



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**THIAGO SANTOS DE ALMEIDA LOPES**

**ESTUDO DA POTENCIALIDADE DE BIORREMEDIAÇÃO E PRODUÇÃO DE  
BIOCOMBUSTÍVEIS A PARTIR DAS MICROALGAS**

**CAMPINA GRANDE  
2017**

**THIAGO SANTOS DE ALMEIDA LOPES**

**ESTUDO DA POTENCIALIDADE DE BIORREMEDIAÇÃO E PRODUÇÃO DE  
BIOCOMBUSTÍVEIS A PARTIR DAS MICROALGAS**

Artigo apresentado como Trabalho de Conclusão de Curso ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental.

**Área de concentração:** Ciências Ambientais.

**Orientadora:** Prof. Dra. Weruska Brasileiro Ferreira.

**CAMPINA GRANDE  
2017**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

L864e Lopes, Thiago Santos de Almeida.

Estudo da potencialidade de biorremediação e produção de biocombustíveis a partir das microalgas [manuscrito] / Thiago Santos de Almeida Lopes. - 2017.

32 p. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.

"Orientação: Profa. Dra. Weruska Brasileiro Ferreira, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental".

1. Microalgas. 2. Biorremediação. 3. Biocombustíveis. I.  
Título.

21. ed. CDD 662.88

THIAGO SANTOS DE ALMEIDA LOPES

ESTUDO DA POTENCIALIDADE DE BIORREMEDIAÇÃO E PRODUÇÃO DE  
BIOCOMBUSTÍVEIS A PARTIR DAS MICROALGAS

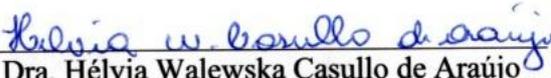
Artigo apresentado como Trabalho de Conclusão de Curso ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental.

Área de concentração: Ciências Ambientais.

Aprovado em: 14/02/2017.

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof. Dra. Weruska Brasileiro Ferreira (Orientadora)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

  
Prof. Dra. Hélvia Walewska Casullo de Araújo  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

  
Prof. Dra. Márcia Ramos Luiz  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos e à  
minha orientadora, por todo apoio ao longo desta caminhada.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por não desistir de mim e tornar possível a realização de mais um sonho.

À minha amada tia Clideci, por todo amor, carinho e dedicação. Sua criação, seus princípios e sua fé são a base do homem que sou hoje, e os carregarei para sempre.

À minha mãe Rosenilde, por todo amor, apoio e entendimento, estando sempre ao meu lado independente das minhas escolhas.

Aos meus avós maternos, Rozália e Daniel, por acreditarem no meu potencial e não medirem esforços para me ajudar, contribuindo com a minha educação e formação.

À minha irmã Yasmim, por sua amizade, carinho, paciência e cumplicidade. Eu não sei o que seria da minha vida sem você!

Aos meus amigos de infância, em especial Aninha e Samuel, por estarem ao meu lado há mais de uma década, compartilhando momentos de felicidade e de extrema importância para minha vida.

Aos meus guerreiros e queridos amigos de graduação, Isabella, Camila e Adriano. Foi muito especial tudo que vivemos juntos durante nossa caminhada. Tenho certeza que foi Deus que uniu nossos caminhos e os levarei para sempre em meu coração.

Ao meu amigo Ramon, por seu apoio e companheirismo, me incentivando e ajudando a buscar o melhor de mim.

À minha querida professora orientadora Weruska, por toda paciência e dedicação, além de todas as oportunidades e ensinamentos que me ajudaram a evoluir durante minha jornada acadêmica.

Aos professores do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da UEPB, por toda contribuição, através das disciplinas e debates, durante minha trajetória na graduação.

Aos meus queridos companheiros do projeto Microalgas, em especial Olga, Iana, Yohanna e Binha, por toda ajuda e dedicação que tornaram possível o desenvolvimento deste estudo.

