



# **Abordagem sustentável de biomassas de micro e macroalgas**

**Gabriel Moura Barros**

## **Monografia em Engenharia de Bioprocessos.**

**Orientador**

**Prof. Eliana Mossé Alhadef, D.Sc.**

**Junho de 2021**

# **Abordagem sustentável de biomassas de micro e macroalgas**

***Gabriel Moura Barros***

Monografia em Engenharia de Bioprocessos submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro.

Aprovado por:

---

Yordanka Reyes Cruz, D.Sc.

---

Selma Gomes Ferreira Leite, D.Sc.

Orientado por:

---

Eliana Mossé Alhadeff, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Junho de 2021

Barros, Gabriel Moura.

Abordagem sustentável de biomassas de micro e macroalgas/ Gabriel Moura Barros.  
Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2021.

viii, 68 p.; il. (Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Escola de Química, 2021.

Orientador: Eliana Mossé Alhadef.

1. Microalgas. 2. Macroalgas. 3. Biorrefinaria 4. Monografia. (Graduação –  
UFRJ/EQ). 5. Eliana Mossé Alhadef. I. D.Sc

L'homme ne peut se transformer sans souffrances,  
car il est à la fois le sculpteur et le marbre.

Alexis Carrel

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família e a meus amigos próximos por sempre estarem por perto e pelo apoio incondicional. Agradeço também à orientadora Eliana por sua paciência e generosidade. Por fim, agradeço a todos aqueles que passaram pela minha vida e deixaram algo de bom.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia de Bioprocessos.

## **ABORDAGEM SUSTENTÁVEL DE BIOMASSAS DE MICRO E MACROALGAS**

Gabriel Moura Barros

Junho, 2021

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Eliana Mossé Alhadef, D.Sc.

Algas possuem uma grande diversidade de compostos com potencial de uso em diferentes áreas das atividades humanas em suas estruturas e, por isso, representam oportunidades para a geração de processos e produtos que explorem esse potencial. Sua produção é renovável e atende às necessidades do desenvolvimento sustentável. O trabalho busca mostrar as diferentes opções existentes e possíveis para o aproveitamento desse grande grupo de organismos ricos em recursos. Importantes biomoléculas podem ser sintetizadas por microalgas e macroalgas tornando viável o cultivo destas espécies em sistemas integrados denominados de biorrefinarias dando sustentabilidade e rentabilidade à vertente de produção dos biocombustíveis biodiesel e do etanol de terceira geração. Bioprodutos de alto valor agregado tais como: pigmentos/ carotenoides, ácidos graxos poli-insaturados, vitaminas, antioxidantes e outros como antifúngicos, antimicrobianos, agentes antivirais, toxinas, aminoácidos, proteínas e esteróis são sintetizados por microalgas. As macroalgas marinhas têm em sua composição carboidratos, proteínas, minerais e promotores de crescimento de plantas, produzindo ainda pigmentos proteicos com larga aplicação comercial. Neste contexto, um estudo mais detalhado do potencial das diferentes espécies de cultivares, dos sistemas de cultivo, dos processos de produção e uma avaliação preliminar dos aspectos mercadológicos são pontos relevantes para a descrição da relevância dos sistemas sustentáveis como as biorrefinarias, como a estratégia ideal para o crescimento da biotecnologia de algas (definida como “a aplicação tecnológica de algas (micro e macro) ou seus derivados para fazer ou modificar produtos ou processos para uso específico”). As análises SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*) para os cultivos de micro e macroalgas são apresentados como pontos que contribuem para uma análise destes sistemas produtivos. Como observação final as biorrefinarias integradas se apresentam com elevado potencial para um novo cenário de cadeia produtiva em países com ampla incidência solar e áreas adaptáveis aos processos de cultivo existentes e às inovações que possibilitem aumentos de rendimento e produtividade.

## ÍNDICE

<b>Capítulo I – Introdução</b>	1
<b>Capítulo II – Justificativa e Objetivo</b>	7
<b>Capítulo III – Revisão Bibliográfica</b>	11
III.1 – Microalgas	11
III.1.1 – Classificação	11
III.1.2 – Composição	12
III.1.3 – Cultivo	13
III.1.3.1 – Fotobiorreatores	16
III.1.3.2 – Sistemas abertos de cultivo	16
III.1.3.3 – Sistemas fechados de cultivo	18
III.1.4 – Microalgas de interesse comercial	26
III.1.5 – Principais bioprodutos	27
III.1.6 – Microalgas no Brasil e na América Latina	31
III.1.7 – Mercado	31
III.2 – Macroalgas	32
III.2.1 – Classificação	32
III.2.2 – Composição	33
III.2.3 – Cultivo	33
III.2.4 – Principais produtos	37
III.2.5 – Macroalgas no Brasil e na América Latina	38
III.2.6 – Mercado	38
<b>Capítulo IV - Desenvolvimento Sustentável e Biorrefinaria Integrada</b>	43
<b>Capítulo V – Perspectivas Futuras</b>	53
<b>Capítulo VI – Considerações Finais</b>	60
<b>Referências Bibliográficas</b>	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	<b>Espectro de fenótipos e tamanhos das diferentes espécies de algas</b>	<b>3</b>
<b>Figura 2</b>	<b>Setores e aplicações de biomassa algal</b>	<b>7</b>
<b>Figura 3</b>	<b>Diferentes espécies de microalgas com aplicações comerciais</b>	<b>12</b>
<b>Figura 4</b>	<b>Seção transversal de célula de microalga</b>	<b>13</b>
<b>Figura 5</b>	<b>Exemplos de diferentes sistemas abertos</b>	<b>17</b>
<b>Figura 6</b>	<b>Fotobiorreator aberto de camada fina</b>	<b>18</b>
<b>Figura 7</b>	<b>Diferentes tipos de sistemas fechados</b>	<b>19</b>
<b>Figura 8</b>	<b>Curvas de respostas da luz para a fotossíntese</b>	<b>22</b>
<b>Figura 9</b>	<b>Interações em fotobiorreatores</b>	<b>25</b>
<b>Figura 10</b>	<b>Diferentes exemplos de ficobiliproteínas</b>	<b>28</b>
<b>Figura 11</b>	<b>Suplemento de ácido docosahexaenoico</b>	<b>29</b>
<b>Figura 12</b>	<b>Cultivo de algas marinhas</b>	<b>34</b>
<b>Figura 13</b>	<b>Esquema de balsa flutuante</b>	<b>34</b>
<b>Figura 14</b>	<b>Representação esquemática de cultivo em long-line</b>	<b>35</b>
<b>Figura 15</b>	<b>Cultivo de macro algas em água salgada</b>	<b>36</b>
<b>Figura 16</b>	<b>Produção percentual por espécies e países produtores</b>	<b>39</b>
<b>Figura 17</b>	<b>Maiores produtores</b>	<b>40</b>
<b>Figura 18</b>	<b>Esquema de uma biorrefinaria integrada</b>	<b>44</b>
<b>Figura 19</b>	<b>Modelo de biorrefinaria em loop fechado autossustentável</b>	<b>55</b>



## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Divisão dos maiores grupos de algas	4
<b>Tabela 2</b>	Concentração em peso seco	12
<b>Tabela 3</b>	Formas de cultivo de microalgas	14
<b>Tabela 4</b>	Principais aspectos técnicos para cultivo	15
<b>Tabela 5</b>	Comparação de sistemas abertos	20
<b>Tabela 6</b>	Características das diferentes tecnologias	23
<b>Tabela 7</b>	Produção global de gêneros relevantes	26
<b>Tabela 8</b>	Quantidades e valor de substâncias selecionadas	31
<b>Tabela 9</b>	Demandas de mercado	32
<b>Tabela 10</b>	Composição química percentual	33
<b>Tabela 11</b>	Espécies de algas marinhas e os métodos de cultivo	36
<b>Tabela 12</b>	Produção mundial dos principais gêneros	39
<b>Tabela 13</b>	Produção mundial em peso seco	40
<b>Tabela 14</b>	Preços de alguns produtos importantes	41
<b>Tabela 15</b>	Biorrefinarias atualmente existentes	48
<b>Tabela 16</b>	Análise SWOT para macroalgas	57
<b>Tabela 17</b>	Análise SWOT para microalgas	58

## Capítulo I – Introdução

O termo “algas” não possui significado taxonômico, ou seja, não tem fundamentação teórica científica e é usado geralmente para se referir e identificar um conjunto de organismos pertencentes a diferentes formas de classificação da literatura que possuem em comum a utilização de oxigênio e realização de fotossíntese em geral. Tais organismos não possuem raízes, caules, folhas nem tecidos vasculares bem definidos, não formam embriões e todas suas células são potencialmente férteis com a ausência de uma camada de células protetoras nas mesmas. Pelo termo “algas” encontram-se várias formas diferentes de seres com características diversas e que apresentam grande adaptação às mais variadas condições do meio ambiente, com habitats naturais distintos, forma com a qual se alimentam, tamanho, organização celular, coloração e reprodução. Tal termo foi escolhido sendo um nome popular sem respaldo científico. (BARSANTI e GUALTIERI, 2014)

As microalgas foram produzidas comercialmente a partir do período da segunda guerra mundial na Alemanha como fonte de proteína alternativa aos animais e como fonte de energia no período pós-guerra para a geração de metano, mas seu comércio com êxito foi encontrado na Ásia, onde o gênero *Chlorella* prosperou como produto desde os anos sessenta. (GRAHAM e WILCOX, 2000)

A produção de algas também pode ser vista para além dos organismos em si, já que os outros produtos secundários, às vezes tratados como resíduos, possuem valor agregado, variando desde biopolímeros até hidrogênio, passando por pigmentos, lipídeos, fertilizantes, polissacarídeos e biocombustíveis. Sua alta atividade fotossintética contribui para a redução do efeito estufa e suas conseqüentes alterações climáticas e sua absorção de dióxido de carbono auxilia na remoção de gases da atmosfera. (FONSECA, 2016)

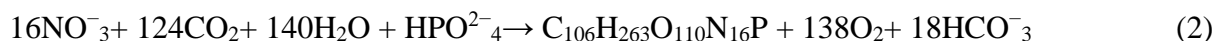
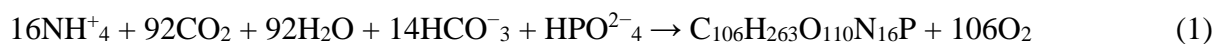
Em relação a tamanho há uma ampla variedade, desde células com média de 1 micrômetro de diâmetro até organismos que se estendem por 60 metros de comprimento. É estimado que o número aproximado de espécies conhecidas atualmente no planeta seja de 72500 entre macroalgas e microalgas e há uma estimativa de aproximadamente dez milhões de espécies no total, tendo a maior representatividade nas microalgas, organismos visíveis apenas com a utilização da microscopia. (BARSANTI e GUALTIERI, 2014)

A classificação consistente desse extenso grupo de organismos enfrenta dificuldades com os modelos tradicionais de estudo e análise, sendo atualizada conforme novos avanços nos conhecimentos genéticos e estruturais são feitos. Atualmente, aceita-se a distribuição desses seres vivos em 4 reinos distintos passando por 11 filos: cianobactérias, glaucófitas, rodófitas, clorófitas, carófitas, haptófitas, criptófitas, ocrófitas, cercozoários, mizozoa e euglenozoa. (BARSANTI e GUALTIERI, 2014)

É importante ressaltar que somente um número pequeno de algas no total foi estudado até o dia de hoje, constituindo assim um importante alvo de futuras pesquisas para descoberta de substâncias de interesse nos mais variados ramos da indústria e ciência. (FONSECA, 2016)

Microalgas podem ser empregadas no tratamento de efluentes, sejam eles domésticos, industriais ou provenientes da agricultura, removendo nutrientes e metais pesados com eficiência. Essa grande capacidade de adsorção pode ser utilizada para fins de biomonitoramento ou biorremediação. (RAVINDRAN e colaboradores, 2016)

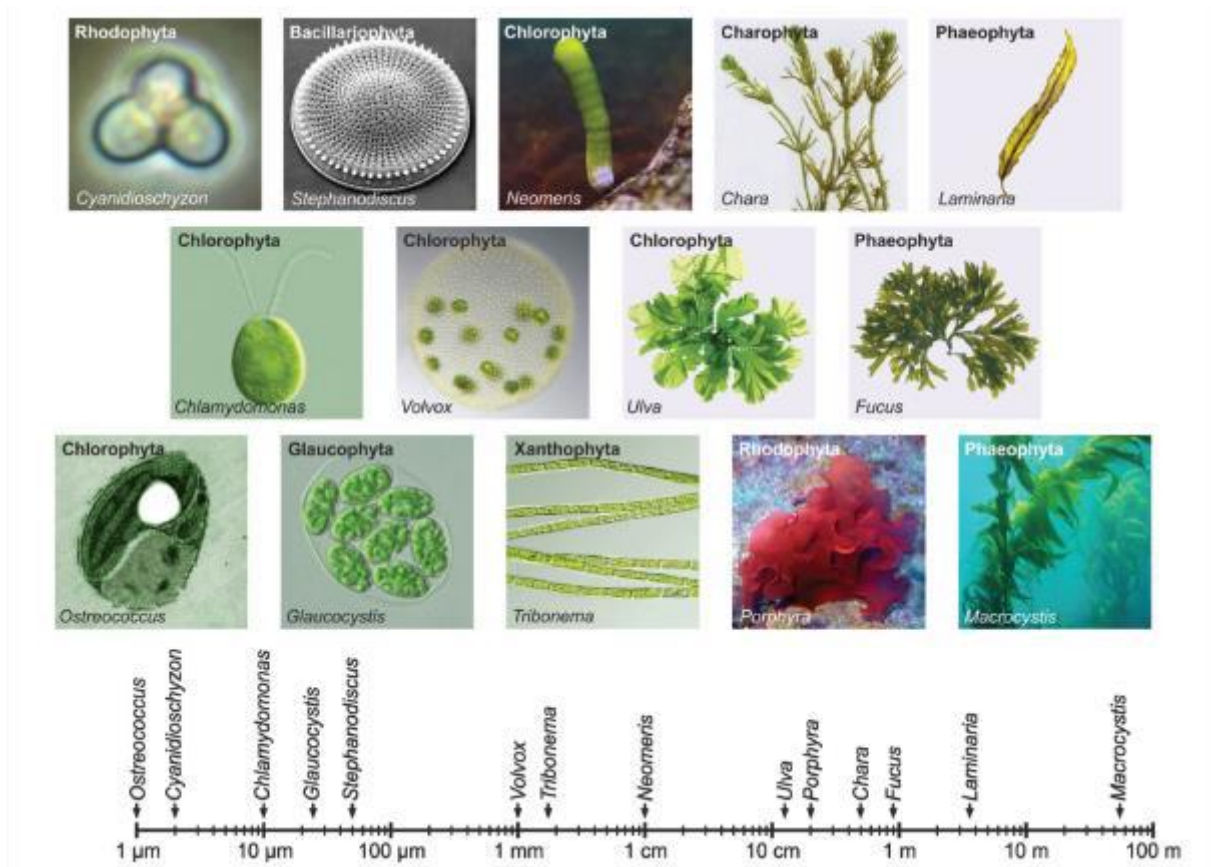
O crescimento das microalgas envolve a fotossíntese que utiliza compostos químicos inorgânicos, como por exemplo o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) como fonte de matéria. As reações bioquímicas que envolvem o processo de crescimento celular estão apresentadas nas equações 1 e 2, onde a amônia e o nitrato são as moléculas assimiladas para suprir a fonte de nitrogênio necessária para a síntese de proteínas e macromoléculas como ácidos nucleicos e desoxirribonucleicos.



A fórmula química que representa as células de algas está representada por C<sub>106</sub>H<sub>263</sub>O<sub>110</sub>N<sub>16</sub>P nas equações 1 e 2 acima. Além dos elementos químicos nutricionais o crescimento de algas depende da energia luminosa. As equações 1 e 2 mostram o desempenho das algas em processos de tratamento de águas visando o crescimento celular e são representativas de outras situações em geral. (RANDRIANARISON e ASHRAF, 2017).

Na Figura 1 pode ser observada a variedade de espécies de algas e o amplo espectro de fenótipos e dimensões encontrados no meio ambiente. As algas variam no formato e tamanhos da menor à maior espécie em um fator de aproximadamente  $10^8$ . (HALLMANN, 2015)

Figura 1. Espectro de fenótipos e tamanhos das diferentes espécies de algas. A ilustração apresenta alguns exemplos, tais como: *Ostreococcus* (Chlorophyta), *Cyanidioschyzon* (Rhodophyta), *Chlamydomonas* (Chlorophyta), *Glaucocystis* (Glaucophyta), *Stephanodiscus* (Bacillariophyta), *Volvox* na forma de colônia (Chlorophyta), *Tribonema* (Xanthophyta), *Neomeris* (Chlorophyta), *Ulva* (Chlorophyta), *Porphyra* (Rhodophyta), *Chara* (Charophyta), *Fucus* (Phaeophyta), *Laminaria* (Phaeophyta), *Macrocystis* (Phaeophyta). Uma escala logarítmica é utilizada para indicar o tamanho aproximado das espécies citadas. Fotos por Herve Moreau (*Ostreococcus*), Frank E. Round (*Stephanodiscus*), Christian Fischer (*Chara*), Claire Fackler (*Macrocystis*) e HALLMANN (2015)



As algas podem ser inseridas em 10 grandes grupos (*phylas*) em relação à aparência microscópica. A tabela 1 apresenta estes 10 grupos divididos em relação à diversidade ecológica e taxonômica, para espécies aquáticas e terrestres em geral, incluindo de algas verdes e às

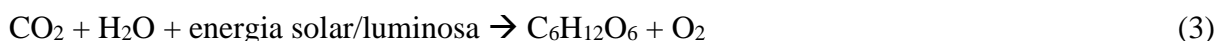
diatomáceas refletindo o largo espectro de ocorrência e a habilidade para se adaptar à vida nestes diferentes *habitats*. (RANDRIANARISON e ASHRAF, 2017)

Tabela 1. Divisão dos maiores grupos de algas segundo as espécies e aparência microscópica

<b>Divisão</b>	<b>Filo</b>	<b>Índice de biodiversidade</b>	<b>Coloração típica</b>	<b>Morfologia típica de espécies de água doce</b>	<b>Mobilidade</b>	<b>Exemplos</b>
Algas azuis	<i>Cyanophyta</i>	297	Verde azulado	Microscópica ou visível, geralmente colonial	Regulação da fluutuabilidade, algumas deslizam	<i>Synechocystis</i>
Algas verdes	<i>Chlorophyta</i>	992	Verde grama	Microscópica ou visível, unicelular ou colônias filamentosas	Algumas unicelulares apresentam flagelos	<i>Chlamydomonas</i>
Euglenóides	<i>Euglenophyta</i>	124	Várias cores	Microscópica, unicelular	Maioria com flagelos	<i>Euglena</i>
Algas amarelo-esverdeadas	<i>Xanthophyta</i>	73	Verde amarelo	Microscópica, unicelular ou filamentosas	Gametas flagelados	<i>Ophiocytum</i>
Dinoflagelados	<i>Dinophyta</i>	54	Castanho	Microscópica unicelular	Todos com flagelos	<i>Ceratium</i>
Criptomonades	<i>Cryptophyta</i>	15	Várias cores	Microscópica unicelular	Maioria com flagelos	<i>Rhodomonas</i>
Crisófitas	<i>Chrysophyta</i>	115	Marrom amarelado	Microscópica unicelular ou colonial	Alguns com flagelos	<i>Mallomonas</i>
Diatomáceas	<i>Bacillariophyta</i>	1652	Marrom amarelado	Microscópica unicelular ou colônias filamentosas	Deslizamento no substrato	<i>Stephanodiscus</i>
Algas vermelhas	<i>Rhodophyta</i>	22	Vermelho	Microscópico ou visível, unicelular ou colonial	Fixas	<i>Batrachospermum</i>
Algas pardas	<i>Phaeophyta</i>	2	Castanho	Visível	Fixas	<i>Pleurocladia</i>

Quando cultivadas em sistemas aquosos aerados, as células de algas com fácil acesso à luz, gás carbônico e demais nutrientes desabilitam o sistema não-produtivo (heterotrófico) para manutenção e ativam o crescimento fotossintético, independentemente de ciclo de vida sazonal. (BENEDETTI e colaboradores, 2018)

A fotossíntese, realizada por algas (macroalgas, microalgas e cianobactérias) utiliza a luz solar para metabolizar o carbono inorgânico na forma da molécula de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e produzir a glicose (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), uma molécula orgânica de alto valor energético, e liberar oxigênio (O<sub>2</sub>). A glicose será a molécula base, também chamada de bloco de construção, para que as células que realizam a fotossíntese produzam o crescimento celular. A equação (3) apresenta a equação básica para a fotossíntese, que envolve uma molécula de água (H<sub>2</sub>O):



O processo envolve o uso de energia solar, que é considerada uma fonte renovável de energia para prover a força motriz do crescimento celular, requer a captura e assimilação de um gás considerado poluente (CO<sub>2</sub>) e um teor de água para que a vida celular seja viabilizada no meio ambiente aquático e terrestre. (RANDRIANARISON e ASHRAF, 2017).

