da literatura.

JOÃO PESSOA – PB
2021

AILSON JOSÉ LOURENÇO ALVES

O CULTIVO DE MICROALGAS E SUAS APLICAÇÕES:
Uma revisão da literatura.

Trabalho Final de Curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba como
requisito necessário para a obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Química sob
orientação da Professora Doutora Sharline
Florentino de Melo Santos.

JOÃO PESSOA – PB
2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A293c Ailson José Lourenço Alves.

O Cultivo de Microalgas e Suas Aplicações: Uma revisão de literatura / Ailson Jose Lourenco Alves. - João Pessoa, 2021.
38 f. : il.

Orientação: Sharline Florentino de Melo Santos.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Microalgas. 2. Aplicações de microalgas. I. Santos, Sharline Florentino de Melo. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 664

AILSON JOSÉ LOURENÇO ALVES

**O CULTIVO DE MICROALGAS E SUAS APLICAÇÕES:
Uma revisão da literatura.**

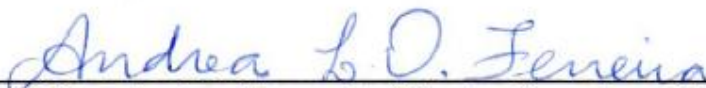
Trabalho Final de curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Química
da Universidade Federal da Paraíba como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 14 de junho de 2021.

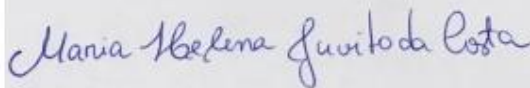
BANCA EXAMINADORA



Prof.^a Dra. Sharline Florentino de Melo Santos – DEQ/CT/UFPB
(Orientadora)



Prof.^a Dra. Andrea Lopes de Oliveira Ferreira – DEQ/CT/UFPB
(Examinadora)



Enga. Maria Helena Juvito da Costa – PPGEQ/CT/UFPB
(Examinadora)

JOÃO PESSOA – PB

2021

*People change, circumstances change. But God
always remains the same.*

(Jason Boyd)

À minha mãe e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ser minha fonte de força e me guiar em momentos difíceis, obrigado!

À minha mãe, Rivaneide Lourenço, por sempre me apoiar de todas as maneiras e lutar minhas batalhas comigo.

À minha família, por acreditarem e apoiarem meus objetivos.

A meus amigos queridos por toda a força e gratidão por dividirem suas vidas comigo durante os anos de graduação. Obrigado pela paciência e amor durante nossa caminhada.

À minha avó Maria da Glória por ser exemplo de simplicidade e força.

À professora Josilene Cavalcante por me abraçar quando senti o peso do mundo em minhas costas.

Ao professor Darlan Azevedo por confiar, compreender e incentivar. Enorme gratidão pela oportunidade da pesquisa científica.

Ao professor Genaro Clericuzi por estar disposto a sempre auxiliar os alunos de Engenharia Química em questões burocráticas referentes à universidade.

À professora Sharline Florentino por saber impor respeito sem perder a gentileza e doçura. Obrigado pela paciência e atenção.

Agradeço a todos que me ajudaram a chegar até aqui e contribuíram em minha trajetória. Obrigado!

RESUMO

Microalgas são micro-organismos unicelulares, que utilizam energia solar para a obtenção de compostos orgânicos, sendo possível realizar seu cultivo sem grandes complicações. Além disso, esses seres possuem vasta aplicabilidade e versatilidade, sendo cada vez mais comum a disposição de bioprodutos com alto valor agregado produzidos a partir do cultivo de microalgas para atender diferentes finalidades como, no tratamento de efluentes atuando como biorremediador, sínteses de fármacos, nutrientes, produção de biocombustíveis, etc. Esta revisão de literatura teve como objetivo apresentar um panorama geral sobre o cultivo de microalgas e suas aplicações, abordando temas como os métodos de cultivo, os aspectos que influenciam o crescimento das microalgas, as fases de crescimento das microalgas durante o processo de cultivo, as principais aplicações do cultivo de microalgas, bem como as principais espécies empregadas comercialmente e dos compostos de interesse industrial. Para a seleção da amostra para a elaboração deste trabalho, foram utilizados termos de pesquisa em palavras-chave de publicações em geral, como “microalga e application”, “microalgae”, “aplicação de microalgas”, “microalgas”, “aplicación de microalgas”, “procucción de microalgas” em artigos e revisões encontradas em bases como, o Portal de Periódicos CAPES, Scielo, ResearchGate e Google Acadêmico, levando em consideração o período de publicação dos trabalhos de 20 anos (2000 a 2020). Os resultados revelaram alta eficiência de conversão no processo de fotossíntese, o rápido crescimento de células, a possibilidade de manipulação do meio de cultivo, e versatilidade em realizar o cultivo em áreas tanto extensas quanto muito pequenas. Dessa maneira, as microalgas se mostram como potenciais matérias primas para a produção de inúmeros componentes de interesse com aplicação em diferentes setores industriais.

Palavras-chave: microalgas; biomassa; aplicações.

ABSTRACT

Microalgae are unicellular microorganisms that use solar energy to obtain organic compounds, making it possible to cultivate them without many complications. Besides that, these beings have wide applicability and versatility, and it is increasingly common to dispose of bioproducts with high added value produced from the cultivation of microalgae to serve different purposes such as, in the treatment of effluents acting as a bioremediator, synthesis of drugs, nutrients, production of biofuels, and etc. This literature review aimed to provide an overview of microalgae cultivation and its applications, covering topics such as cultivation methods, the aspects that influence the growth of microalgae, the phases of microalgae growth during the cultivation process, the main applications of microalgae cultivation, as well as the main species used commercially and of compounds of industrial interest. For the selection of relevant content to the elaboration of this work, search terms were used in keywords from publications in general, such as “microalgae application”, “microalgae”, “aplicação de microalgas”, “microalgas”, “aplicación de microalgas”, “producción de microalgas” in articles and reviews found in databases like the Portal de Periódicos Capes, Scielo, ReserachGate and Academic Google. Taking into account the publication period of the works of 20 years (2000 to 2020). The results reveal high conversion efficiency in the photosynthesis process, the fast growth of cells, the possibility of manipulating the microalgaecultivation, and the versatility to carry out the cultivation in both large and very small areas. Thus, microalgae are potential raw materials for the production of many componentes of interest in diferente industrial sectors.