No começo do milênio, ANASTAS e ZIMMERMAN cunharam os 12 princípios para a química verde buscando se atentar às necessidades presentes na realização dos processos químicos e a sustentabilidade para as gerações futuras:

- Prevenir a geração de resíduos;
- Economia atômica buscando a incorporação de todos os materiais usados no processo no produto final;
- Sínteses químicas que apresentem menos riscos para a saúde humana e o meio ambiente;
- Projeto de produtos seguros que realizem a função proposta e não sejam tóxicos;
- Redução no uso de solventes e auxiliares e escolha dos menos tóxicos e mais seguros;
- Projetar processos buscando eficiência energética;
- Usar matérias-primas renováveis;

- Reduzir a formação de moléculas derivadas;
- Emprego de reagentes de catálise mais seletivos o quanto for possível;
- Gerar produtos que se tornam inócuos e não persistam no meio ambiente ao final da função;
- Prevenção da poluição através de análises em tempo real;
- Prevenir acidentes com substâncias e formas de uso intrinsecamente seguros.

Sosa-Hernández e colaboradores (2018) relacionam os princípios da química verde com os processos de cultivo de algas, observando nestes os seguintes aspectos:

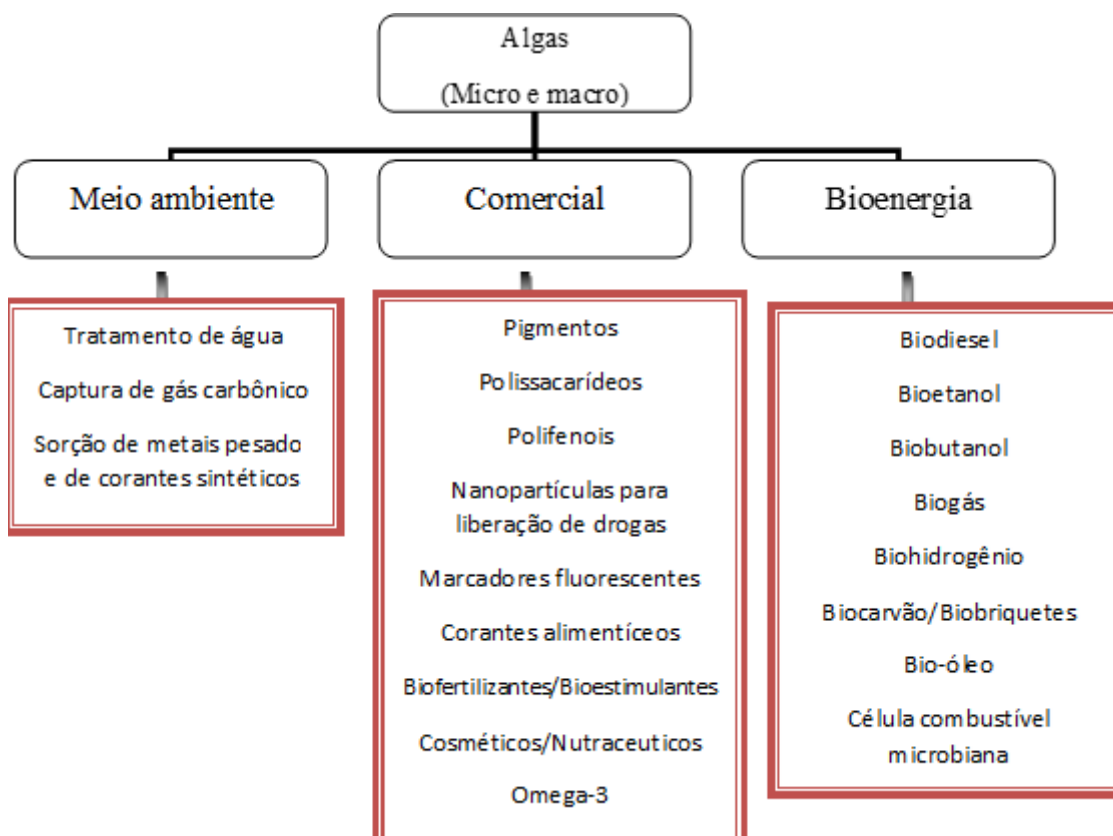
- resguardam o ecossistema natural;
- não contribuem para a escalada de preços geral;
- provocam a atenção ao redor do mundo para as questões climáticas;
- estimulam o desenvolvimento sustentável de regiões rurais;
- reduzem as atividades emissoras de gases do efeito estufa;
- fortalecem e aumentam a diversidade de fontes de energia renováveis;
- diminuem a dependência de petróleo e seus derivados;
- evitam o consumo exagerado de combustíveis fósseis.

## Capítulo II – Justificativa e Objetivo

Algas possuem uma grande diversidade de compostos com potencial de usos em diferentes áreas das atividades humanas em suas estruturas e, por isso, representam oportunidades para a geração de processos e produtos que explorem esse potencial. Sua produção é renovável e atende às necessidades do desenvolvimento sustentável. O trabalho busca mostrar as diferentes opções existentes e possíveis para o aproveitamento desse grande grupo de organismos ricos em recursos.

A concentração dos elementos carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N) em algas é maior do que as observadas na madeira, sendo a composição elementar característica de cada espécie. Whitton e colaboradores (2016) apud Sudhakar e colaboradores (2019) reportaram uma razão molar em células de microalgas marinhas C:N:P de 106:16:1. Esta razão molar torna as microalgas uma matéria-prima importante para setores como de energia, biorremediação, biofertilizantes, farmacêutico e imunológico. A figura 2 ilustra o potencial da utilização das algas (micro e macroalgas) e aplicações no meio ambiente, comerciais e de energia.

Figura 2. Setores e aplicações de biomassa algal (WHITTON, 2016)





Importantes biomoléculas podem ser sintetizadas por microalgas: pigmentos/carotenoides (betacaroteno, astaxantina, luteína e zeaxantina, clorofila II, ficocianina), ácidos graxos poli-insaturados (ácido docosahexaenoico, ácido eicosapentaenoico, ácido araquidônico, ácido  $\gamma$ -linoleico), vitaminas (A, B1, B6, B12, biotina, B2, ácido nicotínico, B5, ácido fólico), antioxidantes (catalases, polifenóis, superoxi dismutase, tocoferóis), e outros como antifúngicos, antimicrobianos, agentes antivirais, toxinas, amino ácidos, proteínas e esteróis. (ENAMALA e colaboradores, 2018).

Sudhakar e colaboradores (2019) reportam que macroalgas marinhas tem em sua composição carboidratos (agar, alginato, fucoidano, laminarina, ulvana, celulose, carragenina, etc.), proteínas, minerais (macro e micro elementos) e promotores de crescimento de plantas. Também produzem pigmentos proteicos como ficobiliproteínas com larga aplicação comercial.

O foco atual para o conceito de biorrefinarias e sustentabilidade é atender à condição de zero resíduos com o máximo de aproveitamento da matéria-prima. Neste contexto, as algas (macro e micro) podem ser cultivadas como biomassa cuja composição bioquímica as tornam atraentes possibilitando seu cultivo e processamento em sequência de etapas de operações em cascata para extrair as biomoléculas de interesse de forma a atender as várias demandas de mercado. (MISHRA e colaboradores, 2019)

A bioeconomia é descrita como a produção sustentável de recursos biológicos renováveis e seu processamento em produtos alimentícios, alimentos para animais e bens industriais e em bioenergia. (European Commission, Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.)

A energia proveniente da biomassa como biodiesel, bioetanol, biometano, biobutanol tem papel preponderante no que se refere ao desenvolvimento sustentável sendo regulamentado e estimulado por políticas nacionais (<http://www.anp.gov.br>). Cerca de 45% da energia e 18% dos combustíveis consumidos no Brasil já são renováveis.

A produção de biocombustíveis a partir de microalgas representa a chamada terceira geração de combustíveis. O biodiesel é um combustível biodegradável derivado de biomassa que pode ser produzido a partir de gorduras animais e oleaginosas como soja, palma, girassol, babaçu, amendoim, mamona e pinhão-manso. A soja é a principal matéria-prima utilizada no Brasil. O produto final (Biodiesel B100) deve cumprir as especificações físico-químicas determinadas pela ANP para que possa substituir total ou parcialmente o óleo diesel de petróleo

em motores ciclodiesel automotivos (de caminhões, tratores, camionetas, automóveis, etc.). O biodiesel puro (B100) é adicionado obrigatoriamente ao diesel de petróleo em proporções de acordo com a legislação brasileira em vigor desde 2008. (<http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>; <https://www.bsbios.com/media/adminfiles/36.jpg>)

Entre janeiro e junho de 2008, a mistura foi de 2%. Observa-se um aumento gradual do percentual de B100 de janeiro de 2008 a março de 2019 na faixa de 2 a 9% ao longo cerca de 10 anos. Entre março de 2017 e fevereiro de 2018 o teor de mistura de biodiesel ao óleo diesel foi de 8% e, entre março de 2018 e agosto de 2019 foi de 10%. A partir de setembro de 2019 a mistura passou a ser de 11%, em volume, conforme Lei 13.263/2016. Em março de 2020 o percentual mínimo de biodiesel no diesel passou a ser de 12% segundo estabelecido por resolução aprovada em agosto de 2019 pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Como determinado na [Resolução CNPE nº 16, de 29 de outubro de 2018](#) a meta é a cada ano aumentar em 1% o teor mínimo de biodiesel no óleo diesel até atingir o limite de 15% em 1º de março de 2023, informa a ANP. (<http://www.anp.gov.br/noticias/5633-oleo-diesel-brasileiro-passa-conter-minimo-12-biodiesel>)

A [Lei nº 13.576/2017](#) institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Como objetivos e metas podem ser destacadas propostas e estratégias para: 1- Fornecer ferramentas para o cumprimento dos compromissos determinados pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris; 2- Promover a adequada expansão dos biocombustíveis na matriz energética, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis; e 3- Assegurar previsibilidade para o mercado de combustíveis, induzindo ganhos de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, comercialização e uso de biocombustíveis. (<http://www.anp.gov.br>)

O governo interessado em viabilizar a introdução de biocombustíveis na matriz energética nacional propôs o RenovaBio que estabelece metas nacionais anuais de descarbonização para o setor de combustíveis e de incentivo do aumento da produção e da participação de biocombustíveis na matriz energética de transportes nacional. Estas metas visam a redução de emissões gasosas e foram definidas para o período de 2019 a 2029 pela Resolução CNPE nº 15, de 24 de junho de 2019. A contribuição individual de cada produtor para a mitigação de uma quantidade específica de gases de efeito estufa em relação ao seu

substituto de origem fóssil será quantificado em termos de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. (<http://www.anp.gov.br>)

Desde o fim da década de 1970 o Brasil tem utilizado em larga escala o bioetanol combustível. O etanol combustível do Brasil é produzido por fermentação tradicionalmente por tecnologia agrícola do cultivo de cana-de-açúcar, e mais recentemente do milho. As usinas de cana-de-açúcar utilizam o bagaço residual para produzir calor e energia, resultando em preço competitivo e um equilíbrio de alta energia (razão produção de energia / energia gasta), que varia de 8,3 para condições médias a 10,2 na produção com melhores práticas. A [Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos](#) designou o etanol brasileiro como um biocombustível avançado, tendo em vista a redução de até 61% das emissões totais na [análise do ciclo de vida de gases do efeito estufa](#) em 2010. ([https://pt.wikipedia.org/wiki/Etanol\\_como\\_combustível\\_no\\_Brasil](https://pt.wikipedia.org/wiki/Etanol_como_combustível_no_Brasil)) A adição de etanol anidro à gasolina evoluiu de uma mistura de 2% em 1931, para 10% a 12% em 1976, sucessivamente passando a uma faixa de 18% a 20%, 22%, 25%, atingindo os atuais 27% a partir de março de 2015. O veículo a etanol foi o precursor do carro flex, capaz de utilizar qualquer combinação de gasolina C (mistura de etanol anidro e gasolina, ou gasool, atualmente E27) e etanol hidratado (E100). A partir de 16/03/2015, o teor de álcool anidro na gasolina comum e aditivada é de 27%. O teor adicionado à gasolina premium é de 25%. (<https://petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/composicao-de-precos-de-venda-ao-consumidor/gasolina/>)

Este trabalho tem por objetivo avaliar o panorama atual do cultivo de algas (micro e macro) para a obtenção de produtos e coprodutos de importância comercial como biocombustíveis e biomoléculas de elevado valor agregado.

## Capítulo III – Revisão Bibliográfica

### III.1 – Microalgas

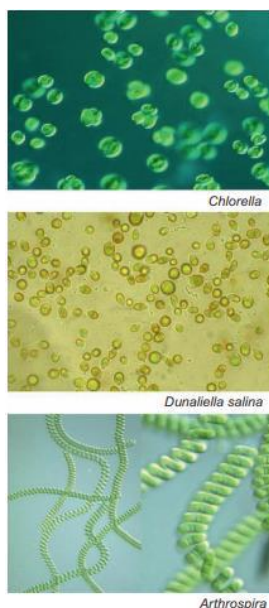
#### III.1.1 – Classificação

Microorganismos unicelulares que realizam fotossíntese responsáveis por 50% do gás oxigênio do planeta e base da cadeia alimentar. Microalgas possuem crescimento e desenvolvimento acelerados quando comparadas a vegetais superiores e abrigam uma variedade maior de compostos em sua estrutura, como lipídeos, carboidratos, pigmentos e antioxidantes. Devido a variada adaptação, algumas são capazes de suportar condições extremas como altas temperaturas ou salinidade elevada. (CHEN, XU, VAIDYANATHAN, 2017)

Entre as classes mais abundantes encontram-se as cianobactérias (*Cyanophyceae*), as diatomáceas, pertencentes à classe *Bacillariophyceae*, as algas verdes, da classe *Chlorophyceae*, e as espécies da classe *Chrysophyceae*, totalizando mais de 100 000 espécies distintas. (DEMIRBAS, DEMIRBAS 2010)

Segundo Kim e Taylor (2011), as espécies de microalgas cultivadas visando a comercialização de subprodutos produzidos através de suas vias metabólicas são: *Chlorella*, *Dunaliella salina* e a *Arthrospira (Spirulina)*, que se apresentam em diferentes formas como ilustrado na figura 3.

Figura 3. Diferentes espécies de microalgas com aplicações comerciais (KIM, TAYLOR, 2011)



### III.1.2 – Composição

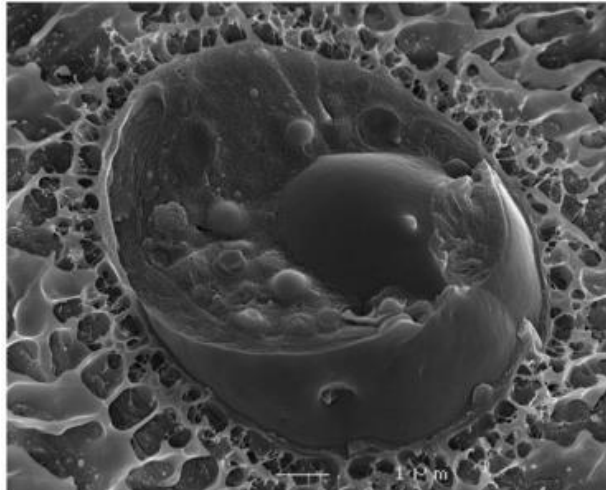
A composição celular das microalgas (Tabela 2) varia de acordo com a espécie e depende da forma de cultura e condições da localização. Fatores ambientais como luz, temperatura, pH, presença e tipos de nutrientes, entre outros, são capazes de afetar os constituintes da célula. (RAVINDRAN e colaboradores, 2016)

Tabela 2. Concentração em peso seco das principais macromoléculas. (TRIPATHI, KUMAR, 2017)

Microalga	Proteína	Carboidrato	Lipídeo
<i>Chlorella vulgaris</i>	61 - 66	19	18
<i>Dunaliella salina</i>	28 - 30	16	7 - 8
<i>Scenedesmus obliquus</i>	42	19	32,5
<i>Spirulina sp.</i>	60 – 65	14 – 22	5 - 10
<i>Tetraselmis maculate</i>	52	15	3

A figura 4 apresenta algumas organelas constituintes das células no citoplasma.

Figura 4. Seção transversal de célula de microalga (WAGEMANN, TIPPKÖTTER, 2019)



Após carbono, nitrogênio é o nutriente mais significativo presente na biomassa algal e seus componentes celulares, correspondendo a aminoácidos, proteínas, material genético e enzimas, enquanto fósforo participa de processos metabólicos e é essencial para o crescimento celular, representando de 1 a 3% do peso seco da biomassa. (RAVINDRAN e colaboradores, 2016)

Pigmentos, entre eles os carotenoides, atuam como compostos antioxidantes e são importantes para a manutenção da vida algal devido à produção de oxigênio gerada pelo processo de fotossíntese. Assim, com o aumento da concentração molecular de oxigênio e sua posterior transformação em espécies reativas de oxigênio (radicais livres) devido à interação com radiação ultravioleta, sua concentração pode ser diminuída com a ação de antioxidantes, minimizando os danos que poderiam causar nas células. (FONSECA, 2016)

É observado um comportamento metabólico flexível em algas que apresentam um tempo de duplicação celular na faixa de 1 a 6 dias em espécies que apresentaram uma taxa específica de crescimento na faixa de 0,12 a 4,6 dia<sup>-1</sup> (THANGAVEL e colaboradores, 2017). SILKINA e colaboradores (2019) em recente estudo realizado em escala piloto (1 500 L) com cultivo de microalgas na biorremediação de resíduos aquosos (agrícola, municipal, aquacultura e sintético) obteve valores de taxa específica de crescimento na faixa de 0,41 a 0,62 dia<sup>-1</sup> (tempo de duplicação entre 1,11 a 1,68 dias). A literatura reporta valores de concentração celular de 10 g (peso seco)/L em cultivo heterotrófico e de 6 g (peso seco)/L em cultivo fotoautotrófico. (BENEDETTI e colaboradores, 2018)

### III.1.3 – Cultivo

Os processos metabólicos são parecidos para todos os seres fotossintetizantes. O fator mais importante é a assimilação de nutrientes do ambiente através de vários processos bioquímicos e de transporte. As principais mudanças provocadas pelo metabolismo são a massa das células, volume, densidade, conteúdo proteico e de vitaminas e RNA. O carbono é incorporado na forma glicose e armazenado na forma de glicose-6-fosfato, participando dos processos de armazenamento, crescimento e respiração. Nitrogênio proveniente do íon amônio é utilizado na síntese dos aminoácidos existentes na célula. (ENAMALA e colaboradores, 2018)

O modo de cultivo adotado pode influenciar na produtividade e custo efetivo, sendo de extrema importância a seleção da estratégia de propagação de células. Na tabela 3 estão apresentados quatro modos de cultivo de microalgas: fotoautotrófico, heterotrófico, fotoheterotrófico e mixotrófico. O crescimento de microalgas ocorre geralmente através da fixação de carbono inorgânico (gás carbônico) dissolvido e pela absorção de energia solar. As microalgas podem fazer fotossíntese e apresentar metabolismo fotoautotrófico. Algumas espécies de microalgas também são heterotróficas e assimilam compostos orgânicos como fonte de carbono e de energia, não requerendo incidência luminosa para suprir a fonte de energia. O crescimento heterotrófico se dá na presença de oxigênio, e a assimilação de substrato orgânico produz energia através da fosforilação oxidativa e consumo de oxigênio que atua como receptor final de elétrons. No cultivo mixotrófico as microalgas utilizam simultaneamente carbono inorgânico (CO<sub>2</sub>) e orgânico na presença de luz, ocorrendo simultaneamente metabolismo fotoautotrófico (fotossíntese) e heterotrófico (associado à respiração aeróbica). Várias espécies tem a habilidade de modificar o metabolismo de crescimento entre fotoautotrófico e heterotrófico. Microalgas mixotróficas usam fontes diferentes de carbono para síntese de macromoléculas e de energia. (PEREZ-GARCIA e YOAVA BASHAN, 2015)

Tabela 3. Formas de cultivo de microalgas (PEREZ-GARCIA e YOAVA BASHAN, 2015)

<b>Modo de crescimento</b>	<b>Fonte de energia</b>	<b>Fonte de carbono</b>	<b>Presença de luz</b>	<b>Metabolismo</b>
Fotoautotrófico	Luz	Inorgânica	Obrigatória	Não há alteração entre as fontes
Heterotrófico	Orgânica	Orgânica	Não requer	Há modificação entre fontes

Mixotrófico	Luz e orgânica	Inorgânica e orgânica	Não obrigatória	Uso simultâneo
-------------	----------------	-----------------------	-----------------	----------------

Perez-Garcia e colaboradores (2011) reportaram ser de interesse no cultivo em grande escala as espécies heterotróficas tendo em vista que estas espécies estão habilitadas a consumir fontes de carbono simples, de baixo custo e disponíveis tais como glicose, acetato e glicerol. Estes substratos são comumente utilizados nas indústrias de fermentação para o cultivo de outras classes de microrganismos (leveduras, fungos filamentosos e bactérias), sendo assim, de mais fácil adaptação das instalações industriais para o cultivo destas espécies de microalgas.

Perez-Garcia e Yoav Bashan (2015) reportaram os principais aspectos técnicos para cultivo de microalgas para as diferentes espécies: fotoautotróficas, heterotrófica e mixotróficas que estão compilados na tabela 4.

Tabela 4. Principais aspectos técnicos para cultivo (PEREZ-GARCIA, BASHAN, 2015)

Aspecto técnico	Fotoautotrófico	Heterotrófico	Mixotrófico
<b>Fonte de energia</b>	Luz	Carbono orgânico	Luz e carbono orgânico
<b>Fonte de carbono</b>	Carbono inorgânico	Carbono orgânico	Inorgânica e orgânica
<b>Uso de fonte renovável de energia</b>	Sim	Não a princípio	Parcialmente
<b>Produtividade</b>	Baixa	Média	Alta
<b>Presença de luz</b>	Obrigatória	Não requerida	Não obrigatória
<b>Fator limitante para o crescimento</b>	Luz	Oxigênio	Luz e oxigênio
<b>Emissão de CO<sub>2</sub></b>	Emissão negativa, absorção	Emissão positiva	Neutra, CO <sub>2</sub> produzido e consumido
<b>Tipo de biorreator</b>	Fotobiorreator aberto ou fechado em painéis ou tubos	Fermentadores	Fotobiorreator aberto ou fechado em painéis ou tubos
<b>Disponibilidade de vasos de biorreator</b>	Produção estabelecida	Disponíveis comercialmente	Produção artesanal
<b>Razão superfície/volume do biorreator(m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	Alta	Baixa	Alto



<b>Controle dos parâmetros operacionais do biorreator</b>	Alto	Alto	Alto
<b>Esterilidade</b>	Geralmente higienizados	Esterilização necessária	Recomendável mas não necessária
<b>Risco de contaminação</b>	Baixo	Alto	Alto
<b>Dificuldade de concentração</b>	Alta devido à diluição da concentração de biomassa	Baixa devido à concentração densa de biomassa	Baixa devido à concentração densa de biomassa
<b>Custo de instalação do biorreator</b>	Alto por unidade de volume	Baixo por unidade de volume	Alto por unidade de volume
<b>Custo de operação do biorreator</b>	Baixo por kg de biomassa	Médio por kg de biomassa	Alto por kg de biomassa

### III.1.3.1 – Fotobiorreatores

O cultivo de microalgas pode ser realizado em fotobiorreatores, que podem ser classificados em sistemas reacionais abertos ou fechados. Nos sistemas abertos o meio de cultivo e células estão em contato com o ar e o controle das variáveis de processo como temperatura, pH, teor de nutrientes, concentração de microalgas, concentração de bioprodutos, intensidade de luz, entre outras, não são adequadamente mensuradas e monitoradas. O rendimento do bioprocessamento pode ser influenciado uma vez que estes sistemas abertos estão vulneráveis à contaminação por outras espécies microbianas. Nos sistemas ditos fechados é possível monitorar as variáveis de processo e minimizar problemas de contaminação (KOTHARI e colaboradores, 2017)

### III.1.3.2 – Sistemas abertos de cultivo

Piscinas abertas são sistemas simples de cultivo de algas. Podem ocupar desde pequenas áreas até se estender por uma grande superfície. Utilizam como fonte de carbono o CO<sub>2</sub> presente no ar atmosférico. A baixa dissolução do ar na água pode limitar a taxa de crescimento e, conseqüentemente, o rendimento por área. São limitadas pela lenta difusão de nutrientes e as células estão sujeitas a sofrerem flotação e sedimentação, impactando no alcance da luz. Para

contornar tais problemas um agitador pode ser utilizado, sendo um braço central em rotação em sistemas circulares ou um agitador em forma de pedal para os sistemas do tipo pista de corrida, que consistem em longos segmentos estreitos e provoca a circulação da água presente. Operam à temperatura ambiente e possuem poucas formas de controlar a mesma, sendo ainda suscetíveis a agentes predatórios e abióticos e proliferação de organismos indesejáveis. Recomendadas para espécies dominantes que sejam resistentes. (FAO, 2009)

A Figura 5 (FAO, 2009) mostra exemplos de diferentes sistemas abertos com tamanhos variados



As lagoas do tipo pista de corrida possuem baixos custos de construção e operação, podendo ser instaladas em áreas degradadas ou não destinadas à prática da agricultura, não concorrendo com a produção das lavouras. São a forma mais simples de cultivo de microalgas, podendo atingir até 10 000 m<sup>2</sup> de área superficial e entre 20 a 30 centímetros de profundidade.

Como são sistemas abertos, estão sujeitos às variações de tempo e clima que podem afetar a produtividade, podem sofrer contaminação e assim manter apenas a monocultura da espécie desejada tornar-se mais dificultosa, requerem grande espaço além de dependerem de uma fonte de água limpa contínua e exigem métodos de processamento mais trabalhosos de acordo com o produto desejado. (BAJPAI, PROKOP, ZAPPI, 2013)

Fotobiorreatores de camada fina apresentam fluxo constante de uma suspensão de microalgas na forma de um filme de espessura de 6 a 8 milímetros em um sistema inclinado em ziguezague e tornam a exposição das células à luz maior para se alcançar a melhor eficiência na sua utilização. Possibilita o controle de parâmetros de temperatura, entre outros, aumentando a produtividade e diminuindo o custo. (BAJPAI, PROKOP, ZAPPI, 2013)

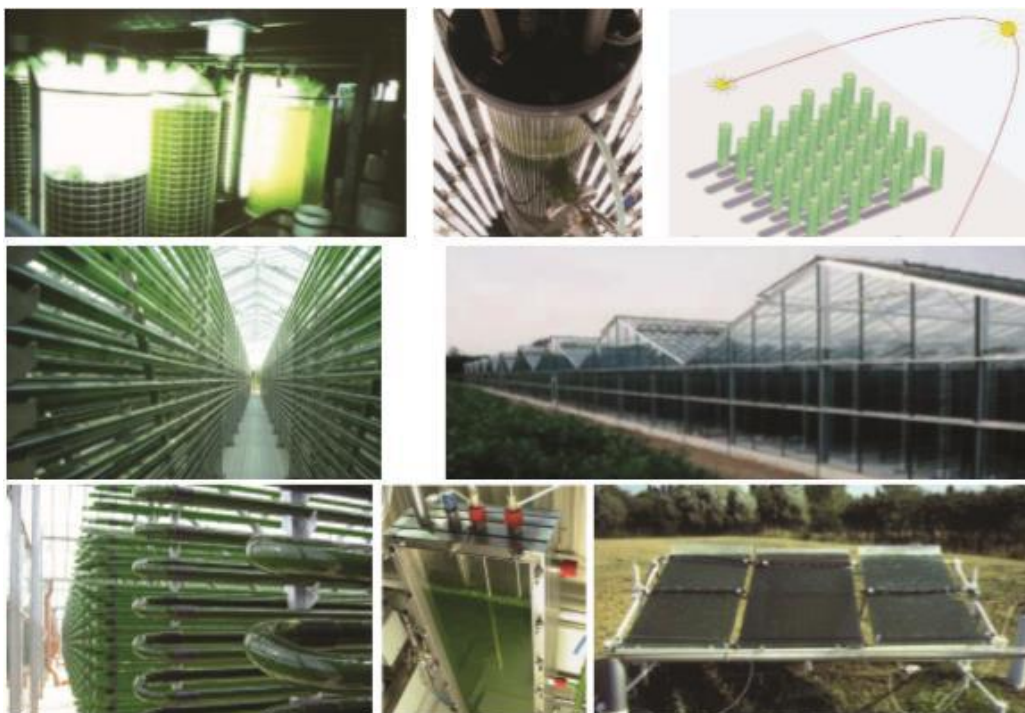
Figura 6. Fotobiorreator aberto de camada fina de 700 m<sup>2</sup> no Třeboň's Institute, República Checa (BAJPAI, PROKOP, ZAPPI, 2013)



### **III.1.3.3 – Sistemas fechados de cultivo**

Visando contornar os problemas de um cultivo aberto é possível se fechar o sistema utilizando material transparente ou utilizar uma estufa, porém essa solução se torna cara com o aumento da área de superfície do sistema. Fotobiorreatores são sistemas fechados, feitos de material transparente que permitem operação em regime contínuo com concentrações elevadas de biomassa e possibilidade de controle dos parâmetros da operação. (FAO, 2009)

A Figura 7 (FAO, 2009) apresenta diferentes tipos de sistemas fechados com várias organizações espaciais



Fotobiorreatores do tipo cilindros verticais estão entre os primeiros sistemas fechados de produção de algas citados na literatura e apresentam grande custo para o uso. Para se trabalhar com volumes suficiente, diâmetros de 20 centímetros ou mais são necessários, o que leva a uma área escura no interior da coluna que contribui pouco para a produtividade. Possuem a vantagem de realizar a gaseificação contínua do sistema, gerando eficiência na troca gasosa e na mistura do meio. (BAJPAI, PROKOP, ZAPPI, 2014)

Fotobiorreatores tubulares consistem em tubos que podem ser organizados espacialmente em múltiplas configurações, como por exemplo vertical, horizontal, inclinada, espiral ou serpentina, necessitando menos área para a operação e maior aproveitamento do espaço. Com diâmetro variando de 10 a 60 milímetros e comprimento de vários metros, apresentam grande razão superfície para volume, impactando positivamente a cultura. Resolvem os problemas de contaminação e controle de parâmetros de pH, introdução de nutrientes e concentração de células nas etapas seguintes de processo e possuem controle de temperatura e de agregação de células mas não de intensidade de luz e de mistura. (BAJPAI, PROKOP, ZAPPI, 2014)

Fotobiorreatores de placas planas são feitos pela colagem de duas placas de material transparente com a presença de um caminho para a passagem de luz. Alcançam alta eficiência fotossintética apesar de não serem baratos e fáceis de serem limpos. Quando comparados com reatores tubulares podem exigir menor necessidade energética para atingir a mesma capacidade de transferência de massa. Apesar das vantagens, precisam de muitos compartimentos e materiais de suporte que dificultam sua utilização em grande escala, além de apresentar dificuldades no controle da temperatura. (BAJPAI, PROKOP, ZAPPI, 2014)

Grubišić e colaboradores (2019) e Liu e colaboradores (2011) reportaram a importância do cultivo de microalgas e dos bioprodutos com valor agregado, bem como comparam os dois sistemas de cultivo aberto e fechado quanto a características como área de cultivo, demanda de água, eficiência luminosa, risco de contaminação, produtividade, condições de cultivo, entre outros. A tabela 5 apresenta as características relevantes na forma de vantagens e desvantagens para cada sistema de cultivo.

Tabela 5. Comparação de sistemas abertos e fechados para o cultivo de microalgas. (GRUBIŠIĆ e colaboradores, 2019; e LIU e colaboradores, 2011)

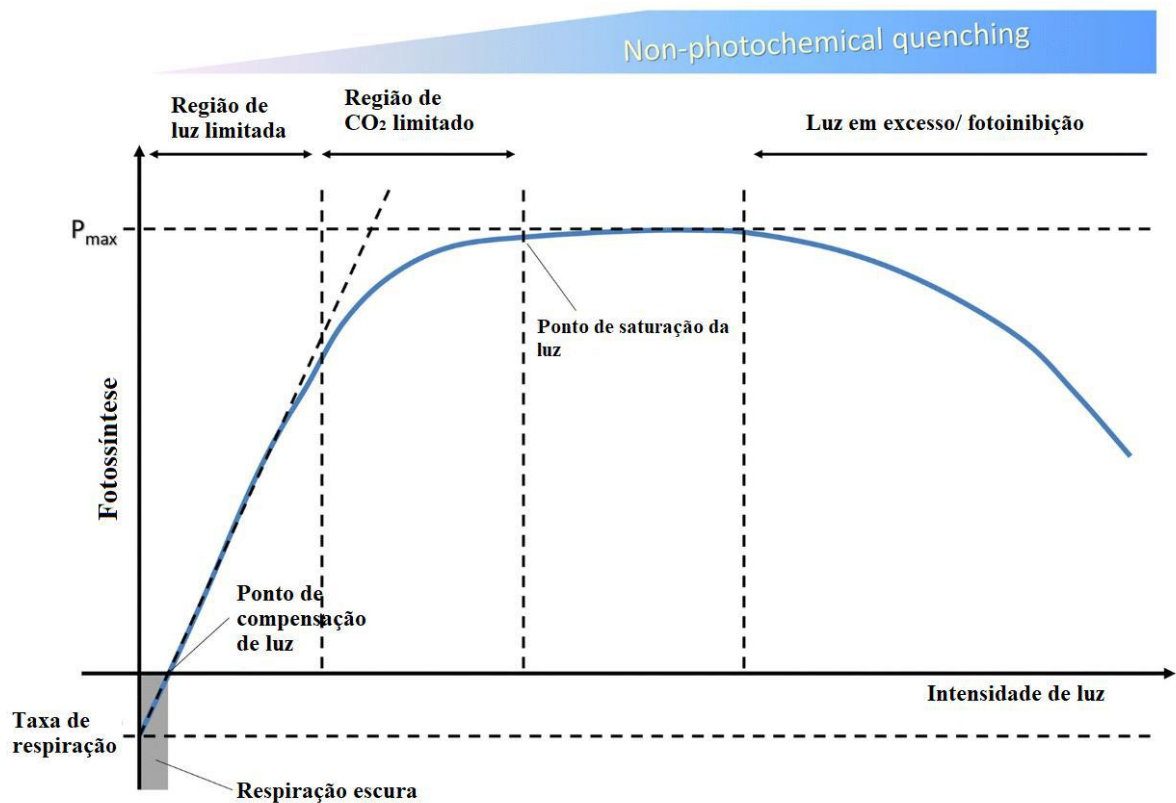
<b>Parâmetro</b>	<b>Sistemas abertos</b>	<b>Sistemas fechados</b>
<b>Espaço necessário</b>	Alto	Baixo
<b>Razão área/volume</b>	Baixa (5 a 10 m <sup>-1</sup> )	Alta (20 a 200 m <sup>-1</sup> )
<b>Controle do processo</b>	Difícil	Fácil
<b>Perdas de água</b>	Muito altas	Baixas
<b>Perdas de CO<sub>2</sub></b>	Altas	Baixas
<b>Temperatura</b>	Muito variável	Resfriamento necessário
<b>Controle da troca de gases</b>	Baixo	Alto
<b>Stress hidrodinâmico nas algas</b>	Muito baixo	Baixo – alto
<b>Dependência do clima</b>	Alta	Baixa
<b>Qualidade da biomassa</b>	Variável	Reproduzível
<b>Eficiência de utilização da luz</b>	Ruim	Excelente
<b>Risco de contaminação</b>	Alto	Baixo
<b>Controle de contaminação</b>	Difícil	Fácil
<b>Produtividade</b>	Muito baixa	Moderado a alto

<b>Densidade de células</b>	Baixa	Alta
<b>Espécies cultiváveis</b>	Restrito a algumas espécies	Aproximadamente todas as espécies podem ser cultivadas
<b>Custos de capital</b>	Baixos	Altos
<b>Custos operacionais</b>	Baixos	Altos
<b>Scale up</b>	Fácil	Difícil
<b>Limpeza</b>	Fácil	Difícil
<b>Eficiência de separação</b>	Baixa	Alta
<b>Custo da separação</b>	Alto	Baixo
<b>Parâmetros mais custosos</b>	Processo de mistura	Controle de oxigênio e temperatura
<b>Manutenção</b>	Simple	Complexo
<b>Regime de operação</b>	Batelada ou semi-contínuo	Batelada ou semi-contínuo

Tabela 5 (continuada).

No cultivo de microrganismos fotossintetizantes é importante observar a curva de saturação de luz onde 4 fases importantes podem ser identificadas: 1. à baixa irradiação, quando a luz é o fator limitante, a taxa de fotossíntese cresce linearmente com o aumento da intensidade da luz; 2. com o aumento da irradiação o fator limitante passa a ser a taxa de fixação de CO<sub>2</sub>, porém a taxa de fotossíntese aumenta com função não-linear com a intensidade da luz; 3. quando a intensidade da luz sobrepõe a taxa de reações bioquímica de regulação a fotossíntese atinge condição de excesso de absorção de energia, atingindo um patamar; 4. posterior efeito de inibição do sistema biológico de fotossíntese quanto há excesso de luz ocorrendo fotoinibição. Na figura 8 estão indicadas as fases de resposta do sistema biológico de fotossíntese com a variação da intensidade da luz aplicada. (BENEDETTI, e colaboradores, 2018; MALAPASCUA e colaboradores, 2014)

Figura 8. Curvas de respostas da luz para a fotossíntese. O ponto de compensação de luz é a intensidade mínima de luz na qual o organismo mostra um ganho de fixação de carbono. A taxa líquida de fotossíntese mostra um aumento linear em resposta a um aumento de luz, na região da limitação de luz. Em níveis mais altos de luz ocorre saturação pois a eficiência do mecanismo fotossintético é reduzida devido à ativação dos processos de supressão de fluorescência. Em condições de excesso de luz, a taxa de fotossíntese pode diminuir como resultado do stress oxidativo. (BENEDETTI, e colaboradores, 2018)



Malapascua e colaboradores (2014) citam que após a irradiação luminosa a temperatura é uma importante variável a ser monitorada durante o crescimento celular. Algumas cepas de microalgas toleram uma faixa de temperatura de 14°C a 40°C como por exemplo *Chlorella vulgaris* ou *C. sorokiniana*. Já, cepas de *Eustigmatophyceae* (*Trachydiscus*) crescem bem entre 20°C a 28°C. Para a maioria das microalgas aquáticas a temperatura ótima de crescimento está na faixa de 25°C a 30°C. Na fotossíntese o monitoramento do CO<sub>2</sub> deve ser realizado, e de forma usual utilizando um sistema de controle do pH. Os demais nutrientes devem ser dosados com especial atenção aos teores de nitrogênio e fósforo.

O cultivo de microalgas visa à produção de elevadas concentrações de células por volume de reação, ou de volume útil de fotobiorreator. Nestes sistemas onde há uma demanda de irradiação de luz para atender o metabolismo fotoautotrófico se observa um aumento da densidade ótica (aumento da concentração de células) e uma diminuição da intensidade de luz nas camadas celulares localizadas na parte inferior do sistema de cultivo. As células localizadas mais próximo à superfície interceptam a maioria dos fótons levando à saturação da fotossíntese, a dissipação do excesso de energia e ou à foto-inibição. As camadas de células que estão nas camadas mais abaixo se mantêm com mais facilidade abaixo do ponto de compensação da fotossíntese através da respiração que consome energia. Desta forma, cultivos de algas com densa concentração celular sofrem tanto de fotorrepressão e foto-inibição, diminuindo a eficiência global de conversão da luz em células em relação ao teoricamente esperado. Na construção de fotobiorreatores sistemas de mistura rápida são recomendados visando minimizar os gradientes de luz. Entretanto, ciclos rápidos de luz e sombra, ou escuridão, que possam ocorrer entre a falta de luz e a super saturação de irradiação desta também apresentam efeitos deletérios no rendimento celular. (BENEDETTI, e colaboradores, 2018)

Guedes e Malcata (2012) discutem as diferentes configurações de fotobiorreatores ressaltando a importância no projeto de fotobiorreatores eficientes e com baixo custo no consumo de energia luminosa em biorreatores dotados de iluminação artificial (tabela 6).