Keywords: microalgae; biomass; applications.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da taxa de crescimento de algas em cultura (linha sólida) e a concentração de nutrientes (linha tracejada) em função de um período de tempo.....	20
Figura 2 - Tanques de cultivo de microalgas do tipo "raceway".....	22
Figura 3 - Lagoa circular para cultivo de microalgas.....	22
Figura 4 - Representação dos principais sistemas fechados para cultivo de microalgas.....	23
Figura 5 - Exemplo de um fotobiorreator tubular utilizado em cultivos em massa de microalgas.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das características das diferentes condições de cultivo.....	16
Tabela 2 - Comparação de microalgas com outras matérias-primas de biodiesel.....	25
Tabela 3 - Composição genérica (nitrogênio e fósforo) de vários tipos de águas residuárias.	28

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Funções dos principais nutrientes presentes nos meios de cultivos de microalgas.	17
Quadro 2 - Comparação das características dos principais sistemas de cultivo de microalgas	21
Quadro 3 - Algumas aplicações biotecnológicas das microalgas.....	24
Quadro 4 - Vantagens do uso de microalgas na produção de biocombustíveis	26
Quadro 5 - Fixação de CO ₂ por diferentes espécies de microalgas.....	27
Quadro 6 - Microalgas, produtos gerados a partir do cultivo e suas aplicações.....	27
Quadro 7- Composição de diferentes fontes de alimentos e microalgas, expressas em porcentagem de matéria seca.....	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. METODOLOGIA	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 MICROALGAS	15
3.2 CONDIÇÕES DE CULTIVO	17
3.3 CRESCIMENTO DAS MICROALGAS	18
3.4 SISTEMAS DE CULTIVO	20
3.4.1 Sistemas abertos.....	21
3.4.2 Sistemas fechados	22
3.5 APLICAÇÕES DAS MICROALGAS	24
3.5.1 Biocombustíveis.....	25
3.5.2 Fixação de CO ₂	26
3.5.3 Compostos bioativos.....	27
3.5.4 Tratamento de efluentes.....	28
3.5.5 Alimentação	29
4. CONCLUSÃO	31
5. REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

As microalgas são organismos eucariontes, procariontes e fotossintetizantes. Se beneficiam do CO₂ presente na atmosfera, da energia luminosa e dos compostos orgânicos e inorgânicos para se desenvolverem. O resultado disso é a produção de bioativos e a produção de compostos nutricionais, como carotenoides, proteínas, carboidratos, lipídios, ácidos graxos e antioxidantes naturais. Além disso, a biomassa gerada no processo do cultivo de microalgas pode servir como alimento para animais bem como meio de produção para biocombustíveis de terceira geração e em biorremediação de águas residuais (SINGH & GU, 2010; SHUBA & KIFLE, 2018).

Para que o processo de cultivo ocorra com êxito é necessário monitorar importantes parâmetros, como a disponibilidade de nutrientes no meio, e algumas variáveis físico-químicas, como temperatura, pH, condutividade e salinidade (DOKULIL & TEUBNER 2000; HEISLER et al., 2008). Neste contexto, alguns desses parâmetros podem ser modificados a fim de induzir a produção de biomoléculas de interesse (COLLA et al., 2007).

Em meio a escassez de recursos naturais, aumento populacional e preocupação com a queima de combustíveis não renováveis, as microalgas ganham destaque como uma potencial fonte sustentável de recursos (POSTEN et al., 2016). O descobrimento dos inúmeros potenciais e da versatilidade de aplicação das microalgas é um critério crucial para o foco em novos estudos acerca desses microrganismos. Muitas áreas relevantes como, a indústria de fármacos, indústria alimentícia e do biodiesel, vem se desenvolvendo no aproveitamento de componentes gerados a partir das microalgas (DERNER et al., 2006).

Durante o cultivo e o processamento da biomassa microalgal podem haver custos elevados, estes custos estão em sua maioria, ligados a gastos com energia de alguns equipamentos como bombas centrífugas para a etapa de colheita da biomassa e reagentes e nutrientes envolvidos no preparo do meio de cultivo (CAI; PARK; LI, 2013).

Este trabalho teve como objetivo apresentar um panorama geral sobre o cultivo de microalgas e suas aplicações. Por meio de revisão da literatura, foram abordados temas como os métodos de cultivo, os aspectos que influenciam o crescimento das microalgas, as fases de crescimento das microalgas durante o processo de cultivo, as principais aplicações do cultivo de microalgas, bem como as principais espécies empregadas comercialmente e dos compostos de interesse industrial.

2. METODOLOGIA

A revisão de literatura foi realizada através de busca eletrônica de materiais gratuitos disponíveis como Scielo, ResearchGate, o Google Acadêmico e também no Portal de Periódicos CAPES, em diferentes idiomas, português, inglês e espanhol. Para a seleção de material de pesquisa relevante foram utilizados termos de pesquisa em palavras-chave de publicações em geral, como “microalgae application”, “microalgae”, “aplicação de microalgas”, “microalgas”, “aplicación de microalgas”, “procucción de microalgas”.

A busca foi realizada entre os meses de setembro e outubro de 2020. Como critérios de inclusão foram considerados o período das publicações de 20 anos (2000 a 2020).

Como critério de exclusão, inicialmente, realizou-se uma triagem inicial que correspondeu a leitura do título, palavras-chave e resumo, como consequência do critério de exclusão utilizado, após a leitura dos resumos foram excluídos os trabalhos que falavam apenas do processo de cultivo de microalgas sem citar ou desenvolver algo relacionado às suas aplicações. Foi realizada a leitura completa dos artigos científicos e revisões selecionados priorizando sempre aspectos relevantes em relação às diversas maneiras de cultivo das microalgas e sua versatilidade, podendo ser aplicadas em diferentes áreas. Evidenciando os principais resultados presentes nos textos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 MICROALGAS

As microalgas podem ser definidas como algas microscópicas, capazes de realizar fotossíntese assim como as plantas, utilizando a energia da luz, dióxido de carbono (CO_2) e água, liberando oxigênio (O_2). Esses microrganismos são algumas das mais antigas formas de vida na terra (LOURENÇO, 2006). Possuem uma diversificada composição bioquímica e características relacionadas a condições ambientais da região onde o cultivo é realizado (ZANALLOA et al., 2011). Os chineses utilizavam as microalgas a mais de 2000 anos atrás, a biomassa de *Nostoc* era utilizada como fonte de alimento (SPOLAORE et al., 2006). Estes microrganismos se desenvolvem em um ambiente geralmente aquático e são cultivados na

maioria das vezes em fotobiorreatores, para um cultivo de forma mais controlada (ZANALLOA et al., 2011).

As microalgas são micro-organismos autotróficos que desenvolvem através da fotossíntese. São unicelulares e crescem rapidamente convertendo a energia luminosa em energia química (HARUN et al., 2010). Podem ser procarióticos (cianobactérias), e eucarióticos, (LI et al., 2008). Apesar da ocorrência estimada de mais de 50.000 espécies de microalgas no mundo, apenas cerca de 30.000 já foram reconhecidas e estudadas (TOMASELLI, 2004). A Tabela 1, mostra como as microalgas podem crescer utilizando diversas rotas metabólicas diferentes.

- i) de maneira fotoautotrofica: utilizando a luz como fonte de energia e CO₂ como fonte de carbono inorgânico formando a adenosina trifosfato (ATP) e oxigênio;
- ii) de maneira heterotrófica: utilizando substratos orgânicos como fonte de energia e de carbono;
- iii) de maneira mixotrófica, em que a microalga realiza a fotossíntese como principal fonte de energia, mas tanto os compostos orgânicos e CO₂ são essenciais para o cultivo (MORENO-GARCIA et al., 2017).

Tabela 1 - Comparação das características das diferentes condições de cultivo.

Condição de cultivo	Fonte de energia	Fonte de carbono	Densidade celular	Sistema de cultivo	Ex. espécie de microalgas
Fotoautotrófico	Luz	Carbono inorgânico	Baixo	Lagoas ou sistemas fechados	<i>Chlorellavulgaris</i> ,
Heterotrófico	Carbono orgânico	Carbono orgânico	Alta	Fermentador convencional	<i>Haematococcuspluvialis</i>
Mixotrófico	Luz e carbono orgânico	Carbono orgânico e inorgânico	Média	Sistemas fechados	<i>Arthrospira (Spirulina) platensis</i>
Fotoheterotrófico	Luz	Carbono orgânico	Média	Sistemas fechados	<i>Selenastrumcapricornutum</i> e <i>Scenedesmusacutus</i>

Fonte: PEREIRA, (2014).