Tabela 6. Características das diferentes tecnologias de iluminação artificial (GUEDES, MALCATA, 2012)

<b>Fonte</b>	<b>Aspectos</b>	<b>Estabilidade de operação</b>
Fontes convencionais de luz artificial	Maior produtividade de biomassa, maior estabilidade, grande área de iluminação, baixo custo de construção	Alta
Diodos emissores de luz (LEDs)	Menor consumo de energia, menor geração de calor, maior expectativa de vida, tolerância a frequência maior de ligar e desligar, maior	Alta



---

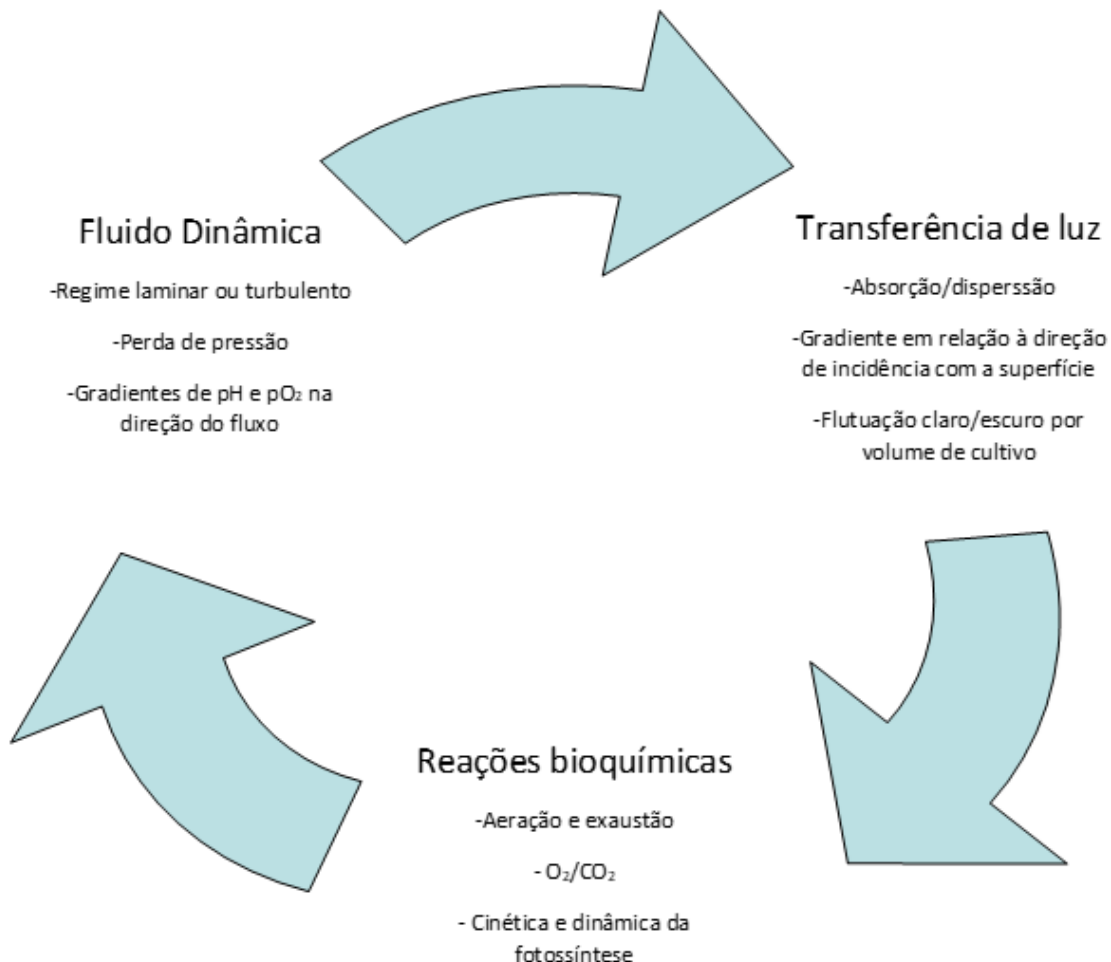
	estabilidade, baixo custo de construção	
Fibra óptica excitada por lâmpada de haleto metálico (OF-MH)	Maior consumo de energia, menor área requerida, bom caminho de luz, distribuição uniforme de luz, menor espaço requerido, baixo risco de contaminação	Moderado
Fibra óptica excitada por energia solar (OF-solar)	Baixo consumo de eletricidade, bom caminho de luz, distribuição uniforme de luz, menor espaço requerido, baixo risco de contaminação, baixo custo	Baixo
LED/OF-solar combinado com energia eólica/ painel solar	Sem gasto de eletricidade, bom caminho de luz, distribuição uniforme de luz, menor espaço requerido, baixo risco de contaminação	Alto

---

Esforços consistentes em desenvolver fotobiorreatores eficientes e com relação custo/benefício têm sido feitos, porém o grande custo de instalação e a operação de fontes artificiais de luz em biorreatores convencionais permanecem um problema. Sistemas de iluminação como diodos emissores de luz (LEDs) como única fonte ou associado fontes de energia renovável (solar e eólica) são descritos de alta estabilidade operacional. Já sistemas construídos com fibra ótica de moderada a baixa estabilidade operacional dependendo da fonte de energia. A luz é de extrema importância, pois influencia diretamente no crescimento de espécies fotossintetizantes, representando a maior fonte de energia para microalgas. Nas duas formas de cultivo seja em biorreatores ou em sistemas abertos a fonte de luz e a intensidade são fatores críticos para o rendimento em células. Nos sistemas abertos a energia solar é a principal fonte e em sistemas fechados (biorreatores) novas tecnologias de iluminação artificial estão sendo desenvolvidas de forma a aproveitar a energia proveniente do sol. Entretanto, soluções tecnológicas de instalação e operação devem ser apresentadas para o projeto de biorreatores de baixo custo. (CHEN e colaboradores, 2011)

Posten (2009) reportou considerações para o projeto de fotobiorreatores visando o cultivo de microalgas. No referido trabalho o autor ressalta a interação entre fatores tais como: fluidodinâmica, transferência de luz e reações bioquímicas que devem influenciar nas condições de cultivo e desempenho dos fotobiorreatores. Estas interações estão ilustradas na figura 9. Os fotobiorreatores são sistemas trifásicos: fase aquosa (líquida), fase sólida (microalgas) fase gasosa ( $\text{CO}_2/\text{O}_2$ ). A luz (natural ou artificial) que diferencia o projeto dos fotobiorreatores representa um campo de radiação obrigatório para o cultivo de células fotossintetizantes (dotadas de clorofila), mas não é considerado como uma quarta fase no sistema reacional.

Figura 9. Interações entre fluido dinâmico, reações bioquímicas e transferência de luz em fotobiorreatores. Os fatores relacionados aos três fatores citados influenciam nas características específicas do sistema trifásico (gás, líquido e sólido) e as interações nestes sistemas de cultivo definem os parâmetros que devem ser considerados no projeto de fotobiorreatores (POSTEN, 2009)



### III.1.4 – Microalgas de interesse comercial

Os gêneros de microalgas cultivadas em escala comercial são: *Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Nostoc*, *Aphanizomenon* e *Haematococcus*. A microalga do gênero *Spirulina* é produzida em países continentais como China, Estados Unidos da Américas (EUA) e Índia, assim como no Japão, visando atender a demanda dos setores alimentício (alimentos, ração, ficobiliproteínas) e de cosméticos. Taiwan, Alemanha e Japão cultivam *Chlorella* para comercialização no setor de alimentos, aquacultura e cosméticos com produção anual de 2000 toneladas. Em países como Austrália, Israel, EUA e China a microalga do gênero *Dunaliella* é cultivada para atender a demanda dos setores de alimentos e de cosméticos e produção de betacaroteno (precursor da vitamina A). Na tabela 7 pode ser observada a produção de microalgas no mundo, identificando os principais países produtores, os gêneros de microalgas cultivadas, e aplicações ressaltando a produção de astaxantina por *Haematococcus*. (BUX, 2013; KOTHARI e colaboradores, 2017).

Tabela 7. Produção global de gêneros relevantes em peso seco e seus principais produtores: (BUX, 2013; KOTHARI e colaboradores, 2017)

Gênero	Toneladas/ano	País	Uso
<i>Spirulina</i>	3 000	China, Índia, EUA, Japão	Alimentos, ração, ficobiliproteínas, cosméticos
<i>Chlorella</i>	2 000	Taiwan, Alemanha, Japão	Alimentos, aquacultura, cosméticos
<i>Dunaliella</i>	1 200	Austrália, Israel, EUA, China	Alimentos, cosméticos, betacaroteno
<i>Nostoc</i>	600	China	Alimentos
<i>Aphanizomenon</i>	500	EUA	Alimentos
<i>Haematococcus</i>	300	EUA, Índia, Israel, Suécia, Havaí	Aquacultura, astaxantina

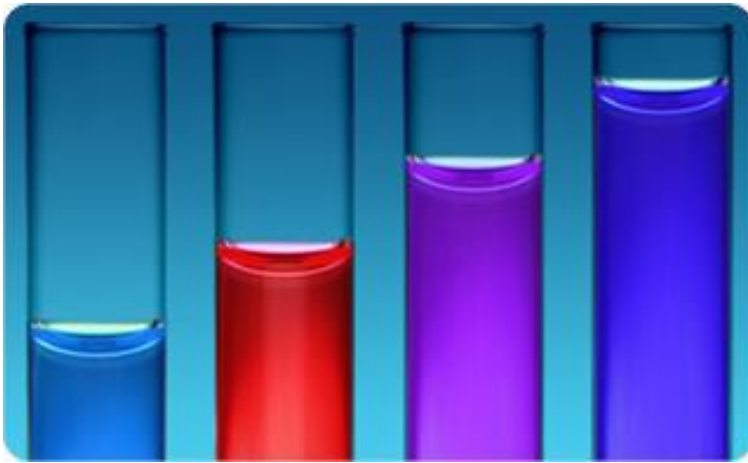
### III.1.5 – Principais bioprodutos

Microalgas representam um recurso biológico diverso devido à complexidade de sua composição química e variedade de produtos bioquímicos, sendo fontes de matéria para indústrias nos campos de alimentação, ração, farmacêutico e pesquisa. Apesar de mais de 200 mil espécies terem sua existência reconhecida, apenas de 10 a 20 espécies são exploradas comercialmente para produção de biomassa, pigmentos, antioxidantes e produtos especiais (toxinas específicas e isótopos) para várias aplicações. (BUX, 2013; KOTHARI e colaboradores, 2017)

Carotenoides – compostos lipossolúveis coloridos. Presentes na natureza na forma das cores vermelho brilhante, laranja e amarelo de vegetais e alguns animais. Pigmentos naturais que podem ser utilizados nos campos de alimentos, fármacos e indústria de aquacultura que utilizam corantes artificiais com efeitos tóxicos. São também agentes antioxidantes e podem atuar no combate ao câncer, obesidade e hipertensão. Como representantes mais explorados se encontram o betacaroteno e a astaxantina, produzidos comercialmente por *Dunaliella salina* e *Haematococcus pluvialis* respectivamente. São os produtos biotecnológicos provenientes de algas mais bem-sucedidos. (BUX, 2013)

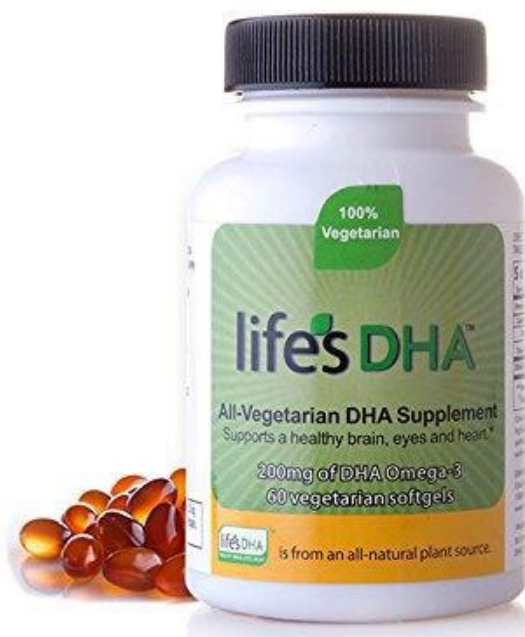
Ficobiliproteínas – pigmentos acessórios fotossintéticos, aumentam a eficiência da utilização de energia da luz. São complexos de proteínas solúveis em água com forte coloração variando do vermelho até o azul que podem ser empregadas como corantes naturais. 4 classes principais são encontradas e apresentam as seguintes cores: aloficocianina (verde azulado), ficocianina (azul), ficoeritrina (vermelho) e ficoeritrocianina (laranja). *Arthrospira sp.* (*Spirulina sp.*) produz ficocianina comercialmente. Além de corantes, são também utilizados como reagentes fluorescentes em laboratórios de imunologia e pesquisa clínica e também exames de diagnósticos e microscopia (Figura 11). (BUX, 2013)

Figura 10. Diferentes exemplos de ficobiliproteínas produzidas pela Febico sob a marca Flogen (BUX, 2013)



Lipídeos – presentes na composição celular em quantidades variadas, a existência de ácidos graxos poli-insaturados se destaca. Os do tipo ômega 3 (eicosapentaenoico e docosahexaenoico) não são sintetizados pelo organismo humano, devendo ser obtidos através da alimentação e dieta. São encontrados comercialmente no óleo de peixe, sendo a produção por microalgas a alternativa sustentável e sem possuir odores e gosto relacionados a peixe. (Figura 11)

Figura 11. Suplemento de ácido docosahexaenoico produzido pela companhia Martek Biosciences (KOTHARI, 2017)



A biomassa de microalgas pode render diferentes produtos de interesse de acordo com a sua utilização, podendo os mesmos ser divididos em um grupo de energia, um grupo de alimentação e um grupo especializado de ácidos graxos poli-insaturados, além de usos na indústria farmacêutica. Em cada categoria encontram-se respectivamente óleo, etanol, metanol, biodiesel, biohidrogênio, biogás e hidrocarbonetos de cadeia longa; carboidratos, proteínas, corantes e vitaminas; ácido gama linolênico, ácido araquidônico, ácido eicosapentaenoico e ácido graxo ômega 3 (docosahexaenoico). (KOTHARI e colaboradores, 2017)

Apesar dos benefícios para saúde, a ingestão de grandes quantidades de microalgas como *Chlorella* e *Arthrospira* pode causar efeitos colaterais como náuseas, alergias, vômitos e outros problemas gastrointestinais, como diarreia. Ao serem utilizados como suplementos ou adicionadas a alimentos funcionais, a biodisponibilidade de minerais e vitaminas existentes pode ser menor do que esperada. Microalgas cultivadas na presença de poluentes podem apresentar concentrações significativas de metais pesados e toxinas, levando seu consumo prolongado a danos irreversíveis nos rins e fígado. Assim, deve-se buscar identificar potenciais metabólitos danosos à saúde humana e formas de se utilizar a biomassa especificamente buscando os componentes alvo desejados. (BARKIA, SAARI, MANNING, 2019)

Na indústria farmacêutica podem ser usadas como anti-inflamatórias, anticoagulantes, antimicrobiana, anticâncer, na manutenção da saúde dos olhos e do coração, na redução do colesterol e em cosméticos devido a ampla gama de metabólitos que produzem com diversas

finalidades como produtos de cuidado com a pele, cremes antienvhecimento, hidratantes, protetores solares e cuidados para o cabelo. (KOTHARI e colaboradores, 2017)

Seus resíduos encontram uso principalmente na produção de biohidrogênio através de digestão anaeróbica, biogás, bioetanol, biometanol, bioplásticos, biofertilizantes e ração animal, além de produtos medicinais de valor agregado. (KOTHARI e colaboradores, 2017)

Para a geração de combustíveis podem ser usadas a rota termoquímica ou a rota bioquímica. Na rota bioquímica, biodiesel pode ser produzido através da transesterificação da fração contendo lipídeos encontrada nos organismos. Esse processo pode ser realizado pela via ácida, alcalina ou enzimática. Os outros processos bioquímicos envolvem a digestão anaeróbica da biomassa resultando em gases como produtos possíveis e a fermentação dos açúcares constituintes das microalgas resultando em bioálcoois. (SHARMA, SHARMA 2017)

O bio-óleo é produzido através da conversão termoquímica ao se expor a biomassa a temperaturas muito elevadas na ausência de oxigenação. Carvão coque e biogás também são resultantes desse processo. A conversão consiste numa etapa de pirólise seguida da posterior liquefação do substrato. (SHARMA, SHARMA 2017)

Bio-hidrogênio pode ser gerado ao se remover continuamente o oxigênio e hidrogênio gerados na pirólise ou através da restrição de nutrientes em um ambiente anaeróbico, gerando diferentes formas de stress com o objetivo da produção de hidrogênio pela célula. (SHARMA, SHARMA 2017)

Biometano é produzido através da digestão anaeróbica da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono. (SHARMA, SHARMA 2017)

Bioetanol resulta da fermentação da fração de carboidratos de microalgas contendo amido, processo que também pode gerar outros bioálcoois, como butanol. (SHARMA, SHARMA 2017)

Após a extração dos lipídeos da célula, a biomassa restante contém alta quantidade de conteúdos de nitrogênio e fósforo, podendo servir como fertilizante. (RAVINDRAN e colaboradores, 2016)

### III.1.6 – Microalgas no Brasil e na América Latina

As espécies mais abundantes pertencem à classe *Bacillariophyceae* (diatomáceas) que são encontradas em todas as regiões geográficas do país e à classe *Dinophyceae*, representada pelos dinoflagelados que são encontrados nas regiões sul e sudeste. As classes *Bacillariophyceae*, *Chlorophyceae*, *Euglenophyceae*, *Cyanophyceae* e *Charophyceae* apresentam o maior número de espécies distintas na região continental do Brasil enquanto que, com relação à vida marinha, *Bacillariophyceae* e as *Dinophyceae*, seguidas das *Prymnesiophyceae* são as classes apresentando maior diversidade no fitoplâncton brasileiro. (BICUDO, MENEZES, 2010)

### III.1.7 – Mercado

Produção total mundial aproximadamente na casa das milhares de toneladas de biomassa por ano. (LAURENS, 2017)

Numa projeção sugerida, aplicações para o consumo humano na indústria farmacêutica e de nutrição encontram preços de 100 euros por quilograma de biomassa, enquanto para o consumo animal se concentram na faixa entre 5 e 20 euros por quilograma de biomassa, sendo o volume do mercado de 60 milhões e 3,5 bilhões respectivamente. Já os produtos extraídos em grande quantidade apresentam custo menor, sendo abaixo dos 5 euros por quilograma no bruto e 40 centavos de euro para biocombustíveis, porém com maior volume de mercado, com respectivamente 50 bilhões e 1 trilhão de euros. (KOTHARI e colaboradores, 2017)

Tabela 8. Quantidades (em quilogramas) de substâncias selecionadas e seu valor gerado em milhões de dólares (BUX, 2013)

<b>Produto</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor movimentado</b>
Betacaroteno	1 200 000	280
Astaxantina	300 000	150
Ficobiliproteínas	2 a 17	50



A demanda de mercado para produtos comercializados atualmente como astaxantina, fucoxantina, betacaroteno, ficocianina e ácido docosahexaenoico como reportado por Yarnold e colaboradores (2019). De distintas procedências esses produtos podem ser obtidos por rota petroquímica, a partir de culturas de fungos, ou de microalgas ou macroalgas. As microalgas contêm lipídeos na faixa de 20 a 70% em peso seco. Os ácidos graxos poli-insaturados DHA e EPA podem estar presentes na faixa de 20 a 45% em cepas que apresentam altos rendimentos na formação destes. Microalga é em potencial uma biomassa importante para a produção de omega-3 possibilitando o aumento de seu suprimento (Tabela 9).

Tabela 9. Demandas de mercado. (YARNOLD e colaboradores, 2019)

<b>Produto</b>	<b>Tipo</b>	<b>Origem</b>	<b>Preço (US\$ kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mercado (milhões US\$)</b>
Astaxantina	Carotenoide	Sintética	290	553,6
		(petroquímica)		
		<i>Haematococcus</i>	530	
		<i>pluvialis</i>		
Fucoxantina		<i>Laminaria sp.</i>	27	95
Beta caroteno	Carotenoide	Petroquímica	46	432,2
		<i>Blakeslea</i>	48	
		<i>trisporea</i>		
		<i>Dunaliella</i>	65	
		<i>salina</i>		
Ficocianina	Ficobiliproteína	<i>Spirulina sp.</i>	160	112,3
DHA em pó	Ácido graxo	<i>Schizochytrium</i>	50	34 700
		<i>sp.</i>		

## III.2 – Macroalgas

### III.2.1 – Classificação

As macroalgas se dividem em grupos de acordo com a coloração e pigmentos presentes, sendo algas verdes (*Chlorophyta* e *Streptophyta*), algas vermelhas (*Rhodophyta*), algas pardas (*Phaeophyceae* e *Xanthophyceae*). Como não costumam apresentar lignina, seu uso em

processos de obtenção de biocombustíveis através da conversão por microrganismos é mais vantajoso ao ser comparado com vegetais superiores, além de não necessitar de terra de agricultura para seu cultivo nem água potável. (SUUTARI e colaboradores, 2015)

### III.2.2 – Composição

Apresentam aproximadamente 90% de seu conteúdo na forma de água (FAO, 2009), de 25 a 60% constituídas por carboidratos, de 7 a 15% de proteínas, de 1 a 5% de lipídeos e inorgânicos na faixa de 10 a 50% de acordo com a classe ou grupo. (Tabela 10)

Tabela 10. Composição química percentual aproximada de macroalgas em peso seco (FACCINI, 2007)

Componente	Algas pardas	Algas vermelhas	Algas verdes
Carboidratos	30 – 50	30 – 60	25 – 50
Proteínas	7 – 15	7 – 15	10 – 15
Lipídeos	2 – 5	1 – 5	1 – 5
Minerais	30 – 50	25 – 35	10 – 25

### III.2.3 – Cultivo

As macroalgas podem ser cultivadas em águas marinhas de baixa profundidade e comercialmente se dividem em suportes imóveis ou flutuantes. (SOUZA, 2011)

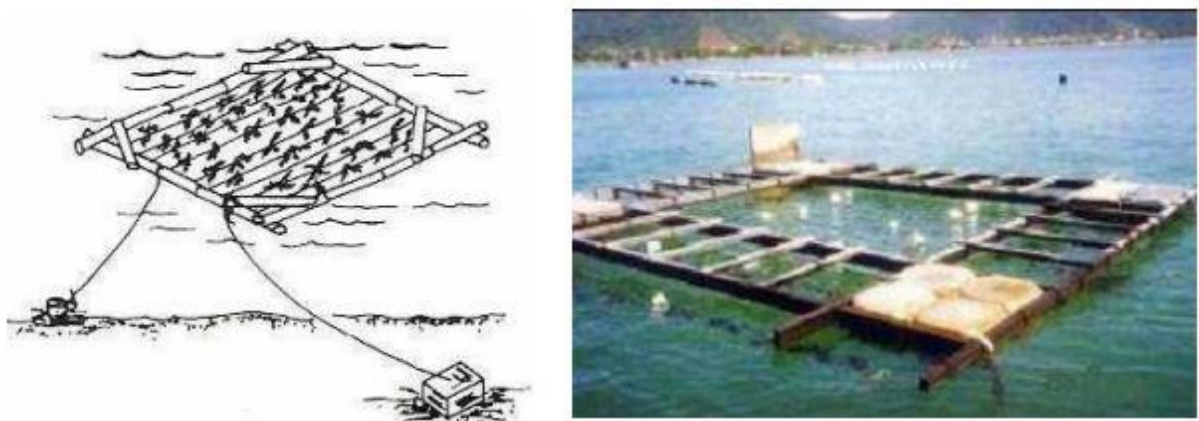
Pode ser desenvolvida uma produção em consórcio com outras espécies, como peixes e camarões, buscando diminuir a carga de poluentes das culturas animais e aumentando o rendimento. (SOUZA, 2011)

Figura 12. Cultivo de algas marinhas associado à criação de peixes e moluscos localizado no norte da China. (BUSCHMANN e colaboradores, 2017)



A balsa flutuante consiste no cultivo em estrutura flutuante que permanece na superfície por meio de boias e variando sua profundidade de acordo com o movimento da maré. Ela é ancorada no fundo das águas e pode ser feito de materiais duráveis nas condições de cultivo, como bambu, tubos de PVC e madeiras. Cordas são utilizadas para a fixação dos organismos. (SOUZA, 2011)

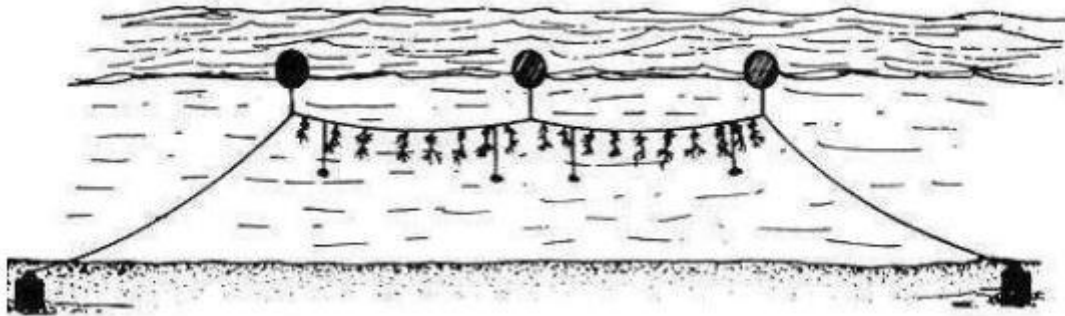
Figura 13. Esquema de balsa flutuante e cultivo de *Kappaphycus alvarezzi* (SOUZA, 2011)



Tem a vantagem de poder ser utilizada em diferentes níveis de profundidade das águas e possui portabilidade que permite a movimentação livre nas diferentes etapas de construção e funcionamento e a desvantagem de ser um sistema frágil, sujeito a danos e quebras. (SOUZA, 2011)

Uma variação é a utilização do método long-line, onde as macroalgas são fixadas em uma corda suspensa por boias e ancoradas nas extremidades da linha.

Figura 14. Representação esquemática de cultivo em long-line (SOUZA, 2011)



Permite o aproveitamento máximo da luz incidente, porém apresenta as desvantagens dos sistemas de balsas flutuantes.

A alternativa para os sistemas flutuantes são os sistemas fixos, onde estacas são cravadas nas extremidades de uma corda que é esticada e vai receber as algas. Exigem baixo investimento de construção e são simples de manejar mas encontram restrição nos lugares propícios para a sua utilização que, uma vez determinado, não pode ser movimentado, além de poder atrair predadores com alta frequência. (SOUZA, 2011)

Na figura 15 o sistema de cultivo de macroalgas (*Gracilaria salicornia*) envolvidas por tela no formato de bolsas (bags) para cultivo em águas marinhas. O cultivo de algas marinhas realizado off ou onshore tornou-se uma atividade econômica importante para o pequeno empreendedor provendo sustentabilidade ao meio ambiente da costa marítima. Os sistemas de cultivo são adequados às características do ambiente aquático de cada região ou país. (SUDHAKAR e colaboradores, 2019).

Figura 15. Telas no formato de bolsas para cultivo de macro algas em água salgada (SUDHAKAR e colaboradores, 2019)



Na tabela 11 estão listadas algumas espécies de algas marinhas e os métodos de cultivo adotado em cada país em função das características geográficas e marinhas.

Tabela 11. (SUDHAKAR e colaboradores, 2019; SOUZA, 2011; FERNAND e colaboradores, 2017)

<b>Espécie</b>	<b>Método</b>	<b>País</b>
<i>Eucheuma/Kappaphycus</i> e <i>Gracilaria sp.</i>	Fixa e flutuante	Filipinas, Vietnã e Tailândia
<i>Porphyra sp.</i>	Flutuante	China, Coréia e Japão
<i>Kelp</i>	Long line	China, Coréia e Japão
	Cultivo offshore	EUA
	Long line	Europe
	Sistema anelar	Alemanha
<i>Kappaphycus sp.</i>	Flutuante	Índia
<i>Gracilaria sp.</i>	Método de tubos	Chile
<i>Gracilaria sp.</i>	Preparação de esporos	Malásia e Havaí
<i>G. verrucosa</i>	Raft	China
<i>Gracilaria sp.</i> , <i>Ulva sp.</i> ,	Linha nylon	Índia
<i>Porphyra sp.</i>		

No Brasil, as principais espécies de algas cultivadas são as algas pardas *Laminaria japonica* e *Undaria pinnatifida*, as algas vermelhas *Euclima spp* e *Gracilaria spp*, e a alga verde *Monostroma sp.* (SOUZA, 2011)

### III.2.4 – Principais bioprodutos

Macroalgas são utilizadas majoritariamente como um produto alimentar. Tradicionalmente cultivadas para a exploração de ficocoloides: ágar, carragenana e alginato. (FAO, 2009, FONSECA, 2016)

A importância alimentar das algas reside no fato de que a promoção da saúde humana e a prevenção de doenças está ligada também a compostos bioativos, além dos nutrientes essenciais, sendo as algas fontes de compostos funcionais e nutrientes com tais funções. Junto do aumento da expectativa de vida há também crescimento dos cuidados com a saúde, objetivando uma melhor qualidade da mesma. A eficiência das substâncias naturais comprovadamente benéficas para a saúde e sem efeitos indesejados colocam as algas como fonte importante para a indústria de alimentos. (FONSECA, 2016)

Alimentos funcionais são alimentos capazes de promover benefícios à saúde além da função primária de nutrição. A grande diversidade na composição de macroalgas torna possível a exploração de seus componentes com atividade fisiológica e características bioquímicas capazes de agir na prevenção de doenças e na promoção da saúde e bem-estar geral. Pesquisas buscam mostrar a utilização de macroalgas e suas substâncias derivadas no bom funcionamento do sistema digestório, combate ao câncer e inflamação, infecções virais, tratamento antidiabético, antialérgico, antiobesidade e na proteção aos neurônios e à pele. (KIM, TAYLOR, 2011)

Podem ser utilizadas como fertilizantes e bioestimulantes na agricultura, efeito alcançado devido à existência de metabólitos em sua composição que agem como reguladores das funções de crescimento. (DAPPER e colaboradores, 2013)

A produção mundial se concentra principalmente em algas vermelhas e pardas, assim, os processos para a obtenção de biocombustíveis a partir dessa indústria parecem encontrar viabilidade, tendo como possibilidade a produção de bioetanol e biogás a partir de resíduos usando rotas microbiológicas de conversão. A rodófito *Porphyridium* produz ficoeritrina, ficobiliproteína de coloração vermelha. (KOTHARI e colaboradores, 2017, BUX, 2013)

### III.2.5 – Macroalgas no Brasil e na América Latina

A classe com maior número de representantes no Brasil é a *Rhodophyceae*, seguindo a tendência observada em outras regiões por ser a classe com o maior número de espécies conhecidas. Também são encontrados naturalmente organismos das classes *Ulvophyceae* e *Phaeophyceae*. (BICUDO, MENEZES, 2010)

O Brasil apresenta cultivos comerciais de *Kappaphycus alvarezii* ao longo da costa das regiões sul e sudeste destinado à extração de carragenana. (BUSCHMANN e colaboradores, 2017)

O Chile explora as algas pardas dos gêneros *Lessonia* e *Macrocystis* como indicadores de biodiversidade e comercialmente as algas vermelhas *Sarcothalia crispata*, *Gigartina skottsbergii* e *Chondracanthus chamisoii* para extração de carragenina. A sua produção está restrita a pequenas quantidades de *Gracilaria chilensis*, enquanto as outras espécies são alvo de extrativismo. (BUSCHMANN e colaboradores, 2017)

### III.2.6 – Mercado

A China é responsável por em torno de 80% a 90% da produção mundial, sendo seguida por Filipinas, Indonésia e Japão. (LAURENS, 2017)

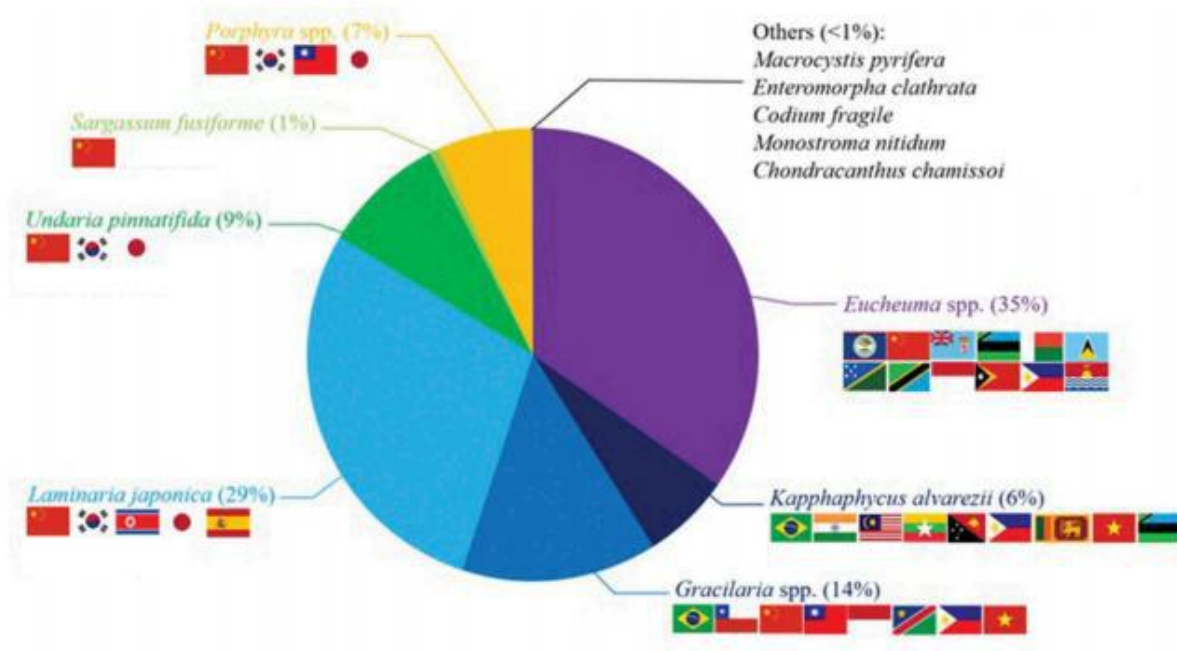
Apesar de serem conhecidas mais de 20 mil espécies de algas marinhas ao redor do mundo, aproximadamente apenas 221 espécies são usadas comercialmente e a maior parte da produção mundial se concentra em 5 gêneros: *Laminaria*, *Porphyra*, *Undaria*, *Eucheuma* e *Kappaphycus*, *Gracilaria*. A tabela 12 apresenta as quantidades da produção mundial dos 5 gêneros destacados. (CHUNG e colaboradores, 2011)

Tabela 12. Produção mundial total dos principais gêneros (CHUNG e colaboradores, 2011)

Gênero	Peso total (toneladas)
<i>Laminaria</i>	4 580 000
<i>Porphyra</i>	1 011 00
<i>Undaria</i>	311 105
<i>Eucheuma e Kappaphycus</i>	628 576
<i>Gracilaria</i>	12 510

A figura 16 relata as espécies cultivadas em cada país e sua fatia em relação à produção mundial de macroalgas.

Figura 16. Produção percentual por espécies e países produtores. (BUSCHMANN e colaboradores, 2017)



Segundo Chung e colaboradores a produção mundial de macroalgas estão localizadas na Ásia (China, Coréia, Índia, Indonésia, Filipinas, Japão e Tanzânia). A produção mássica de cada espécie por país produtor e principais aplicações estão apresentados na tabela 13.



Tabela 13. Produção mundial em peso seco: (CHUNG e colaboradores, 2011)

País	Toneladas	Espécies	Uso
<b>China</b>	550 000	<i>Laminaria japonica</i>	Alginatos e outros
<b>Coréia</b>	98 400	<i>Undaria pinnatifida</i>	Alimentação
<b>Japão</b>	71 820	<i>Porphyra tenera</i>	Alimentação
<b>Filipinas</b>	70 102	<i>Kappaphycus alvarezii</i> <i>Eucheuma denticulatum</i>	Carragenina
<b>Indonésia</b>	61 447	<i>Kappaphycus alvarezii</i> <i>Eucheuma denticulatum</i>	Carragenina
<b>Tanzânia</b>	5 000	<i>Kappaphycus</i>	Carragenina
<b>Índia</b>	500	<i>Kappaphycus</i> + <i>Gracillaria</i>	Agar, carragenina

A figura 17 mostra os maiores produtores de macroalgas do mundo e que também são responsáveis pela maior diversidade de espécies cultivadas, sendo a China com 7, a Indonésia com 6 e a Coréia com 4. (BUSCHMANN e colaboradores, 2017)

Figura 17. Maiores produtores (BUSCHMANN e colaboradores, 2017)



Daigle e colaboradores (2019) apresentaram uma análise referente ao cultivo de microalgas e a captura de CO<sub>2</sub> como uma estratégia promissora para a produção de

biocombustíveis e de bioprodutos de alto valor agregado. O estudo em questão foi realizado para avaliar o biossequestro do CO<sub>2</sub> em país de clima frio como o Canadá, com baixas temperaturas em grande parte do ano, como política biotecnológica destinada a reduzir as emissões gasosas produzindo biocombustíveis a partir de biomassa. Os autores verificaram que esta estratégia seria rentável somente priorizando o mercado de omega-3 para a indústria farmacêutica, nutracêutica e determinados setores da de alimentos. Observaram ainda a crescente demanda por moléculas denominadas de blocos de construção destinadas à produção sustentável de produtos da indústria química. O estudo econômico considerou o cultivo de microalgas em área de superfície de 50 hectares, capaz de capturar 4.000 m.t. de CO<sub>2</sub> anualmente, em planta de tratamento de resíduo aquoso municipal e produção de 2.000 m.t. em peso seco de microalgas (composição média de 25% de lipídeos, 50% de carboidratos e 25% de proteínas). Os preços de venda/m.t. aplicados neste estudo estão apresentados na tabela 14.