Sendo capaz de metabolizar diferentes tipos de componentes com aplicações em vários setores da indústria mundial, como a de biocombustíveis, cosméticos, aquicultura, ração animal, aditivos alimentares, ômega, polímeros enzimáticos e antioxidantes. Incluindo até compostos presentes na indústria farmacêutica como, luteína, ágar, ácidos acéticos (RIZWAN et al., 2018).

3.2 CONDIÇÕES DE CULTIVO

O desenvolvimento do cultivo de microalgas é resultado de vários fatores, sendo eles: biológicos, químicos e físicos. Os fatores biológicos referem-se às próprias taxas metabólicas da espécie cultivada. Já os fatores físico-químicos são os mais importantes pois afetam o crescimento da biomassa microalgal. Esses fatores são: temperatura, luminosidade, pH, salinidade e disponibilidade de nutrientes (SCHMITZ et al., 2012). Não existe um meio de cultivo único para todas as espécies de microalgas, tendo cada espécie suas necessidades específicas (RICHMOND, 2004).

A concentração de nutrientes disponíveis no meio de cultivo contribui para o aumento da pressão osmótica do meio, alterando a fisiologia da microalga, podendo ter efeito no crescimento e na composição da biomassa (ZENG et al., 2011). O Quadro 1 resume os elementos como, carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre, os quais constituem os nutrientes mais importantes para as células microalgais.

Quadro 1- Funções dos principais nutrientes presentes nos meios de cultivos de microalgas

Nutriente	Principais fontes	Função	Faixa de concentração
Fonte de carbono	CO ₂ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻	Fornecer C à célula	1-16,8 g.L ⁻¹
Fonte de nitrogênio	NO ₃ ⁻ , Ureia, AA, N ₂	Fornecer N à célula	0,01-2,5 g.L ⁻¹
Fósforo	PO ₄ ³⁻ , hidrofosfato	Fornecer P às reações e células	0,01-0,5 g.L ⁻¹
Enxofre	SO ₄ ²⁻	Fornecer S a reações e proteínas	0,001-1,0 g.L ⁻¹
Sais Inorgânicos	K, Ca, Na, Mg	Manter a estrutura e atividade celular	0,1-1000 mg.L ⁻¹
Oligoelementos	Fe, Zn, Mn, Pb, Cd	Co-fatores enzimáticos	0,01-10 mg.L ⁻¹
Vitaminas	B, C, E	Auxiliar na divisão celular	0,01-1000 mg.L ⁻¹

Fonte: Adaptado de Zeng et al. (2011).

Outros elementos essenciais para o desenvolvimento de algumas espécies de microalgas são os metais como ferro, magnésio, manganês, cobalto e cobre (ZENG et al., 2011; REBOLLOSO-FUENTES et al., 2001). Consequentemente, são identificados papéis diferenciados para cada metal.

Para a produção de diferentes compostos na célula da microalga, alterações no meio de cultura são necessários. Para a produção de biodiesel, por exemplo, alta concentração de

lipídios é o componente mais desejável na célula, enquanto que, para obtenção de biomassa para aplicação em produtos relacionados à alimentação e fármacos, deve-se manipular o meio de cultivo a fim de se obter uma biomassa rica em proteínas, ácidos graxos e vitaminas (SCRAGG et al., 2002).

O dióxido de carbono tem alta relevância para o controle de pH do meio: a introdução de CO₂ ocasiona a diminuição de pH do sistema. À medida que as células consomem o CO₂, o pH do meio se eleva. Em decorrência disso, é implementado um sistema automático de adição de CO₂ no cultivo de forma que se mantenha o pH do meio entre 7 e 9, que é a faixa ótima de crescimento de microalgas. O sistema automático consiste na instalação de eletroválvulas, essas eletroválvulas são acionadas por um controlador assim que o pH do meio excede o valor preconizado (VÁLDES et al., 2012).

A produção do cultivo cresce equivalente de acordo com a temperatura ótima para cada espécie (PARK; CRAGGS; SHILTON, 2011). A temperatura de cultivo deve ser parecida com a do habitat natural. Ou seja, uma espécie que se desenvolve em ambientes com temperaturas baixíssimas pode apresentar dificuldades para se desenvolver em cultivos realizados com temperaturas mais quentes. Geralmente, a temperatura de cultivo para diferentes espécies é de 25 °C (BARSANTI; GUALTIERI, 2006). Já em casos onde o cultivo é realizado em escala laboratorial, o ambiente de cultivo possui a temperatura constante, sendo controlada por climatização. Em casos de grandes sistemas de cultivo, há uma maior complexidade em relação à manutenção da temperatura constante (LOURENÇO, 2006).

Um dos fatores mais importantes para o crescimento do cultivo é a luz, devendo esta ser fornecida de maneira que a intensidade, duração e comprimento de onda sejam adequados. Em excesso a luz pode causar a foto-oxidação e a fotoinibição. Sendo seu fornecimento insuficiente, ocorre inibição de crescimento (GOUVEIA, 2011).

Em cultivos desenvolvidos em escala laboratorial, geralmente se costuma proporcionar agitação por aeração injetando ar através de mangueiras de silicone. Nos de larga escala a agitação se dá por aeração utilizando pás giratórias ou por bombeamento. Em fotobiorreatores tubulares, essa agitação pode ser realizada também por borbulhamento de ar ou bombas mecânicas (BRENNAN; OWENDE, 2009).

3.3 CRESCIMENTO DAS MICROALGAS

Quando o cultivo de microalgas é descontínuo, o tempo de crescimento celular pode variar de acordo com as condições impostas, então, o acompanhamento do crescimento celular é necessário para determinar o momento ótimo para a coleta da biomassa formada. O método comumente utilizado para acompanhar o crescimento celular é a contagem de células através da microscopia e a medida da densidade óptica por espectrofotometria (LOURENÇO, 2006).

A técnica mais simples e tradicional é a microscopia, útil para monitorar o crescimento de microalgas, por intermédio de uma câmara de contagem. Nas contagens usando um microscópio, a densidade de indivíduos é geralmente expressa como número de células por mililitro de cultivo (LOURENÇO, 2006).

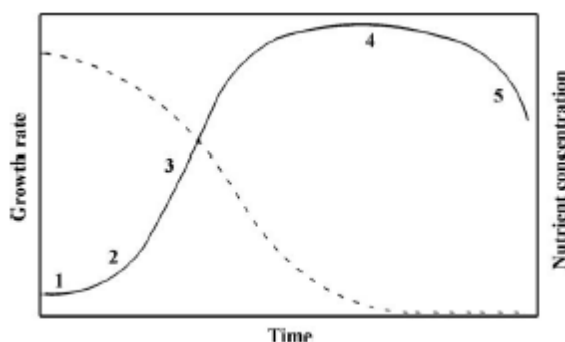
A técnica de densidade óptica é baseada na obstrução física da luz pelas células, quanto maior a quantidade de células na amostra, maior será a absorção de luz e menor será a passagem de luz pela amostra. Nesse caso, a técnica é realizada por intermédio de um espectrofotômetro para realizar as medições do cultivo num comprimento de onda de 690nm (LOURENÇO, 2006).