Tabela 14. Preços de alguns produtos importantes (DAIGLE e colaboradores, 2019)

PRINCIPAIS COMPONENTES	SETORES DE EXPLORAÇÃO	PRODUTOS	PREÇO DE VENDA	
LIPÍDEOS (25%)	Farmacêutico	Astaxantina	1 000 000 – 2 500 000	
		Betacaroteno	300 000 – 3 000 000	
		Clorofila (pó 100%)	390 000	
		Ômega-3	600 000 – 4 500 000	
		Ômega-3	2 154 000	
		Ômega-3	185 000	
		Óleo contendo Ômega-3	15 000	
	Molécula bloco de construção	Resinas alquídicas	3 000 – 5 000	
		Tintas e vernizes	3 000 – 5 000	
		Lubrificantes	Não disponível	
	Biocombustível	Biodiesel	menor que 1 000	
	CARBOIDRATOS (25-50%)	Moléculas bloco de construção	Ácido succínico	5 900 – 9 000
			Ácido succínico	2 800
Ácido succínico			2 000 – 3 000	
Ácido levulínico			20 000 – 40 000	
Ácido levulínico			1 000 – 10 000	
Propano-1,3-diol			1 000 – 10 000	
Xilitol			1 000 – 10 000	
Ácido málico			1 000 – 5 000	
Ácido aspártico			10 000 – 18 000	
Ácido fumárico			1 000 – 2 500	

	Biocombustíveis	Isobutanol (molécula bloco de construção)	2 600
		Bioetanol	500 – 1 000
PROTEÍNAS (25%)	Alimentação	Proteína funcional	5 000
		Proteína balanceada	1 000
		Ração de peixe	2 000
		Ração 60% proteína	750
		Ração 45% proteína	400
		Torta desengordurada	250
	Fertilizante	Di-amônio fosfato (DAP)	580
		Ureia	380
Fertilizante		200	
BIOMASSA INTEGRAL	Alimentação humana	<i>Chlorella</i> (pó puro)	100 000 – 250 000
		<i>Chlorella</i> (concentrada)	10 000

## Capítulo IV – Desenvolvimento Sustentável e Biorrefinaria Integrada

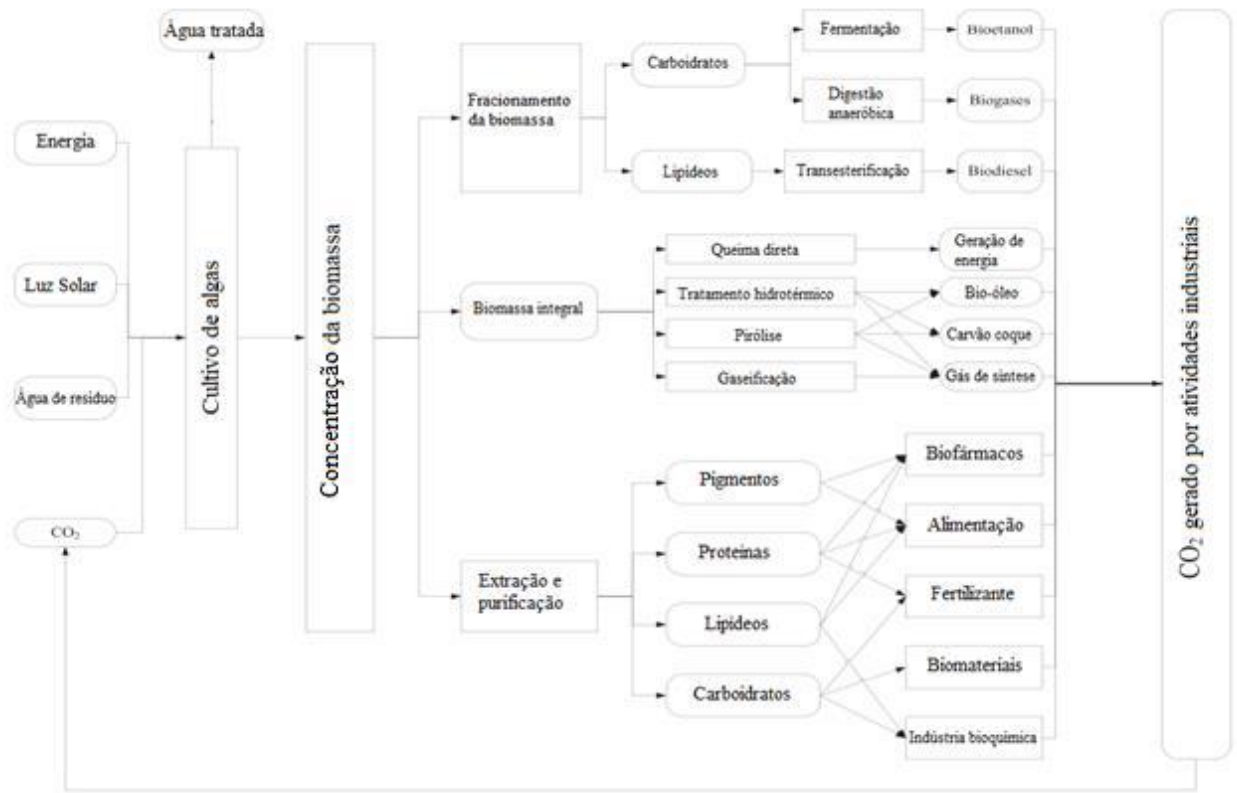
As microalgas podem ser usadas como fonte renovável de biocombustíveis em oposição aos combustíveis de origem fóssil predominantes na matriz energética mundial que podem promover mudanças climáticas e aquecimento global, já que aproximadamente 75% das emissões antropogênicas de gás carbônico se originam da queima de tais compostos. A partir delas podem ser obtidos biocombustíveis como biohidrogênio, biogás, bioetanol, biodiesel e bio-óleo, não poluentes e que são capazes de contribuir para a demanda de energia da sociedade atual. (CHEN, XU, VAIDYANATHAN, 2017)

O cenário mundial atual apresenta desafios que terão impactos econômicos como as mudanças climáticas e o aquecimento global, as transformações demográficas que acompanham o crescimento da população, seu envelhecimento, aumento de renda e maior urbanização, aumento na demanda por água, comida e energia, busca de diminuição dos impactos ambientais causados pelos sistemas de produção e redução da poluição e o esgotamento de fontes naturais. A bioeconomia surge como resposta para a busca de uma solução para esses desafios globais. (NUNES, 2017)

O conceito de bioeconomia encontra diferentes significados idealizados nas referências acadêmicas: podendo se relacionar ao desenvolvimento da biotecnologia em pesquisa e aplicação a vários ramos da sociedade; uso dos recursos biológicos já existentes de forma melhorada e otimizada, encontrando novos destinos para matérias-primas nos campos de agricultura e cultivo e de bioenergia; destaque à importância de processos ecológicos objetivando otimizar o uso de energia e nutrientes, promover biodiversidade e evitar a degradação dos solos, promovendo a integração de processos e sistemas. Os dois primeiros são conceitos mais ligados à economia enquanto o terceiro se foca na sustentabilidade. (BUGGE e colaboradores, 2016)

A integração do tratamento ambiental através de microalgas com a produção de biocombustíveis se mostra vantajosa, reduzindo problemas como a dependência de energia e o custo de investimento. Junto à produção de bioenergia a diversidade de produtos oriundos de algas garantem o potencial de sua aplicação integrada de maneira eficiente. (CHEN, XU, VAIDYANATHAN, 2017)

Figura 18. Esquema de uma biorrefinaria integrada de algas (KHOO e colaboradores, 2019)



Uma das formas de se tornar todo o processo mais viável é combinar a produção de microalgas com processos de tratamento ambientais. As microalgas são utilizadas no reaproveitamento de água de resíduo originada de esgoto ou processos industriais que apresenta altas quantidades de poluentes, além de nitrogênio e fósforo. O despejo dessas águas em meios receptores sem tratamento representa ameaça para ecossistemas aquáticos com a consequente eutrofização. (CHEN, XU, VAIDYANATHAN, 2017)

Os gargalos tecnológicos na utilização de microalgas se encontram no custo do meio nutritivo para o crescimento e cultivo e na energia gasta para tratamento das células e extração do óleo. Assim, o uso de microalgas tendo como finalidade apenas a produção de biocombustíveis pode não se mostrar sustentável, sendo a alternativa eficiente encontrada para contornar essa situação a integração de processos em uma biorrefinaria, melhorando a parte econômica da questão. (RAVINDRAN e colaboradores, 2016)

O valor de mercado gerado pelos diferentes produtos que são obtidos simultaneamente de algas pode ultrapassar o de custos de produção. Assim, a exploração da biomassa algal deve

ser maximizada buscando reduzir-se simultaneamente os gastos com energia e capital. Para esse melhor aproveitamento ser atingido é interessante que as várias frações constituintes da alga sejam valorizadas de maneira otimizada. Esse processo seria o escopo de uma biorrefinaria integrada. (WAGEMANN, TIPPKÖTTER, 2019)

Para o processamento de uma biorrefinaria é necessário que as características da biomassa que vai ser utilizada sejam bem determinadas, algo que varia entre as várias espécies possíveis de alga que podem ser escolhidas para serem empregadas. O conhecimento das estruturas celulares é exigido para que se possam desenvolver tecnologias de processos e condições de operação adequadas. Para essa etapa, alguns passos são propostos para a definição de uma estratégia para a adoção de uma biorrefinaria:

-Determinação da composição celular

-Concentração das células do meio de cultura

-Rompimento das paredes celulares e das células

-Separação dos constituintes em frações hidrofóbica e hidrofílica, mantendo os componentes solúveis funcionais

-Fracionamento das frações hidrofóbica e hidrofílica.

Majoritariamente, a fração hidrofóbica abriga os lipídeos e pigmentos enquanto a fração hidrofílica contém proteínas e carboidratos e cada uma delas pode ser explorada para diferentes aplicações de mercado, com opções próprias de isolamento de substâncias de interesse. (WAGEMANN, TIPPKÖTTER, 2019)

O objetivo final da biorrefinaria em relação às operações é integração em uma única cadeia de processo com custo-benefício vantajoso para obtenção de todas as biomoléculas de valor agregado, sendo sustentável, flexível, eficiente, com baixas demandas de energia e aplicável a várias fontes de matérias primas. O processo inteiramente contínuo ainda necessita de novos equipamentos e tecnologias para ser possível, sendo a integração por etapas de maneira híbrida um possível avanço à concretização do mesmo.

Em processos de biorrefinaria o cultivo de microalgas heterotróficas e mixotróficas pode ser de grande interesse, uma vez que o suprimento de carbono orgânico pode ser de moléculas

como glicose ou acetato, de resíduos de farinhas de grãos, da indústria de alimentos e de laticínios, resíduos aquosos industriais e de natureza lignocelulósica. A água deve ser suplementada com carbono orgânico e nutrientes inorgânicos como fósforo e nitrogênio no preparo do meio de crescimento. Operações unitárias como filtração, mistura, diluição, esterilização e reações químicas ou enzimáticas de hidrólise da matéria-prima para liberação da fonte de carbono também se fazem necessárias. O cultivo de microalgas heterotróficas e mixotróficas, quando comparado com o crescimento das fotoautotróficas, potencialmente leva a produção de maiores concentrações de células e de rendimento em compostos orgânicos de alto valor agregado. (PEREZ-GARCIA e YOAVA BASHAN, 2015)

Perez-Garcia e Yoava Bashan (2015) reportam que para viabilizar a aplicação comercial de microalgas em cultivo heterotrófico e mixotrófico deve haver investimento em pesquisas direcionadas a: bioprospecção e em engenharia metabólica para a seleção de cepas habilitadas na assimilação de diferentes substratos; mais resistentes às variações das condições ambientais e técnicas típicas de produção em grande escala, apresentando crescimento rápido em processos de produção industrial; considerar o cultivo de consórcio de microalgas ou de microalgas com bactérias (co-cultivo); projeto de biorreatores para produção em grande escala; e otimização das operações de separação e recuperação de bioprodutos.

Hallmann (2015) reportou estudos de engenharia genética em microalgas visando obter cepas geneticamente modificadas que levaram à melhor compreensão das funções dos genes e regulação destes, bem como do controle da malha metabólica, deleção de características indesejadas, melhoria de fenótipos ou expressão de fenótipos novos de uso comercial. Entretanto, o autor ressaltou que as 107 toneladas de algas produzidas por ano na indústria biotecnológica são de não transgênicos devido às restrições aos organismos geneticamente modificados e a não aceitação destes pela população em geral.

Perez-Garcia e colaboradores (2011) reportam que o desenvolvimento da genômica, da bioinformática e das engenharias genética e metabólica, pesquisas foram realizadas transformando algas fotoautotróficas obrigatórias em heterotróficas ao introduzir sistemas de transporte de açúcares nas espécies fotossintetizantes. A alga verde *Volvox carteri* é citada como a primeira espécie a ser transformada com o gene hexose/Hp simpoter proveniente de *Chlorella sp.* (espécie que apresenta os dois metabolismos fotoautotrófico e heterotrófico). A literatura reporta que outras espécies como *C. reinhardtii* e a diatomácea *P. tricornutum* também foram transformadas para heterotróficas com sucesso. Os autores comentam que esta

modificação genética poderia ser de mais fácil aceitação pela sociedade, considerando um menor risco para o meio ambiente, visando a aplicação para a produção de hidrogênio (*C. reinhardtii*).

Benedetti e colaboradores (2018) reportaram o desenvolvimento de espécies geneticamente modificadas visando isolar "smart strains" com o objetivo de aumentar o rendimento do crescimento fotossintético de forma a tornar a produção em grande escala viável. Os autores reportam que resultados interessantes foram observados em relação ao uso eficiente da luz ou por meio do fortalecimento vias metabólicas específicas. Mais pesquisas devem ser desenvolvidas utilizando o conhecimento adquirido das engenharias genética e metabólica com o objetivo de implementar novas biorrefinarias, atendendo a realidade de uma biotecnologia com base em uma nova geração de algas.

Estudos de análise de ciclo de vida (ACV) permitem quantificar todos os insumos necessários para o cultivo de microalgas, recuperação destas, extração e purificação dos bioprodutos através do cálculo das emissões gasosas e o impacto destas na natureza. Um estudo de viabilidade econômica de toda a biorrefinaria deve ser realizado para avaliar a viabilidade do cultivo de microalgas como matéria-prima. Estes estudos podem permitir uma melhor compreensão dos diferentes cenários possíveis, visando minimizar o descarte de resíduos e produzir biomoléculas de maior valor agregado. Desta forma, direcionar as etapas de processos, de forma a tornar as biorrefinarias de microalgas comercialmente viáveis e interligas às indústrias químicas e de bioprocessos. (Koyande e colaboradores, 2019)

Em recente publicação, Ubando e colaboradores (2020) reportaram as capacidades de biorrefinarias atualmente existentes, a matéria-prima, e bioprodutos obtidos localizadas na Europa e na América do Norte. Os autores apresentam uma análise do conceito de bioeconomia com os sistemas de biorefinaria no contexto de desenvolvimento sustentável, colocando o conceito de biorrefinaria como ação e estratégia para tornar realidade a bioeconomia. Na Espanha microalgas são aplicadas em tratamento de resíduo aquoso gerando biometano como apresentado na tabela 15.

Tabela 15. Biorrefinarias atualmente existentes (adaptada de UBANDO e colaboradores, 2020; BANU e colaboradores, 2020)



<b>Tipo de Biorrefinaria</b>	<b>Tamanho ou capacidade</b>	<b>Produtos</b>	<b>Localização</b>
Algal	1600 t/ano	Óleos com valor agregado	EUA
Algal	20 t	Óleos ômega 3, biocombustíveis	EUA
Algal	100 000 – 300 000 t/ano	Biocombustível	EUA
Algal	8 000 galões/ano por acre	Bioetanol, gasolina	EUA
Algal	1 600 galões/ano por acre	Etanol, biodiesel	EUA
Algal	2 – 3 milhões t/ano	Astaxantina	Israel
Algal	3 000 galões	Biodiesel, caroteno, astaxantina	EUA
Algal	100 – 200 galões	Bioetanol	Israel
Algal	10 000 t/ano	Biocombustível	Austrália

Dasan e colaboradores (2019) estudaram três condições de cultivo: sistema aberto "raceway", fotobiorreator coluna de bolha e fotobiorreator tubular na produção de biodiesel e bioprodutos. Os autores realizaram estudos de análise econômica considerando a produção de 100.000kg de células em ano de 340 dias e verificaram que o custo de capital para fotobiorreator tubular e de coluna de bolha superior ao custo de operação.

As formas de cultivo de microalgas heterotróficas e mixotróficas podem ser classificadas em quatro importantes categorias de condução de bioprocessos: batelada, batelada alimentada, contínuo, semi-contínuo como reportado por Perez-Garcia e Bashan (2015). Aziz e colaboradores (2020) apresentam e discutem uma estratégia denominada de cultivo em dois estágios, e citada pelos autores como a quinta forma de condução.

O cultivo descontínuo simples é adequado para o crescimento de microalgas heterotróficas podendo atingir concentrações de 20g/L. No cultivo em batelada alimentada há citações de 116 g/L de crescimento heterotrófico de *Chlorella pyrenoidosa* em glicose. Perez-Garcia e Bashan (2015) citam que há poucos trabalhos de cultivo de espécies heterotróficas e mixotróficas em processo contínuo e semi-contínuo reportado na literatura. Os autores relatam concentrações de células menores para o cultivo de microalgas mixotróficas dados de concentrações de 3,6 g/L em batelada (*Scenedesmus obliquus* em lactose) e em batelada alimentada 5,8 g/L (*Nannochloropsis sp.*).

O uso de sistemas denominados híbridos de cultivo para viabilizar os sistemas de biorrefinarias com microalgas tem sido investigado. A estratégia adequada de cultivo visando o aumento da concentração de células de microalgas e a de lipídios tem sido motivo de estudo em sistema de cultivo em dois estágios. Esta nova estratégia visa separar a fase de acumulação de lipídios da fase de crescimento celular, podendo inserir uma etapa extra intermediária entre a primeira (crescimento) e a segunda (acúmulo de reserva lipídica) de recuperação de células e transferência para cultivo com meio com limitação de nutriente. Esta etapa intermediária pode representar um custo operacional e de energia adicional, que pode ser eliminada visando tornar viável economicamente o processo. (JAVED e colaboradores, 2019; AZIZ e colaboradores, 2020). A fase de crescimento celular é geralmente conduzida em fotobiorreatores visando obter elevadas concentrações através da possibilidade do cultivo ser conduzido nas condições ótimas do bioprocessamento e do uso de reator instrumentado e com controle das variáveis relevantes. Na segunda etapa as microalgas são submetidas a vários tipos de stress ao mesmo tempo. O uso de estímulos físicos como mudança de intensidade de luz, temperatura ou químicos, por privação de nutrientes ou adição de indutores, caracterizam esta segunda fase que pode ser conduzida em sistemas abertos de vasos reacionais. (AZIZ e colaboradores, 2020). Perez-Garcia e Bashan (2015) comentam a forma de condução sequencial em dois estágios que envolveria uma primeira fase de exposição do cultivo em período fotoautotrófico, seguido por outro período heterotrófico ou mixotrófico. Yen e Chang (2013) reportaram o cultivo em dois estágios de *Chlorella vulgaris* utilizando a estratégia de dois estágios em cultivo sequencial foto-mixotrófico com resultados de aumento de cerca de 60% (aproximadamente 64%) acima das concentrações celulares obtidas em cultivo fotoautotrófico simples. Zheng e colaboradores (2012) estudaram o cultivo em dois estágios (heterotrófico e fototrófico) para cultivo de células e de lipídios para a produção em larga escala.

Gifuni e colaboradores (2019) observaram que a viabilidade das biorrefinarias de microalgas está relacionada com as operações unitárias adotadas atualmente para extração dos bioprodutos. O efetivo aproveitamento dos componentes das microalgas e a minimização de resíduos está associado à extração em cascata destes bioprodutos levando aos melhores resultados.

del Rio e colaboradores (2020) reportaram o uso de macroalgas para a produção de biocombustíveis, agregando valor às algas marinhas e aos resíduos da indústria de processamento destas. Os altos teores de carboidratos das algas marinhas as tornam uma

biomassa atrativa para a produção de biocombustíveis como o bioetanol por via fermentativa. Os autores discutem os pré-tratamentos tradicionais e as tecnologias emergentes aplicadas para liberar os açúcares fermentescíveis, incluindo as consideradas no referido artigo como tecnologias verdes, visando viabilizar a biorrefinaria do processo biomassa de macroalgas à bioetanol.

Em 2018, Teresa e colaboradores, apresentaram o potencial das microalgas marinhas (mais de 75% de carboidratos e mais de 60% (p/p) de lipídeos em algumas espécies) bem como das macroalgas na elaboração de sistemas de biorrefinarias para a produção de biocombustíveis, bioquímicos e biomateriais. Os autores valorizam as macro e microalgas marinhas pelo fato de serem tolerantes a ambientes salinos, requerendo luz, CO<sub>2</sub>, a elementos comuns como nitrogênio, potássio e fósforo para crescimento e produção de lipídeos, carboidratos e proteínas. Não demanda áreas aráveis e água doce, apresentando taxas de crescimento superiores quando comparadas com biomassa terrestre devido às altas taxas de fotossíntese.

Zollmann e colaboradores (2019) reportam que nos sistemas de biorrefinarias que utilizam macroalgas verdes como matéria-prima a coprodução de dois ou mais bioprodutos como o elemento chave para garantir o sucesso e a viabilidade econômica. Do cultivo de algas verdes bioprodutos para o setor de alimentos (proteínas, fibras, vitaminas, antioxidantes) com excelentes propriedades nutricionais; na alimentação de animais e peixes; na produção de energia e biocombustíveis; uso em processos de biorremediação e tratamento de água; biomateriais poliméricos e compósitos; bio-estimulantes de plantas na agricultura; e aplicações bio-eletrônicas em células solares. Para o projeto de um sistema de biorrefinaria sustentável e produção em larga escala com reduzido impacto ambiental os métodos de extração e separação das frações de interesse devem ser adequadamente selecionados, tendo por meta o aproveitamento total da biomassa algal (Biorrefinaria em cascata). Os autores ressaltam que tanto as estratégias de cultivo e de processamento ainda se apresentam com desafios tecnológicos e de Know-how para a concepção de uma futura biorrefinaria de algas marinhas.

Álvarez-Viñase colaboradores (2019) comentaram que as biorrefinarias de algas marinhas estão menos desenvolvidas em relação às que utilizam biomassas cultivadas em terra. A diferente composição das biomassas cultivadas no mar e as na terra conduz a tecnologias distintas para extração e recuperação de biomoléculas e ao desenvolvimento de novas técnicas para viabilizar a utilização de macroalgas. O desenvolvimento de processos/operações unitárias de extração e recuperação de dois ou mais bioprodutos comercialmente valorizados de algas

vermelhas é reportado pelos autores. Estes processos consistem de etapas em cascata de rotas convencionais e alternativas que visam apresentar diferentes possibilidades de integral valorização dos componentes para a concepção de uma biorrefinaria sustentável com o aproveitamento das frações residuais.

Em 2017, Fernand e colaboradores analisaram o cultivo de macroalgas marinhas como biomassa de interesse para a produção de biocombustíveis (bioetanol, biodiesel, butanol) sob a ótica de biorrefinarias offshore, associando o sistema de pesca ao de cultivo das diferentes espécies de macroalgas no oceano. Os autores analisam os impactos ambientais e sociais do cultivo monitorado em alto mar de algas marinhas. No referido estudo ressaltaram que essas podem promover um aumento da biodiversidade ambiental, recuperar nutrientes inorgânicos como fósforo e nitrogênio e atuar na captura de CO<sub>2</sub> dissolvido. No aspecto socioeconômico estas biorrefinarias podem impactar a vida das famílias de baixa renda que habitam países como Indonésia, Filipinas, China, Índia e Tanzânia. É reportado que o custo da macroalga cultivada em sistemas de fazendas marinhas pode variar de U\$70 a 150 a tonelada em peso seco, e que somente de 8 - 12 % da biomassa é destinada para produção de alimentos. O desenvolvimento de novas tecnologias de cultivo e plataformas química e bioquímica de processamento potencialmente poderão prover um aumento da renda destas famílias que já atuam nas fazendas marinhas. Os autores citam que o cultivo offshore é de grande interesse pois possibilita produzir biomassa algal sem o uso de terra arável da agricultura ou água doce.

O uso integrado de energia de fontes renováveis e cultivo de biomassa algal foi reportado por Chemodanov e colaboradores (2017) em projeto que integra energia térmica-solar aplicada a fotobiorreator para cultivo de macroalgas marinhas verdes como *Cladophora sp.*, *Ulva compressa* e *Ulva rigida* em escala laboratorial. Esta unidade era constituída de 29 fotobiorreatores com 40,4 L cada, operava com sistema contínuo de fluxo, com volume operacional total de 1.171,6 L de água do mar. Os fotobiorreatores construídos em polietileno eram dotados de sistema de mistura por borbulhamento de ar na parte inferior de construção vertical. Foram desenvolvidos para a realização de pesquisas e o monitoramento das etapas de aclimação, crescimento e manutenção das espécies de macroalgas em condições de iluminação solar natural, bem como dos teores de nutrientes e de níveis de homogeneização. É possível conduzir pesquisas com espécies geneticamente modificadas em sistemas fechados e passível de controle e monitoramento do crescimento. O conhecimento das melhores condições

de cultivo em fotobiorreatores visa a adequação desta biomassa em futuras biorrefinarias offshore a partir de pesquisas realizadas offsea, isto é, em laboratório.

Para o desenvolvimento de bioprodutos o conceito de biorrefinarias tem relevante importância sendo o cerne da bioeconomia, ressaltando as diferentes concepções de biorrefinarias de acordo com a natureza da biomassa e produtos/bioprodutos. Desta forma as biorrefinarias seriam classificadas de acordo com a matéria-prima: sacarínea e amilácea; oleaginosas e lipídeos de algas; lignocelulósica, de fibra verde ou de suco verde; de gás de síntese; e do biogás (MEYER, 2017; BALINA e colaboradores, 2017).

## Capítulo V – Perspectivas futuras

O uso de algas, tanto microalgas quanto macroalgas, se revela promissor em relação à sustentabilidade e ao grande número de produtos economicamente valorizados e aplicações possíveis nos mais variados cenários. A pesquisa constante e identificação de novas oportunidades vai tornar possível o seu emprego numa escala cada vez maior e otimizada.

À medida que a sociedade e a economia se transformam do cenário atual para uma situação mais renovável, as algas serão alvo de interesse de estudo e aplicação de vários setores do mundo, se mostrando ambientalmente amigáveis, versáteis, com atividade biológica e sustentáveis, propiciando grande número de benefícios e possibilidades econômicas.

Mohan e colaboradores (2020) reportam que espécies fotossintetizantes como microalgas, macroalgas, cianobactérias e algas marinhas são responsáveis por cerca de 40% da fixação anual de gás carbônico contra 3–6% realizada por plantas terrestres.

A economia circular está vinculada ao desenvolvimento sustentável e envolve simultaneamente aspectos sociais, econômicos e ambientais. Neste contexto pode ser inserida a concepção de matéria-prima de fonte renovável ou não, a recuperação e reciclagem de produtos de forma a zerar o descarte de resíduos no meio ambiente. A bioeconomia circular envolve as várias fontes de biomassas, denominadas matérias-primas de fonte renovável. O uso destas biomassas, residuais ou não, tem seu uso maximizado na concepção das Biorrefinarias, assim como a minimização dos resíduos e emissões gasosas, associadas à conversão em bioenergia e bioprodutos. Novas concepções de Biorrefinarias podem ser apresentadas tendo como meta a produção com altas eficiências e rendimentos de produtos de maior valor agregado a partir das distintas matérias-primas como as lignocelulósicas, algas, resíduos da agroindústria e da indústria de alimentos. (UBANDO e colaboradores, 2020)

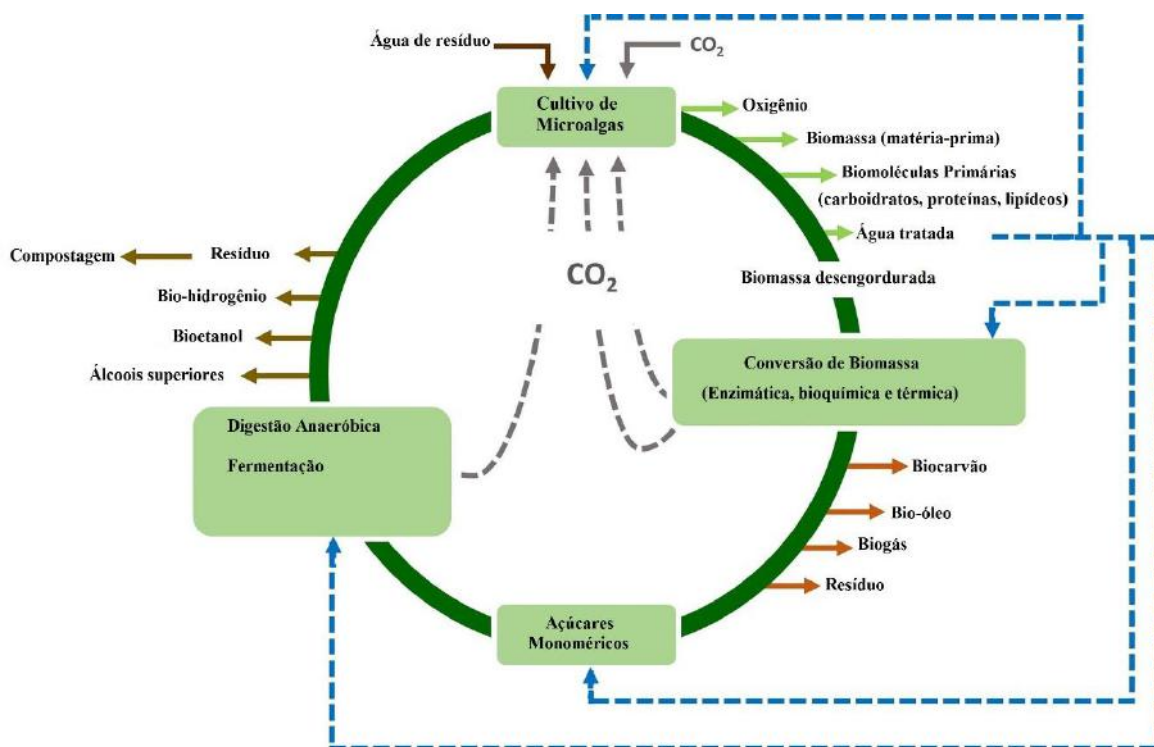
Chemodanov e colaboradores (2017) reportam que a bioeconomia envolve a agricultura marinha que está relacionada com o cultivo de algas marinhas, em especial às macroalgas. O conceito de biorrefinaria marinha é defendido pelos autores, definida como um sistema que inclui o cultivo de matéria-prima de fonte renovável, recuperação e conversão em produtos utilizados em distintos ramos da economia. As macroalgas são potencialmente importantes matérias-primas de fonte renovável, também denominada de biomassa, porém menos

investigadas quando comparadas às plantas terrestres e microalgas. É reportado a baixa ocorrência de publicações encontradas para propagação e crescimento de macroalgas em fotobiorreatores devido às raras pesquisas realizadas ou em desenvolvimento. A maioria dos estudos é conduzida em grandes tanques sem cobertura, com incidência de luz solar natural, no mar ou em pequenos frascos em laboratório. A visão de biorrefinaria marinha requer mais investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação no que se refere ao cultivo de macroalgas.

Diferentes plataformas de tratamento das algas são reportadas na literatura para a obtenção de biomoléculas: bioquímica, química, termoquímica e combustão direta. Desta forma, diferentes configurações de biorrefinarias são reportadas na literatura que visam atender o conceito de bioeconomia e economia circular. (SUDHAKAR e colaboradores, 2019; ABRAHAM e colaboradores, 2019; FERNAND e colaboradores, 2017; MOHAN e colaboradores, 2020; KOYANDE e colaboradores, 2019; BRASIL e colaboradores, 2017; ÁLVAREZ-VIÑAS e colaboradores, 2019, MEYER, 2017, BALINA e colaboradores, 2017)

Mohan e colaboradores (2020) defendem que o desenho de processo em loop fechado é a estratégia mais interessante por facilitar a integração de várias operações unitárias e produtos de forma a promover a reutilização de componentes e durabilidade. O sistema denominado de loop aberto enfrenta desafios como a demanda por grandes quantidades de nutrientes e fertilizantes. No loop fechado, com base no modelo de economia circular, tem-se um aumento da sustentabilidade e viabilidade técnico-econômica na produção de biocombustíveis e outros bioprodutos, tornando o sistema de biorrefinaria autossustentável. A captura de CO<sub>2</sub> e a assimilação rápida de nutrientes por microalgas são dois importantes fatores para o desenvolvimento da economia circular e para a autossustentabilidade (figura 19).

Figura 19. Modelo de biorrefinaria em loop fechado autossustentável. (MOHAN e colaboradores, 2020)



O uso de biomassa algal atende ao requisito base da bioeconomia que é utilizar a matéria-prima de fonte renovável, a base da bioeconomia, através da inovação tecnológica e biotecnológica, propor novas estratégias de cultivos, operações de separação, extração e recuperação de biomoléculas. O projeto sustentável dos processos de produção e dos bioprodutos obtidos a partir de biomassas, a base da denominada bioeconomia, tem no conceito de biorrefinaria se adequado aos princípios de sustentabilidade tais como: priorizar os alimentos; prevenir conflitos no uso da terra; priorizar o uso de biomassa residual; uso em cascata ou associado; e considerar os impactos ecológicos e socioeconômicos. (MEYER, 2017)

Koyande e colaboradores (2019) reportam que o cultivo de microalgas em sistemas abertos ou em lagoas para a produção de biomassa envolve atualmente a recuperação em seus habitats naturais. Embora sejam sistemas abertos e de baixo custo estão vulneráveis às variações do meio ambiente e ao risco de contaminação por predadores. Os sistemas fechados para cultivo em grande escala apresentam dificuldades técnicas para viabilizar a produção em escala industrial. Recentemente, algumas soluções como o uso de diodos especialmente especificados e o de fibras ópticas para o provimento adequado de iluminação interna nos fotobiorreatores foram investigados para adequação dos fotobiorreatores. Entretanto, a extração e recuperação



de componentes de elevado valor agregado e nutracêuticos justifica o uso dos sistemas existentes, apesar das dificuldades técnicas para o escalonamento dos fotobiorreatores.

Associado ao valor comercial de algas relacionado ao aumento do valor nutritivo de alimentos (*Nori, Wakame, Kombu, Arthrospira, Chlorella, Dunaliella*) e das rações para alimentação de animais as algas tem um importante papel na psicultura/aquacultura (*Isochrysis galbana, Tetraselmis suecica*), podem ser incorporadas em cosméticos (Pepha-Tight, Pepha-Ctive). As algas são fonte também para a produção de importantes compostos bioativos (alginatos, carragenina, agar, agarose, ácidos graxos, carotenoides ( $\beta$ -caroteno e astaxantina), esteróis e diversos antioxidantes; biofertilizantes (Maerl); pigmentos fluorescentes (ficobiliproteínas); proteínas recombinantes; drogas (anticâncer, antimicrobianas, anti-HIV, antiviral); e isótopos estáveis (ácidos  $^{13}\text{C}$ -palmítico e  $^{13}\text{C}$ -linoleico). Desta forma, biorrefinarias se apresentam como a estratégia mais interessante para o cultivo de algas tornando economicamente viável a produção de biocombustíveis e atuando na redução das emissões de gases tóxicos que comprometem o meio ambiente. (MOHAN e colaboradores, 2020)

Em 2017 Balina e colaboradores reportaram o conceito de sustentabilidade segundo a concepção de biorrefinaria a partir de algas marinhas ou macroalgas, como fonte de matéria-prima, através da análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*) segundo a perspectiva da bioeconomia como demonstrado na tabela 16. Isto é, na referida tabela estão apontados pontos fortes, pontos fracos, bem como as oportunidades e ameaças para a concepção de biorrefinaria de algas marinhas. Aspectos gerais de implantação do conceito de biorrefinaria, associado à uma estratégia de aproveitamento total do potencial da biomassa de processo em cascata e, conseqüentemente de valorização das macroalgas, agregando valor na produção de químicos de preços de mercado mais elevados, associado às políticas governamentais de incentivos fazem parte da análise SWOT apresentada na tabela 16.

Tabela 16. Análise SWOT para macroalgas (BALINA e colaboradores, 2017)

INTERNOS	FORÇAS	FRAQUEZAS
	<p>Agregar valor à biomassa</p> <p>Desenvolvimento de novas rotas biotecnológicas</p> <p>Recurso ecológico que não requer água potável e diminui a eutrofização</p> <p>Aumento da eficiência da conversão de biomassa – redução de demanda por insumos</p> <p>Produção de bioprodutos e bioenergia e inserção na bioeconomia</p> <p>Contexto de economia circular atendendo ao princípio de resíduo zero</p>	<p>Colaboração entre representantes de diferentes setores do mercado (agro, energia, produtos químicos) para a cadeia de valor de biomassa necessária</p> <p>Política de incentivo e estímulo para a concepção do conceito de biorrefinaria não definidos de maneira clara</p> <p>Desafios científicos e tecnológicos para tecnologias ainda não maduras</p> <p>Estudo e desenvolvimento de conceitos em vez da implementação real de mercado</p> <p>Variabilidade da qualidade e densidade energética da biomassa</p>
EXTERNOS	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
	<p>Abordagem em cascata agregando mais valores à biomassa</p> <p>Fortalecimento da posição econômica de numerosos setores da bioeconomia (agricultura, pesca, energia, química)</p> <p>A biorrefinaria de algas marinhas pode contribuir significativamente para a bioeconomia sustentável</p> <p>Popularização do uso sustentável de algas marinhas para produção de energia está estabelecendo novas metas para políticas de incentivo</p> <p>Acordo internacional de que os recursos devem ser usados com a maior eficiência possível, desenvolvimento e expansão do conceito do biorrefinaria em outros setores</p> <p>Desenvolvimento internacional de aspectos tecnológicos da concepção de biorrefinarias</p>	<p>Mudança econômica e flutuação dos preços dos combustíveis fósseis</p> <p>Concorrência de outras tecnologias de energia renovável satisfazendo as necessidades do mercado</p> <p>Padrões de qualidades mais elevados são aplicados para biomateriais e bioenergia do que a produtos tradicionais</p> <p>Disponibilidade e qualidade de matérias-primas (mudanças climáticas, política, logística)</p> <p>Dificuldades para encontrar capital de investimento para escalas piloto e de demonstração de sistemas de refinaria e ajuste às refinarias existentes</p> <p>Mudança de políticas governamentais</p> <p>Nenhuma demanda de mercado por produtos</p> <p>O aumento da poluição ambiental pode limitar a faixa de produtos na concepção do conceito de biorrefinaria</p>

A análise SWOT para microalgas leva em consideração a produção de biodiesel segundo os autores Gendy e El-Temtamy (2013) como apresentado na tabela 16, onde a análise visa estabelecer indicadores de estímulo para o crescimento da produção de biocombustíveis a partir da cultura de microalgas para os próximos 30 anos.

Tabela 17. Análise SWOT para microalgas (GENDY, EL-TEMTAMY, 2013)

INTERNOS	FORÇAS	FRAQUEZAS
	<p>Processo de conversão de óleo de algas em biodiesel é conhecido e apresenta uma possibilidade de fonte sustentável.</p> <p>As algas são as plantas que mais crescem no mundo. O rendimento de óleo de algas por unidade de área é estimado em 7 a 31 vezes maior que a safra de palma.</p> <p>As algas consomem dióxido de carbono à medida que crescem.</p> <p>As algas são muito importantes como fonte de biomassa.</p> <p>As algas podem ser cultivadas em quase qualquer lugar, mesmo em esgotos ou água salgada, e não requer terras ou alimentos férteis para seu cultivo.</p>	<p>Difícil encontrar uma cepa de algas com alto conteúdo lipídico e rápida taxa de crescimento que não seja muito difícil de colher, econômica e mais adequada para a região onde será produzida (as espécies geneticamente modificadas podem ser uma solução, mas causam outra ameaça).</p> <p>Não é a mesma espécie para diferentes regiões.</p> <p>Tecnologia ainda comercialmente imatura - não são muitas as de grande escala empresas em produção.</p> <p>A sustentabilidade ambiental do biocombustível à base de algas ainda é incerta devido a dados insuficientes e poucas avaliações do ciclo de vida (ACVs) foram feitas.</p> <p>Extração e processamento ainda caros em comparação com outros biocombustíveis.</p> <p>A produção em larga escala pode apresentar muitos outros inconvenientes</p>
EXTERNOS	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
	<p>Possibilidade de produção de outros produtos de maior valor para comercialização e acessar outros mercados.</p> <p>Subsídios e políticas poderiam transformar essa tecnologia economicamente factível.</p> <p>Como as algas consomem dióxido de carbono à medida que crescem, elas poderiam ser usadas para capturar CO<sub>2</sub> de centrais elétricas e outras plantas industriais que de outra forma iriam na atmosfera.</p> <p>O modelo de biorrefinaria integrada de algas pode ser adotado.</p> <p>As propriedades de combustível à base de algas permitem o uso em combustíveis de aviação.</p>	<p>Se a demanda futura de biocombustíveis cair radicalmente, esse setor poderá enfrentar falência.</p> <p>A aceitação do mercado e da sociedade ainda não está clara.</p> <p>Se geneticamente modificado, poderá gerar limitações regulatórias e negação social.</p> <p>Dificuldades de difusão: o grande número de combustíveis concorrentes poderia atrasar os biocombustíveis de algas para obter alto crescimento com base no custo.</p>

Gendy e El-Temtamy (2013) analisam aspectos tecnológicos de bioprocessos de cultivo de microalgas, de políticas de estímulo para a implantação do modelo de biorrefinaria integrada

associados às políticas ambientais e de sustentabilidade, assim como os aspectos socioeconômicos e de mercado consumidor.

Os entraves que podem ser superados com políticas de fomento que direcionem à implantação dos modelos de biorrefinarias integradas e/ou em cascata segundo a premissa de emissão zero. As políticas nacionais e internacionais direcionam para o uso de blends no preparo e formulação de combustíveis de motores a combustão e de aviação, mesclando um percentual proveniente do processamento de matéria-prima de origem fóssil com outro da biomassa.