A curva de crescimento (Figura 1) serve de parâmetro para identificação das fases de crescimento das microalgas no decorrer do cultivo. A seguir, as respectivas fases:

- 1-Fase de indução: Também chamada de fase lag, acontece logo após a inoculação da célula. Basicamente, é o período de adaptação, não há aumento populacional, além de apresentar baixa densidade celular, mesmo que rapidamente;
- 2- Fase exponencial: Ocorre um crescimento logarítmico, a taxa de crescimento se duplica em intervalos de tempo regulares atingindo assim o nível máximo de produção;
- 3- Fase de diminuição do crescimento relativo: A taxa de crescimento celular diminui, a quantidade de nutrientes e energia luminosa por célula cai e assim a fotossíntese também é reduzida;
- 4- Fase estacionária: A densidade celular se mantém constante, a taxa de crescimento é compensada pela de mortalidade, esta fase é representada por uma reta;

5- Fase de morte da cultura (declínio): Devido ao esgotamento de nutrientes e do autossombreamento, o crescimento é impossibilitado e apenas poucas células mantêm o crescimento (DERNER et al., 2006).

Figura 1 - Representação da taxa de crescimento de algas em cultura (linha sólida) e a concentração de nutrientes (linha tracejada) em função de um período de tempo.



Fonte: Mata; Martins; Caetano, (2010).

3.4 SISTEMAS DE CULTIVO

Lagos, grandes tanques ou raceways são alguns dos sistemas de cultivo de microalgas mais convencionais, são chamados de sistemas abertos. Algumas vantagens desse tipo de sistema são a sua fácil instalação, operação e baixo custo. As desvantagens observadas são: grandes chances de contaminação, evaporação acentuada e uma grande variação de temperatura, entre outros (XU et al., 2009; ERIKSEN, 2008). Existem também os sistemas fechados, são comumente chamados de fotobiorreatores. Algumas vantagens desses equipamentos são a menor susceptibilidade a contaminações, uma maior produtividade de biomassa em relação aos sistemas abertos e melhor difusão dos gases. A desvantagem em relação a esse tipo de sistema é o elevado custo de construção (JORQUERA et al., 2010; ERIKSEN, 2008).

A escolha correta do tipo de sistema de cultivo a ser implementado atinge diretamente os custos envolvendo o processo de produção de biomassa (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). O Quadro 2 apresenta uma comparação entre os sistemas de cultivos aberto e fechado em relação a vários parâmetros.

Quadro 2 - Comparação das características dos principais sistemas de cultivo de microalgas

Parâmetro	Tanques (raceways)	Sistemas fechados (Fotobiorreatores)
Espaço requerido	Muito	Pouco
Risco de contaminação	Alto	Médio a baixo
Perda de água	Alta	Baixa
Concentração de oxigênio	Usualmente baixa	Alta; requer continua remoção
Perda de CO ₂	Alta	Muito baixa
Reprodutibilidade	Média a baixa	Alta
Controle de processo	Limitado	Alto
Desgaste do material de construção	Baixo	Usualmente baixo
Dependência de condições climáticas	Alto	Baixa
Controle da temperatura	Baixo	Alto
Custo de colheita	Alto	Médio
Manutenção	Fácil	Difícil
Custo de construção	Médio	Alto
Concentração de biomassa na colheita	Baixa	Alta

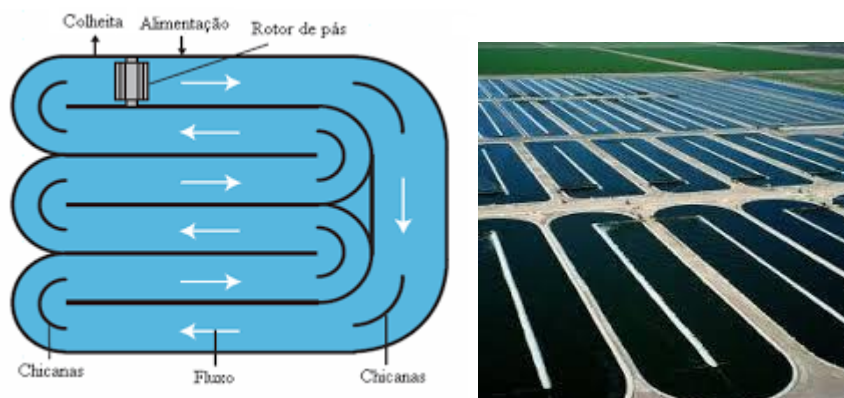
Fonte: Adaptado FRANCO et al., 2013; ABDELAZIZ e HALLENBECK, 2013.

3.4.1 Sistemas abertos

É o sistema de cultivo de microalgas mais antigo e os mais comumente utilizados por serem de fácil acessibilidade, instalação e operação. São constituídos por lagoas de pouca profundidade, com grande incidência de luz solar ou em estufas. Entretanto, pode ocorrer contaminação, evaporação acentuada, variação de temperatura, dentre outros (XU et al., 2009; ERIKSEN, 2008). Possuem dois formatos:

- Tipo *raceway*: Geralmente são empregados nos cultivos comerciais. A boa capacidade de mistura desse tipo é ocasionada pela presença de pás circulares, bombas ou defletores para um bom espalhamento de nutrientes, gases e de células, ocasionando um bom crescimento microalgal (Figura 2):

Figura 2 - Tanques de cultivo de microalgas do tipo "raceway".



Fonte: Coplin, (2012)

- Circulares: Podendo ou não receber algum tipo de sistema de aeração, são os mais utilizados, são também chamados de lagoas. Nesse sistema há uma troca direta de gases com a atmosfera, havendo assim uma evaporação do líquido, além de um equilíbrio na temperatura do sistema (Figura 3) (RYAN, 2009).

Figura 3 - Lagoa circular para cultivo de microalgas



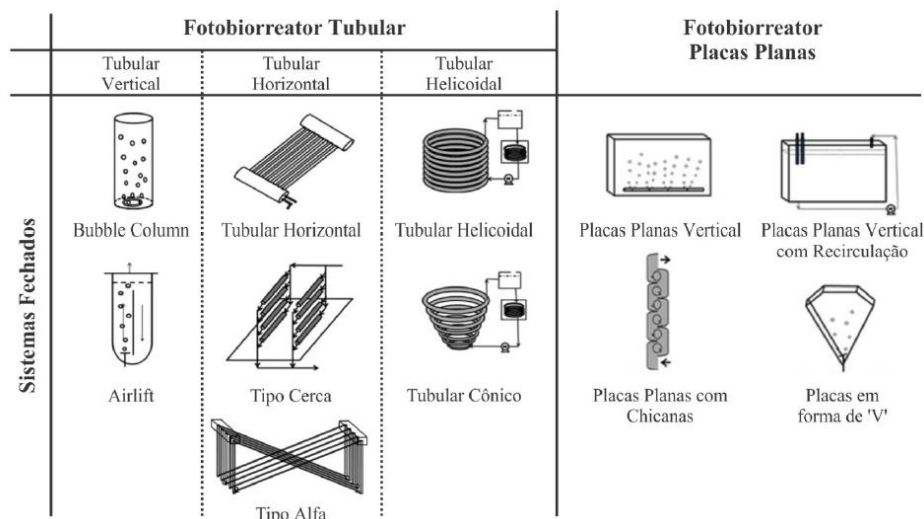
Fonte: Borowitzka, (2005).