## **Capítulo VI – Considerações Finais**

Um crescimento econômico sustentável com base em uma biotecnologia-economia pode ser a resposta às questões ambientais para a redução de emissões gasosas poluentes através do uso de biomassas como matérias-primas. A chave do progresso está nas conversões sustentáveis e na logística de sistemas industriais interligados e integrados como a concepção das denominadas biorrefinarias. Desta forma, a seleção de espécies de micro e/ou macroalgas que apresentem altos rendimentos em células e em acúmulo de lipídios, pigmentos, antioxidantes, entre outros bioprodutos, para atender a demanda de diferentes segmentos de mercado como o de energia, cosméticos, alimentos e suplementos alimentares, é fator relevante, ou mesmo o desenvolvimento de espécies geneticamente modificadas que apresentem elevado desempenho e alta expressão de bioprodutos de maior valor agregado. A rentabilidade está associada à configuração estrutural da biorrefinaria e ao leque de bioprodutos comercializado, não restringindo à produção de biodiesel.

### **Sugestões para Pesquisas Futuras**

Como sugestões para o detalhamento do investimento em pesquisa e desenvolvimento de novas estratégias de cultivo de micro e macroalgas, bem como das tecnologias inovadoras aplicadas aos sistemas produtivos da Biotecnologia das Algas podem ser indicados a obtenção de indicadores obtidos através dos:

1. Mapeamento e prospecção tecnológica sobre a Biotecnologia de microalgas;
2. Mapeamento e prospecção tecnológica sobre a Biotecnologia de macroalgas

É feita também a sugestão para a realização de uma biorrefinaria integrada em loop fechado usando microalgas como biomassa e aproveitando resíduos como esgoto doméstico e gás carbônico da poluição atmosférica para a produção de carotenoides de alto valor agregado e destinação da biomassa residual como fertilizante.

## Referências

ANASTAS, PAUL T.; ZIMMERMAN, JULIE B. Design through the 12 principles of green engineering. **Environmental Science & Technology**. V. 37, p. 94A-101A, Março, 2003.

ANASTAS, Paul T.; ZIMMERMAN, Julie B. **Innovations in Green Chemistry and Green Engineering**. Nova Iorque: Springer Business+Science, 2012.

GRAHAM, LINDA E.; WILCOX, LEE W. **Algae**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.

FONSECA, JULIANA AZEVEDO. **Aplicação De Algas Na Indústria Alimentar e Farmacêutica**. 2016. 75f. Projeto de Mestrado em Ciências Farmacêuticas - Universidade Fernando Pessoa, Faculdade de Ciências da Saúde.

BARSANTI, LAURA; GUALTIERI, PAOLO. **Algae: anatomy, biochemistry and biotechnology**. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.

CHEN, Yimin; XU, Changan; VAIDYANATHAN, Seetharaman. (2017): Microalgae: a robust “green bio-bridge” between energy and environment, **Critical Reviews in Biotechnology**, 38:3, 351-368, DOI: 10.1080/07388551.2017.1355774

Suutari, M.; Leskinen, E.; Fagerstedt, K.; Kuparinen, J.; Kuuppo, P. and Blomster, J. (2015). Macroalgae in biofuel production. **Phycological Research**, 63: 1-18. doi:10.1111/pre.12078

KOTHARI, R., PANDEY, A., AHMAD, S., KUMAR, A., PATHAK, V. V., & TYAGI, V. V. (2017). Microalgal cultivation for value-added products: a critical enviro-economical assessment. **3 Biotech**, 7(4), 243. doi:10.1007/s13205-017-0812-8

LAGE, SANDRA; GOJKOVIC, ZIVAN; FUNK, CHRISTIANE; GENTILI, FRANCESCO G. 2018. "Algal Biomass from Wastewater and Flue Gases as a Source of Bioenergy." **Energies** 11, no. 3: 664.

BUGGE, M.M.; HANSEN, T.; KLITKOU, A. 2016. “What Is the Bioeconomy? A Review of the Literature.” **Sustainability** 8, 691

RAVINDRAN, B.; GUPTA, S.K.; CHO, W.-M.; KIM, J.K.; LEE, S.R.; JEONG, K.-H.; LEE, D.J.; CHOI, H.-C. Microalgae Potential and Multiple Roles—Current Progress and Future Prospects—An Overview. **Sustainability** 2016, 8, 1215.

NUNES, BRUNO. 6th German Brazilian dialogue on Science, Research and Innovation. Brazilian Policies and Programs in Bioeconomy. Ministério da ciência, tecnologia, inovações e comunicações. São Paulo, 8 novembro, 2017.

LAURENS, LIEVE M. L. State of Technology Review – Algae Bioenergy An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic IEA BIOENERGY Project 2017

FAO. ALGAE-BASED BIOFUELS: A Review of Challenges and Opportunities for Developing Countries. 2009

CHUNG, Chung, I.K., Beardall, J., Mehta, S. *et al.* Using marine macroalgae for carbon sequestration: a critical appraisal. **J Appl Phycol** **23**, 877–886 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9604-9>

BUX, FAIZAL. **Biotechnological Applications of Microalgae: Biodiesel and Value-Added Products**. 2013 CRC Press, Boca Raton, Florida, 239 pp.

WAGEMANN, Kurt; TIPPKÖTTER, Nils. **Biorefineries**. 2019 Springer International Publishing, Cham, Suíça, 549 pp.

KIM, SE-KWON, TAYLOR, STEVE. 2011 **Marine Medicinal Foods: Implications and Applications, Macro and Microalgae (Advances in Food and Nutrition Research)** Academic Press San Diego, EUA, 458 pp.

BARKIA, I.; SAARI, N.; MANNING, S.R. Microalgae for High-Value Products Towards Human Health and Nutrition. **Mar. Drugs** 2019, 17, 304.

ENAMALA, MANOJ KUMAR; ENAMALA, SWAPNIKA; CHAVALI, MURTHY; DONEPUDI, JAGADISH; YADAVALLI, RAJASRI; KOLAPALLI, BHULAKSHMI; ARADHYULA, TIRUMALA VASU; VELPURI, JEEVITHA; KUPPAM, CHANDRASEKHAR, 2018. "Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae," **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, vol. 94(C), pages 49-68.

TRIPATHI, BHUMI NATH; KUMA, DHANANJAY. **Prospects and Challenges in Algal Biotechnology** 2017 Springer Singapore Springer Nature Singapore Pte Ltd. 326 pp

BAJPAI, RAKESH; PROKOP, ALEŠ; ZAPPI, MARK. **Algal Biorefineries Volume 1: Cultivation of Cells and Products** 2014 Springer Netherlands Springer Science+Business Media Dordrecht 324 pp

BUSCHMANN, ALEJANDRO H. CAMUS, CAROLINA INFANTE, JAVIER NEORI, AMIR ISRAEL, ÁLVARO HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, MARÍA C. PEREDA, SANDRA V.; GOMEZ-PINCHETTI, JUAN LUIS GOLBERG, ALEXANDER TADMOR-SHALEV, NIVA CRITCHLEY, ALAN T. (2017) Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity. **European Journal of Phycology**, 52:4, 391-406, DOI: 10.1080/09670262.2017.1365175

SOUZA, GABRIELLE CHAIBEN CONSENTINO FRANCO DE. **Algas marinhas, Dossiê Técnico**. Instituto de Tecnologia do Paraná - TECPAR. 27 p. 2011.

FACCINI, ANDRÉ LUÍS. Importância econômica e cultivo de algas marinhas. X simpósio de biologia marinha da unisanta. 2007.

DAPPER, TAIOMARA BUTZKER; PUJARRA, SUÉLEN; OLIVEIRA, ANDRESSA JACQUELINE DE; OLIVEIRA, FERNANDO GARRIDO DE; PAULERT, ROBERTA. Potencialidades Das Macroalgas Marinhas Na Agricultura: Revisão. 2013 **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v.7, n.2, p. 295-313, mai./ago. 2014 - ISSN 1981-9951

BICUDO, CARLOS EDUARDO DE MATTOS; MENEZES, MARIÂNGELA. 2010  
Introdução: As algas do Brasil. In: FORZZA, RC., org., et al. INSTITUTO DE PESQUISAS JARDIM BOTÂNICO DO RIO DE JANEIRO. **Catálogo de plantas e fungos do Brasil [online]**. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio: Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010. p. 49-60. Vol. 1. ISBN 978-85-8874-242-0. Available from SciELO Books <<http://books.scielo.org>>.

SHARMA, NIVEDITA; SHARMA, POONAM. Industrial and Biotechnological Applications of Algae: A Review. **Journal Of Advances In Plant Biology**. 2017 1(1):01-25



KHOO, CHON GEK; DASAN, YALEENI KANNA; LAM, MAN KEE; LEE, KEAT TEONG. Algae biorefinery: Review on a broad spectrum of downstream processes and products. **Bioresource Technology** Volume 292, 121964 November 2019

DEMIRBAS, AYHAN; DEMIRBAS, MUHAMMET FATIH. 2010. **Algae Energy Algae as a New Source of Biodiesel**. Springer-Verlag. Londres 204 pp.

PEREZ-GARCIA, OCTAVIO; YOAVA BASHAN, YOAV. **Algal Biorefineries, Volume 2. Microalgal Heterotrophic and Mixotrophic Culturing for Bio-refining: From Metabolic Routes to Techno-economics**. Springer International Publishing Switzerland 2015 A. Prokop et al. (eds.), ppDOI 10.1007/978-3-319-20200-6\_3. 61-131. DOI 10.1007/978-3-319-20200-6\_3

HALLMANN, ARMIN. Algae Biotechnology - Green Cell-Factories on the Rise. **Current Biotechnology**, 2015, 4, 389-415

RANDRIANARISON, GILBERT; ASHRAF, MUHAMMAD AQEEL. Microalgae: a potential plant for energy production. **Geology, Ecology, and Landscapes**, 2017 VOL. 1, NO 2, 104–120. <https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1332853>

BENEDETTI, MANUEL; VECCHI, VALERIA; BARERA, SIMONE; DALL'OSTO, LUCA. Biomass from microalgae: the potential of domestication towards sustainable biofactories. **Microb Cell Fact** (2018) 17:173. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-1019-3>

MALAPASCUA, JOSÉ R. F.; JEREZ, CELIA G.; SERGEJEVOVÁ, MAGDA; FIGUEROA, FÉLIX L.; MASOJÍDEK, JIŘÍ. Photosynthesis monitoring to optimize growth of microalgal mass cultures: application of chlorophyll fluorescence techniques. **AQUATIC BIOLOGY**. Vol. 22: 123–140, 2014. doi: 10.3354/ab00597

THANGAVEL, KALAISELVI; KRISHNAN, PREETHI RADHA; NAGAI AH, SRIMEENA; KUPPUSAMY, SENTHIL; CHINNASAMY, SENTHIL; RAJADORAI, JUDE SUDHAGAR; OLAGANATHAN, GOPAL NELLAIAPPAN; DANANJEYAN, BALACHANDAR. Growth and metabolic characteristics of oleaginous microalgal isolates from Nilgiri biosphere Reserve of India. **BMC Microbiology** (2018) 18:1 DOI 10.1186/s12866-017-1144-x

SILKINA, ALLA; GINNEVER, NAOMI E.; FERNANDES, FLEURIANE; FUENTES-GRÜNEWALD, CLAUDIO. Large-Scale Waste Bio-Remediation Using Microalgae Cultivation as a Platform. **Energies** 2019, 12, 2772; doi:10.3390/en12142772

GUEDES, A. CATARINA; GUEDES, F. XAVIER. Bioreactors for Microalgae: A review of designs, features and applications. In: **Bioreactors, Designs, Properties and Applications**, Cap I, Ed. Paolo G. Antolli e Zhimming Liu. ©2012 Nova Science Publisher Inc. pp 1-51.

C. POSTEN. Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. **Eng. Life Sci.** 2009, 9, No. 3, 165–177

M. GRUBIŠIĆ; M. IVANČIĆ ŠANTEK; B. ŠANTEK. Potential of Microalgae for the Production of Different Biotechnological Products. **Chem. Biochem. Eng. Q.**, 33 (2) 161–181 (2019)

LIU, JIN; HUANG, JUNCHAO; CHEN, FENG. Microalgae as Feedstocks for Biodiesel Production. Chapter · November 2011, DOI: 10.5772/25600 · Source: **InTech**

PEREZ-GARCIA, OCTAVIO; BASHAN, YOAV. Microalgal Heterotrophic and Mixotrophic Culturing for Bio-refining: From Metabolic Routes to Techno-economics. Springer International Publishing Switzerland 2015 61 A. Prokop et al. (eds.), **Algal Biorefineries**, DOI 10.1007/978-3-319-20200-6\_3

SOSA-HERNÁNDEZ, J.E.; ESCOBEDO-AVELLANEDA, Z.; IQBAL, H.M.N.; WELTI-CHANES, J. State-of-the-Art Extraction Methodologies for Bioactive Compounds from Algal Biome to Meet Bio-Economy Challenges and Opportunities. **Molecules** 2018, 23, 2953.

UBANDO, ARISTOTLE T.; FELIX, CHARLES B.; CHEN, WEI-HSIN. Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. **Bioresource Technology** 299 (2020) 122585. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122585>

DASAN YK; LAMMK; YUSUP S; et al. Life cycle evaluation of microalgae biofuels production: effect of cultivation system on energy, carbon emission and cost balance analysis. **Sci Total Environ.** 2019;688:112–128.

AZIZ, MD MANIRUZZAMAN A.; KASSIM, KHAIRUL ANUAR; SHOKRAVI, ZAHRA; JAKARNI, FAUZAN MOHD; LIU, HONG YUAN; ZAINI, NABILAH; TAN, LIAN SEE;

ISLAM, A.B.M. SAIFUL; SHOKRAVI, HOOFAR. Two-stage cultivation strategy for simultaneous increases in growth rate and lipid content of microalgae: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 119 (2020) 109621  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109621>

ZHENG Y; CHI Z; LUCKER B; CHEN S (2012) Two-stage heterotrophic and phototrophic culture strategy for algal biomass and lipid production. **Bioresour Technol** 103:484–488

YEN HW, CHANG JT (2013) A two-stage cultivation process for the growth enhancement of *Chlorella vulgaris*. **Bioprocess Biosyst Eng** 36:1797–1801

CESÁRIO M. TERESA; DA FONSECA M. MANUELA R.; MARQUES MAFALDA M.; DE ALMEIDA M. CATARINA M.D.. Marine algal carbohydrates as carbon sources for the production of biochemicals and biomaterials. **Biotechnology Advances** 36 (2018) 798–817

DEL RIO, PABLO G.; GOMES-DIAS, JOANA S.; ROCHA, CRISTINA M.R.; ROMANI, ALOIA; GARROTE, GIL; DOMINGUES, LUCILIA. Recent trends on seaweed fractionation for liquid biofuels production. **Bioresource Technology** 299 (2020) 122613

ZOLLMANN, MEIRON; ROBIN, ARTHUR; PRABHU, MEGHANATH; POLIKOVSKY, MARK; GILLIS, AMICHAI; GREISERMAN, SEMION; GOLBERG, ALEXANDER. Green technology in green macroalgal biorefineries. **PHYCOLOGIA** 2019, VOL. 58, NO. 5, 516–534 <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1640516>

SUDHAKAR, M.P.; RAMESH, KUMAR, B.; MATHIMANI, THANGAVEL; ARUNKUMAR, KULANTHAIYESU. A review on bioenergy and bioactive compounds from microalgae and macroalgae-sustainable energy perspective. **Journal of Cleaner Production** 228 (2019) 1320-1333

FERNANDA, FRANCOIS; ISRAEL, ALVARO; SKJERMO, JORUNN; WICHARD, THOMAS; TIMMERMANS, KLAAS R.; GOLBERG, ALEXANDER. Offshore macroalgae biomass for bioenergy production: Environmental aspects, technological achievements and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 75 (2017) 35–45

ÁLVAREZ-VIÑAS, MILENA; FLÓREZ-FERNÁNDEZ, NOELIA; TORRES, M. DOLORES; DOMÍNGUEZ, HERMINIA. Successful Approaches for a Red Seaweed Biorefinery. **Marine Drugs** 2019, 17, 620; doi:10.3390/md17110620

CHEMODANOV, ALEXANDER; ROBIN, ARTHUR; GOLBERG, ALEXANDER. Design of marine macroalgae photobioreactor integrated into building to support seagrass culture for biorefinery and bioeconomy. **Bioresource Technology** 241 (2017) 1084–1093

KOYANDE, APURAV KRISHNA; SHOW, PAU-LOKE; GU, RUIXIN; TANG, BENCAN; OGINO, CHIAKI; CHANG, JO-SHU. Bio-processing of algal bio-refinery: a review on current advances and future perspectives. **BIOENGINEERED** 2019, VOL. 10, NO. 1, 574–592. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1679697>

GIFUNI I; POLLIO A; SAFI C; et al. Current bottlenecks and challenges of the microalgal biorefinery. **Trends Biotechnol.** 2019;37:242–252.

ENAMALA, MANOJ KUMAR; ENAMALA, SWAPNIKA; CHAVALI, MURTHY; DONEPUDI, JAGADISH; YADAVALLI, RAJASRI; KOLAPALLI, BHULAKSHMI; ARADHYULA, TIRUMALA VASU; VELPURI, JEEVITHA; KUPPAM, CHANDRASEKHAR. Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 94 (2018) 49–68.

YARNOLD, JENNIFER; KARAN, HAKAN; OEY, MELANIE; HANKAMER, BEN. Microalgal Aquafeeds As Part of a Circular Bioeconomy. **Trends in Plant Science**, October 2019, Vol. 24, No. 10

B.S.A.F Brasil, F.C.P. Silva, F.G. Siqueira. Microalgae biorefineries: The Brazilian scenario in perspective. **New Biotechnology**. Volume 39, Part A, 25 October 2017, Pages 90-98

MEYER, ROLF. Bioeconomy Strategies: Contexts, Visions, Guiding Implementation Principles and Resulting Debates. **Sustainability** 2017, 9, 1031. doi:10.3390/su9061031

BALINA, KARINA; ROMAGNOLI, FRANCESCO; BLUMBERGA, DAGNIJA. Seaweed biorefinery concept for sustainable use of marine resources. **Energy Procedia** 128 (2017) 504–511

T. SUGANYA; M.VARMAN; H.H.MASJUKI; S.RENGANATHAN. Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 55(2016)909–941.

EUROPEAN COMMISSION, Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.

MISHRA, SANJEEV; ROY, MADONNA; MOHANTY, KAUSTUBHA. Microalgal bioenergy production under zero-waste biorefinery approach: Recent advances and future perspectives. **Bioresource Technology** 292 (2019) 122008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122008>

BANU, J. RAJESH; PREETHI; S. KAVITHA; M. GUNASEKARAN; KUMAR, GOPALAKRISHNAN. Microalgae based biorefinery promoting circular bioeconomy-techno economic and life-cycle analysis. **Bioresource Technology** 302 (2020) 122822.

VENKATA, MOHAN; HEMALATHA, MANUPATI; CHAKRABORTY, DEBKUMAR; CHATTERJEE, SULOONA; RANADHEER, PALLE; KONA, RAJESH. Algal biorefinery models with self-sustainable closed loop approach: Trends and prospective for blue-bioeconomy. **Review Bioresource Technology** Volume 295, January 2020, 122128

DAIGLE, MARC; BIHAN, YANN LE; LE´VESQUE, MARC; GRENIER, PAUL. Bio-Valorization of CO<sub>2</sub> Using Microalgae: Techno-Economic Perspective. **INDUSTRIAL BIOTECHNOLOGY** © MARY ANN LIEBERT, INC. \_ VOL. 15 NO. 3 \_ JUNE 2019, 118-132.

BALINA, KARINA; ROMAGNOLI, FRANCESCO; BLUMBERGA, DAGNIJA. Seaweed biorefinery concept for sustainable use of marine resources. **Energy Procedia** 128 (2017) 10.1016/j.egypro.2017.09.067

GENDY, TAHANI S.; TEMTAMY, SEHAM A. EL-. Commercialization potential aspects of microalgae for biofuel production: An overview. **Egyptian Journal of Petroleum** (2013) 22, 43–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpe.2012.07.001>

CHEN, CHUN-YEN; YEH, KUEI-LING; AISYAH, RIFKA; LEE, DUU-JONG; CHANG, JO-SHU. CULTIVATION, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel

production: A critical review. **Bioresource Technology** 102 (2011) 71–81.  
doi:10.1016/j.biortech.2010.06.159