3.4.2 Sistemas fechados

Denominado de fotobiorreator nada mais é que um biorreator que possui alguma fonte de luz, onde há possibilidade de serem confeccionados em diferentes formatos: em placa, tubular, cônico, coluna de bolhas, tanques com agitação e agitação pneumática (DASGUPTA et al., 2010). Cada tipo de fotobiorreator possui suas particularidades e apresentam vantagens e desvantagens, sendo assim, é importante que essas características sejam levadas em consideração no momento de definição do projeto de acordo com a utilização do respectivo equipamento. São menos propensos a contaminação, apresentam maior produtividade de

biomassa em relação aos sistemas abertos e melhor fisusão dos gases, porem apresentam elevados custos de construção (JORQUERA et al., 2010; ERIKSEN, 2008). A Figura 4 apresenta alguns dos principais sistemas fechados para o cultivo de microalgas.

Figura 4 - Representação dos principais sistemas fechados para cultivo de microalgas.



Fonte: PEREIRA, 2014.

O equipamento é fabricado com material transparente, podendo ser de acrílico ou vidro com a intenção de facilitar o controle das variáveis de cultivo para que ocorra o melhor desenvolvimento de biomassa microalgal possível. Por ser de fácil controle em relação a sistemas abertos, é possível realizar uma produção em larga escala utilizando esses equipamentos já que o risco de contaminação é bem menor. Graças a seus vários formatos geométricos, o uso da luz pode ser usado de forma estratégica para que seja possível uma rica produção de biomassa (FRANCO; LÕBO; CRUZ, 2013). A Figura 5 a seguir exemplifica um modelo de fotobiorreator tubular para o cultivo em massa de microalgas.

Figura 5 - Exemplo de um fotobiorreator tubular utilizado em cultivos em massa de microalgas.



Fonte: Coplin, (2012).

Sendo assim, é possível afirmar que mesmo as microalgas desempenhando bem o processo de fotossíntese, o cultivo autotrófico quando realizado em larga escala apresenta algumas falhas se comparado ao heterotrófico devido à restrição luminosa quando se tem altos números de células presentes no meio de cultivo ou até mesmo a situação oposta, desencadeando assim um processo de foto inibição devido a incidência excessiva da luz sob o meio, esse tipo de problema ocorre geralmente em sistemas abertos. Dessa forma, pode-se dizer que o desenvolvimento heterotrófico de microalgas em fotobiorreatores fechados é conceituado mais vantajoso (HUANG et al., 2010).

Dentro do sistema de cultivo fechado é necessário lidar com diversos parâmetros físicos para a manutenção e controle, os principais parâmetros são: o volume operacional do sistema, a área iluminada e a área que o sistema ocupa.

3.5 APLICAÇÕES DAS MICROALGAS

As microalgas tem sido foco de inúmeras pesquisas biotecnológicas devido ao seu potencial econômico, nutricional e ecológica. (ANTELO et al., 2010). Nesta seção serão apresentadas algumas das principais aplicações das microalgas. No Quadro 3 são apresentados algumas das inúmeras aplicações biotecnológicas das microalgas.

Quadro 3 - Algumas aplicações biotecnológicas das microalgas

Produto	Componente	Aplicações
Biomassa	Biomassa	Suplementos alimentares, aditivos para alimentos, aquicultura, condicionamento de solos
Corantes e antioxidantes naturais	Xantofilas, luteína, betacaroteno, vitaminas C e E	Alimentos, suplementos alimentares e cosméticos
Ácidos graxos	Ácido araquidônico, ácido eicosapentaenóico, ácido linoleico	Aditivos alimentares
Enzimas	Luciferases, Fosfoglicerato, cinase (PGK)	Pesquisas médicas, alimentos
Polímeros	Polissacarídeos, ácido polihidroxibutírico (PHB)	Aditivos alimentares, cosméticos e medicina
Outros produtos	Peptídeos, toxinas, isótopos, aminoácidos	Pesquisas na área médica e desenvolvimento de fármacos

Fonte: De Jesus et al., (2013).

3.5.1 Biocombustíveis

Baseando se no consumo atual, é previsto que as reservas mundiais de óleo estarão exauridas em 40 anos e de gás em 60 anos (VADUSEVAN e FU, 2010).

Catalisando então, pesquisas relacionadas a produção de biocombustíveis a partir de microalgas, visto que as microalgas podem ser utilizadas para a produção de biometano, biodiesel, biohidrogênio e bioetanol. O uso de microalgas para a produção de biocombustíveis é, desta forma, uma alternativa aos combustíveis fósseis (VARFOLOMEEV e WASSERMAN, 2011).

A primeira etapa para a produção de biocombustíveis a partir de microalgas é a obtenção da biomassa com elevada produtividade. Para a produção de biodiesel, é necessário ainda que a biomassa tenha elevados percentuais de lipídeos (MONTERO et al., 2011).

Segundo Ahmad (2011) substituir o biodiesel tradicional pelo produzido a partir de microalgas pode ser uma boa alternativa em razão das quantidades de polissacarídeos, proteína, lipídeos e hidrocarbonetos que podem ser gerados em forma de biomassa.

De acordo com Chisti (2007) e Mata (2009), mais de 95% do biodiesel tradicional é feito a partir de óleos alimentares como os óleos de palma e de soja. A utilização desses óleos para uma produção em larga escala de biodiesel tradicional acarreta um desvio de componentes vitais na alimentação humana, trazendo desequilíbrio para o mercado mundial de produtos alimentícios. A Tabela 2 a seguir faz um comparativo da produtividade em óleo entre a produção adquirida a partir de microalgas em relação a outras matérias-primas.

Tabela 2 - Comparação de microalgas com outras matérias-primas de biodiesel

Matéria-prima (%m.m⁻¹)	Produtividade em óleo (L/m²)	Área necessária (m².ano⁻¹.kg⁻¹ Biodiesel)	Teor de óleo
Milho	172	1540	44
Soja	446	594	18
Canola	1190	223	41
Palma	5950	45	36
Microalga (teor elevado de óleo)	136900	2	70
Microalga (teor reduzido de óleo)	58700	4,5	30

Fonte: Chisti (2007) e Mata (2009).

As vantagens do uso de microalgas na produção de biocombustíveis estão apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Vantagens do uso de microalgas na produção de biocombustíveis

Característica	Vantagem
Ciclo de vida curto	Rápido crescimento e elevada concentração de lipídios; Pode-se manipular geneticamente a fim de aumentar a fotossíntese e a concentração de triacilgliceróis, a fim de direcionar a biomassa para a produção de biodiesel.
Tamanho microscópico	Sem requerimento por terras aráveis, sem conflito com a produção de alimentos.
Simplicidade de requerimentos	Mecanismo fotossintético similar ao das plantas superiores convertendo CO ₂ em carboidratos e lipídios; Remoção de grandes quantidades de CO ₂ do meio ambiente; Podem ser produzidas a partir de resíduos ou efluentes.
Simplicidade de produção	Emissão menor de dióxido de enxofre, óxido nítrico e outros contaminantes em comparação com diesel.

Fonte: Adaptado de GONG e JIANG, 2010; WIJFEELS e BARBOSA, 2010.

3.5.2 Fixação de CO₂

O processo de fotossíntese é a principal rota de fixação de carbono das microalgas, esse feito é realizado através da utilização da luz solar como a principal fonte de energia das microalgas. No processo de fotossíntese as microalgas convertem os nutrientes em matéria orgânica celular e liberam oxigênio. A biofixação do dióxido de carbono utilizando microalgas tem provado ser um método de alta eficiência e economia graças a grande capacidade destes microorganismos de transformar o gás em fonte de nutrientes para se desenvolver. Pode-se realizar cultivos com a finalidade de biofixar o dióxido de carbono emitido por indústrias, assim como biofixadores podem ser instalados em plantas de energia elétrica para cuidar do dióxido de carbono proveniente do gás de combustão do carvão. (WOJCIECHOWSKI, 2013). O Quadro 5 apresenta a fixação de CO₂ por diferentes espécies de microalgas.

Quadro 5 - Fixação de CO₂ por diferentes espécies de microalgas

Microalgas	Taxa de fixação de CO₂ (g/m³/h)
<i>Chlorogleopsis sp.</i>	0,8 - 1,9
<i>Chlorellavulgaris</i>	80 – 260
<i>Euglena gracilis</i>	3,1
<i>Porphyridium sp.</i>	3 – 18
<i>Spirulinaplatensis</i>	38,3 – 60

Fonte: MAITY et al., 2014.

3.5.3 Compostos bioativos

Muitas espécies de microalgas possuem uma vasta gama de propriedades bioquímicas e fisiológicas. Esse potencial presente nas microalgas pode servir como fonte de produtos químicos, potencializando os esforços voltados a pesquisas no setor (BOROWITZKA, 2013).

As microalgas são regularmente utilizadas como suplemento na nutrição humana podendo ser comercializadas em formas variadas como, comprimidos, capsulas e líquidos (GOUVEIA et al., 2008). Além disso, as microalgas produzem componentes utilizados na produção de combustíveis, cosméticos, pigmentos, entre outros. Também podem produzir vários compostos utilizados na indústria farmacêutica na produção antioxidantes, antivirais, antibióticos, entre outros. (RIZWAN et al., 2018). No Quadro 6 mostra-se diversas espécies de microalgas e seus produtos gerados a partir do cultivo e suas aplicações.

Quadro 6 - Microalgas, produtos gerados a partir do cultivo e suas aplicações

Microalga	Produto	Aplicação
<i>Sprulina platensis</i>	Ficocianina, biomassa	Alimentação saudável, cosméticos
<i>Chlorella vulgaris</i>	Biomassa, ácido ascórbico	Alimentação saudável, suplemento alimentar
<i>Dunaliella salina</i>	Beta- caroteno	Nutrição humana
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Astaxantina	Nutraceuticos, cosméticos, alimentação.
<i>Cylindrospermum sp.</i>	Vitamina B12	Propulsor do crescimento
<i>Chlorella sp.</i>	Ácido ascórbico (Vitamina C)	Nutrição humana

Fonte: Adaptado de Rizwann et al., 2018.

3.5.4 Tratamento de efluentes

A composição dos efluentes muda de acordo com cada origem. Sendo assim é possível que muitos desses efluentes tenham altas quantidades de matéria orgânica ou metais pesados, sendo um risco ao meio ambiente (DAL MAGRO et al., 2011). Na tabela 3 é possível visualizar a composição genérica (nitrogênio e fósforo) de vários tipos de águas residuárias.

Tabela 3 - Composição genérica (nitrogênio e fósforo) de vários tipos de águas residuárias.

Tipo de Água Residuária	Origem	Nitrogênio Total (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Razão Mássica N/P
Municipal	Esgoto	15-90	5-20	3,3
Agropecuária	Pecuária de leite	185-2636	30-727	3,6-7,2
	Avicultura	802-1825	50-446	4-16
	Suinocultura	110-3213	310-987	3,0-7,8
	Pecuária de corte	63-4165	14-1195	2,0-4,5
Industrial	Têxtil	21-57	1,0-9,7	2,0-4,1
	Vinícola	110	52	2,1
	Curtume	273	21	13
	Papel	1,1-10	0,6-5,8	3,0-4,3
	Azeite	532	182	2,9
	Cervejeira	30-75	12-20	1,7-3,1
Efluente de Digestão Anaeróbia	Estrume de pecuária de leite	125-3456	18-250	7,0-13,8
	Estrume de avicultura	1380-1580	370-382	3,6
	Lodo de esgoto	427-467	134-321	1,4-3,2
	Resíduos Orgânicos Urbanos	1640-1885	296-302	5,5-6,2

Fonte: SILVA, 2014.

Faz-se necessário então, que ocorra um tratamento adequado desses efluentes antes do descarregamento em corpos de água. É recomendado que ocorra uma redução de contaminantes a níveis aceitáveis definidos por órgãos regulamentadores como o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) por exemplo, assim garantindo que esses efluentes possuam uma qualidade microbiológica e química na tentativa de manter o ecossistema o mais preservado possível (WOJCIECHOWSKI, 2013).

As microalgas realizam um trabalho de remoção de nutrientes inorgânicos, contaminantes orgânicos e metais pesados, associados a produção de biomassa de vários tipos

de águas residuais. Esse tipo de atividade vem sendo cada vez mais utilizado uma vez que é possível economizar grandes quantidades de nutrientes e água necessários para o cultivo de microalgas (KADIR et al., 2018; PIRES et al., 2013).

Para efluentes com metais tóxicos em sua composição, Dal Magro e colaboradores (2011) fizeram uso da biomassa da microalga da espécie *Spirulina patensis* para remover cromo (VI) e DQO, apresentando capacidade de bio sorção de Cromo (VI) de 40% a 60% e remoção de DQO de 60 a 70%. Estudos baseados em processos biológicos para o tratamento de efluentes tem se intensificado. Usando a bio sorção, que é o processo de absorção de metais pesados por microrganismos, pode ser uma alternativa sem efeitos danosos ao meio ambiente.

Aneja et al (2010) avaliaram a bio sorção de Pb^{+2} e Zn^{+2} de uma solução aquosa contendo diferentes concentrações desses metais, utilizando a biomassa seca de *Spirulina sp.*, resultando em um índice de bio sorção de 82% para Pb^{+2} e de 90% para Zn^{+2} . Sendo o baixo custo e boa eficiência algumas das vantagens desse processo. As microalgas ganham destaque em relação a essa tecnologia devido a sua capacidade de retenção e imobilização de metais (WOJCIECHOWSKI, 2013).

3.5.5 Alimentação

A utilização da microalga na alimentação humana ocorre desde a idade antiga. Povos asiáticos, especialmente da China já consumiam produtos incorporando a biomassa de *Spirulina spp*, principalmente para o suprimento de proteínas (SHIMAMATSU, 2009). De acordo com Pulz & Gross (2004), o mercado de alimentos utilizando microalgas como fonte de nutrientes e compostos ativos, apresenta crescente desenvolvimento em países como China, França, Estados Unidos e Tailândia.

Atualmente, são comercializadas como alimento natural ou suplemento alimentar e são encontradas de diferentes maneiras como, em pó, tabletes, cápsulas ou extratos. São também incorporadas em massas, petiscos, doces, bebidas etc., tanto como suplemento nutricional quanto como corantes naturais (BECKER, 2004; COLLA et al., 2004; PULZ & GROSS, 2004).

Segundo Richmond (2004) microalgas como *Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella*, assim como *Scenedesmus*, quando são processadas corretamente possuem um sabor palatável e

podendo dessa forma ser incorporado em muitos tipos de alimentos humanos, causando um crescimento de demanda destas microalgas no mercado (DERNER et al., 2006).

Para o uso na elaboração de alimentos, bem como para a extração de alguma substância de interesse, o primeiro passo é separar a biomassa do meio de cultura. Esse processo envolve uma ou mais etapas sólido-líquido, como floculação, centrifugação e filtração. Depois, a biomassa é desidratada. Para isso, é possível empregar variadas técnicas, como a secagem ao sol, o “spray-drying” e a liofilização. Na extração dos compostos, as células das microalgas são rompidas, faz-se necessário então empregar métodos de homogeneização, ultra-som, choque osmótico, solventes, enzimas etc. Assim, as substâncias de interesse são recuperadas e, quase sempre, passam por algum processo de purificação, como ultrafiltração, cromatografia ou fracionamento (MOLINA GRIMA, 2004). No quadro 7, é possível observar o teor de proteína, carboidratos e lipídeos de alimentos e microalgas.

Quadro 7- Composição de diferentes fontes de alimentos e microalgas, expressas em porcentagem de matéria seca

Fonte	Proteína	Carboidratos	Lipídeos
<i>Spirulina platensis</i>	63	15	11
<i>Arthrospira maxima</i>	60-71	13-16	6-7
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	51-58	12-17	2
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Haematococcus pluvialis</i>	48	27	15
Fermento de padeiro	39	38	1
Carne	43	1	34
Leite	26	38	28
Arroz	8	77	2
Soja	37	30	20

Fonte: Adaptado de Lourenço, 2006.

4. CONCLUSÃO

O uso de microalgas e os produtos gerados a partir dessa iniciativa são um caminho ascendente para um futuro de descobertas, oportunidades e inovações em diferentes setores industriais.

Neste trabalho foi feito uma análise através de revisão de literatura, abordando estudos relacionados ao cultivo de microalgas e suas variadas possibilidades de aplicações. A pesquisa foi realizada em diversas plataformas de pesquisas como Portal de Periódicos CAPES, Scielo, ResearchGate e o Google Acadêmico.

Analisando o material exposto neste trabalho, pode-se afirmar que as microalgas se mostram eficientes em diversas áreas de interesse comercial, industrial e científico, como na remoção de CO₂ da atmosfera, na remediação de águas residuais, no enriquecimento da dieta humana e animal, na produção de biocombustíveis e na síntese de diversas substâncias necessárias para a indústria farmacêutica. Tudo isso é possível pela alta eficiência de conversão no processo de fotossíntese, o rápido crescimento de células, a possibilidade de manipulação do meio de cultivo, e a versatilidade em realizar o cultivo em áreas tanto extensas quanto muito pequenas, fazendo assim as microalgas uma das matérias primas mais favoráveis e de alto valor comercial.

5. REFERÊNCIAS

- AHMAD A. L., MAT YASIN N. H., DEREK C. J.C., LIM J.K. Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2011.
- ANEJA, R.K.; CHAUDHARY, G.; AHLUWALIA, S.S.; GOYAL, D. Biosorption of Pb^{2+} and Zn^{2+} by non-living biomass of *Spirulina* sp. **Indian Journal Microbiology**, v. 50, n. 4, p. 438-442, 2010.
- ANTELO, F.S.; ANSCHAU, A.; COSTA, J.A.V.; KALIL, S.J. Extraction and Purification of Cphycocyanin from *Spirulina platensis* in Conventional and Integrated Aqueous Two-Phase Systems. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 21, n. 5, p. 921-926, 2010.
- BARSANTI, L.; GUALTIERI, P. **Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology**. Boca Ration: Taylor & Francis, 2006.
- BECKER, W. Microalgae in human and animal nutrition. In: RICHMOND, A. (Ed). **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. London: Blackwell Science, p.312-351, 2004.
- BOROWTIZKA, M.A. High- value products from microalgae – their development and commercialisation. **8th Asia-Pacific Conference on Algal Biotechnology**, Adelaide, Australia, 2012.
- BRENNAN, L.; OWENDE, P. Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-produts. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.14, p. 557- 577, 2010.
- CAI, T.; PARK, S. Y.; LI, Y. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 360–369, 2013.
- CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, v.25, p. 294–306, 2007.
- COLLA, L.M. et al. Fatty acids of *Spirulina platensis* grown under different temperatures and nitrogen concentrations. **Zeitschrift für Naturforschung**, v.59c, p.55-59, 2004.

COLLA, L. M.; REINEHR, C. O.; REICHERT, C.; COSTA, J. A. V. Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 7, p. 1489–1493, 2007.

COPLIN, L. G. (Ed.). **Sustainable development of algal biofuels in the United States**. Washington: The National Academies Press, 2012.

DAL MAGRO, C.; HEMKEMEIER, M.; COLLA, L.M. Remoção de cromo VI e DQO de meio de cultivo adicionado de efluente com elevada concentração de cromo a partir da microalga *Spirulina platensis*. In: **XVIII SIMPÓSIO NACIONAL DE BIOPROCESSOS, 2011**, Caxias do Sul. *Anais...* Caxias do Sul: Editora da UCS, 2011.

DASGUPTA, C.N., GILBERT, J.J., LINDBLAD, P., HEIDORN, T., BORGVANG, S.A., SKJANES, K. & DAS, D. Recent trends on the development of photobiological processes and photobioreactors for the improvement of hydrogen production. **International journal of Hydrogen Energy**, v.35, p.10218-10238, 2010.

DE JESUS RAPOSO, M. F.; DE MORAIS, R. M. S. C.; DE MORAIS, A. M. M. B. Health applications of bioactive compounds from marine microalgae. **Life sciences**, v. 93, n.15, p. 479-86, 2013.

DERNER, R. B. et al. Microalgas, produtos e aplicações. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1959–1967, 2006.

DOKULIL, M.T.; TEUBNER, K. Cyanobacterial dominance in lakes. **Hydrobiologia** **438**, p. 1–12, 2000.

ERIKSEN, N. T. The technology of microalgal culturing. **Biotechnology Letters**, v.30, n.9, p. 1525-1536, 2008.

FRANCO, A.L.C. Biodiesel de microalgas: avanços e desafios. **Quím. Nova**, vol.36, nº3. 2013. p. 437-448.

FRANCO, A.L.C.; LÔBO, I.P.; CRUZ, R.S. Biodiesel de microalgas: avanços e desafios. **Química Nova**, v.36, n.3, p.437-448, 2013.

GONG, Y.; JIANG, M. Biodiesel Production with Microalgae as Feedstock: from Strains to Biodiesel. **Biotechnology Letters**, v. 33, p. 1269-1284, 2011.

GOUVEIA, L.; BATISTA, A. P.; SOUSA, I.; RAYMUNDO, A. BANDARRA, N.M. Microalgae in Novel Food Products. Food **Chemistry Research Developments**, v.2, p. 1-37, 2008.

GOUVEIA, L. **Microalgae as a Feedstock for Biofuels**. Springer. 2011.

HARUN, R., SINGH, M., FORDE, G. M., DANQUAH, M. K. Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 14, p. 1037-1047, 2010.

HUANG, G., CHEN, F., WEI, D., ZHANG, X. & CHEN, G. 2010. Biodiesel production by microalgal biotechnology. **Applied Energy**, v.87, p. 38-46, 2010.

JORQUERA, O. et al. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open and photobioreactors. **Bioresource technology**, v.101, n.4, p. 1406-1413, 2010.

KADIR, W. N. A.; LAM, M. K.; UEMURA, Y.; LIM, J.W. Harvesting and pre-treatment of microalgae cultivated in wastewater for biodiesel production: A review. **Energy Conversion and Management**, v.171, p. 1416-1429, 2018.

LARDON, L.; HÉLIAS, A.; SIALVE, B.; STEYER, J.P.; BERNARD, O. Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae. **Enviromental Sciene & Technology**, v.43, n.17, p.6475-6481, 2009.

LEITE, G.; ABDELAZIZ, A.; HALLENBECK, P.. Algal biofuels: challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, vol. 145. 2013. p. 134-141.

LEWITUS, A et al.; Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus. **Harmful algae**, v.8, n.1, p.3-13, 2008.

LI, Q., DU, W., LIU, D. Perspectives of microbial oils for biodiesel production. **Applied Microbiology and Biotechnology**. v. 80, p. 749-756, 2008.

LOURENÇO, S.O. **Cultivo de Microalgas Marinhas: Princípios e Aplicações**. São Carlos, Rima Editora. 2006.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Portugal, v.14, p.217-232, 2010.

MAITY, J. P.; BUNDSCHUH, V.; CHEN, C.; BHATTACHARYA, P. Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives: A mini review. **Energy**, p.1-10, 2014.

MOLINA GRIMA, E. et al. Downstream processing of cellmass and products. In: RICHMOND, A. (Ed). **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. Oxford: Blackwell Science, p.215-251, 2004.

MONTERO, M.F.; ARISTIZÁBAL, M.; REINA, G.G. Isolation of High-Lipid Content Strains of the Marine Microalgae *Tetraselmis suecica* for Biodiesel production by Flow Cytometry and Single-Cell Sorting, **Journal of Applied Phycology**, v. 23, p. 1053-1057, 2011.

MORENO-GARCIA, L.; ADJALLÉ, K.; BARNABÉ, S.; RAGHAVAN, G.S.V. Microalgae biomass production for a biorefinery system: Recent advances and the way towards sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.76, p. 493-506, 2017.

OLAIZOLA, M. Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace. **Biomolecular Engineering**, v.20, p.459-466, 2003.

PARK, J.; CRAGGS, R.; SHILTON, A. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. **Bioresource Technology**, v.102, n.1, p.35-42, 2011.

PEREIRA, D.A. **Controle da temperatura e irradiância em fotobiorreatores de placas planas para cultivo de microalgas**. Salvador. UFBA, 2014.77 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

PEREIRA, D. A. et al. Hollow glass microspheres for temperature and irradiance control in photobioreactors. **Bioresource technology**, v. 158, p. 98–104, abr. 2014.

PIRES, J. C.M.; ALVIM-FERRAZ, M. C.M; MARTINS, F.G; SIMÕES, M. Wastewater treatment to enhance the economic viability of microalgae culture. **Environ Sci Pollut Res**, 2013.

POSTEN, C.; CHEN, S. F. Microalgae Biotechnology. **Berlin: Springer International Publishing**, 2016.

PULZ, O.; GROSS, W. Valuable products from biotechnology of microalgae. **Applied Microbiology Biotechnology**, v.65, p.635-648, 2004.

REBOLLOSO-FUENTES, M. M., NAVARRO-PEREZ, A., GARCIA-CAMACHO, F., RAMOS-MIRAS, J. J., GUIL-GUERRERO, J. L. **Biomass nutrient profiles of the microalga *Nannochloropsis***. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 49, p. 2966-2972, 2001.

RICHMOND, A. Biological principles of mass cultivation. In: Richmond A, editor. **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. Blackwell. p. 125-177, 2004.

RIZWAN, M.; MUJTABA, G.; MEMON, S. A.; LEE, K.; RASHID, N. Exploring the potential of microalgae for new biotechnonology applications and beyond: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.92, p. 394-404, 2018.

RYAN, C. Cultivating Clean Energy: The Promisse of Algae Biofuels. **Terrapin Bright Green**, LLC e NRDC. 2009.

SEN, C. Algae Based Carbon Capture and Utilization Feasibility Study – Initial Analysis of Carbon Capture Effect Based on Zhoushan Case Pre-Study in China. **Master of Science Thesis Presented at Industrial Ecology Royal Institute of Technology**. Estocolmo, Suécia. 2012. 57 p.

SCHMITZ, R., DAL MAGRO, C., COLLA, L. M. Environmental applications of microalgae. **Revista CIATEC – UPF**. v. 4 (1), p. 48-60, 2012.

SCRAGG, A. H., ILLMAN, A. M., CARDEN, A., SHALES, S. W. Growth of microalgae with increased calorific values in a tubular bioreactor. **Biomass & Bioenergy**. v. 23, p. 67-73, 2002.

SHIMAMATSU H., Mass production of Spirulina, an edible microalga, **Hydrobiologia**, 512, 39–44, 2009.

SHUBA, E. S.; KIFLE, D. Microalgae to biofuels: ‘Promising’ alternative and renewable energy, review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.81, p. 743-755, 2018.

SILVA, N.F.P. **Crescimento de Microalgas em Águas Residuais: Produção de Biomassa e Remoção de Nutrientes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). 68 p, Universidade do Porto. Portugal. 2014.

SINGH, J.; GU, S. Commercialization potential of microalgae for biofuels production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, n.9, p.2596-2610, 2010.

SPOLAORE, P., JOANNIS-CASSAN, C., DURAN, E., ISAMBERT, A. Commercial applications of microalgae. **Journal of Bioscience and Bioengineering**. v. 101, p. 87-96, 2006.

TOMASELLI, L. The Microalgal Cell. In: Richmond, A. (Ed.) **Handbook of Microalgal Culture**. Oxford, UK: Blackwell Publishing. p. 3-19, 2004.

VALDÉS, F.J. et al. Estimation of CO₂ stripping/CO₂ microalgae consumption ratios in a bubble column photobioreactor using the analysis of the pH profiles. Application to *Nannochloropsis oculata* microalgae culture. **Bioresource Technology**, vol. 119. 2012. p. 1-6.

VARFOLOMEEV, S.D.; WASSERMAN, L.A. Microalgae as Source of Biofuel, Food, Fodder and Medicines. **Applied Biochemistry and Microbiology**, v. 47, n.9, p. 789-807, 2011.

VASUDEVAN, P.T.; FU, B. Environmentally Sustainable Biofuels: Advances in Biodiesel Research. **Waste Biomass Valor**, v.1, p. 47-63, 2010.

WIJFFELS, R.H.; BARBOSA, M.J. An Outlook on Microalgal Biofuels. **Science**, v. 329, n. 5993, p. 796-799, 2010.

WOJCIECHOWSKI, J. **Isolamento e cultivo de microalgas**, v.1, p. 10-15, 2013.

XU, L.; WEATHERS, J.; PAMELA, X.; XUE-ROUNG, LIU, C. Review: "Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities". **Engineering in Life Sciences**, v.9, n.3, p.178-189, 2009.

ZAMALLOA, C.; VULSTEKE, E., ALBRECHT, J. & VERSTRAETE, W. The technoeconomic potential of renewable energy through the anaerobic digestion of microalgae. **Bioresource technology**, v.102, n.2, p. 1149-1158, 2011.