Aos colegas de classe, pelos momentos de amizade e apoio e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>7</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
<b>Microalgas .....</b>	<b>7</b>
<b>Biorremediação de águas residuárias através das microalgas .....</b>	<b>11</b>
<b>Produção de biocombustíveis a partir das microalgas .....</b>	<b>15</b>
<i>Biodiesel .....</i>	<i>18</i>
<i>Bioetanol .....</i>	<i>19</i>
<i>Biogás .....</i>	<i>19</i>
<i>Bio-óleo .....</i>	<i>20</i>
<i>Biohidrogênio .....</i>	<i>21</i>
<i>Biorrefinarias de microalgas .....</i>	<i>22</i>
<b>Estudos acerca do potencial das microalgas para aplicação em biorrefinarias .....</b>	<b>23</b>
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>27</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>29</b>

## ESTUDO DA POTENCIALIDADE DE BIORREMEDIAÇÃO E PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS A PARTIR DAS MICROALGAS

### RESUMO

O Brasil enfrenta dificuldades com relação à disponibilidade de água e energia. Isso ressalta a importância do tratamento de efluentes e do desenvolvimento de energias alternativas. O baixo investimento do país em saneamento básico tem feito com que quase 60% dos esgotos domésticos sejam lançados sem tratamento, o que acarreta em imensuráveis prejuízos para os corpos hídricos superficiais. A proporção tratada nem sempre é fiscalizada, podendo ou não estar de acordo com os padrões de lançamento. Para minimizar essas dificuldades, surgem as microalgas, com sua capacidade de assimilar compostos de difícil remoção, como nitrogênio, fósforo e metais pesados. Isso destaca seu potencial para biorremediação de efluentes, junto a consequente produção de biomassa que pode ser utilizada para a fabricação de produtos com valor agregado, como os biocombustíveis. Estes se consolidam como os futuros substitutos do petróleo, com a vantagem de serem renováveis, onde a utilização da biomassa microalgal para sua produção apresenta diversos benefícios, como a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>, já que elas possuem maior eficiência fotossintética que as culturas terrestres, além da possibilidade de serem cultivadas em terras não aráveis, o que evita conflitos com a produção alimentícia e gera oportunidades econômicas para o semiárido. Nesta perspectiva, o objetivo deste trabalho foi analisar a potencialidade das microalgas para biorremediação de águas residuárias e obtenção de biocombustíveis, onde foi corroborada, através de revisão de literatura, a eficiência desses microrganismos para absorção de contaminantes e a viabilidade da utilização de sua biomassa para geração de energia e produtos bioquímicos sustentáveis.

**Palavras-Chave:** Microalgas. Biorremediação. Biocombustíveis.

### INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil vem passando por uma grave crise hídrica. O mau uso da água, aliado à poluição dos mananciais e a falta de chuvas, tem reduzido de forma drástica a qualidade das águas superficiais no País. Neste sentido, ressalta-se a importância da remediação de águas residuárias, uma vez que possibilita a redução dos impactos negativos decorrentes da disposição inadequada das mesmas em corpos hídricos.

Inúmeras tecnologias têm sido criadas, testadas e otimizadas para minimizar os problemas causados pelos poluentes nos meios hídricos. No entanto, a mudança contínua nas composições dos efluentes tem obrigado a busca e desenvolvimento de alternativas para a resolução de problemas específicos (PEREIRA, 2016).

Um desses problemas é o surgimento de grandes concentrações de nitrogênio e fósforo sob suas diferentes formas iônicas nas águas residuárias resultando no fenômeno da eutrofização. A solução para este tipo de problema requer a implantação de novas etapas de

tratamento ou adaptação de etapas já existentes. Neste seguimento, as microalgas surgem como um grupo de microrganismos capazes de remediar águas com o inconveniente citado, incorporando nitrogênio e fósforo e utilizando-os como nutrientes.

Microalgas são microrganismos clorofilados, capazes de converter fotossinteticamente dióxido de carbono atmosférico em uma grande variedade de metabólitos e produtos químicos, incluindo proteínas, polissacarídeos, hidrogênio e lipídeos (NASCIMENTO, 2016).

Sabe-se que, além da crise hídrica, o Brasil também passa por uma crise energética. Os combustíveis fósseis, além de finitos, causam diversos problemas ao meio ambiente, como a emissão de CO<sub>2</sub>, um dos gases responsáveis pelo efeito estufa. Nesse contexto, uma alternativa que vem ganhando destaque é a utilização de biocombustíveis.

Das diferentes formas de obtenção de biomassa para geração de energia, as microalgas têm se destacado, principalmente devido a sua maior atividade fotossintética, quando comparadas com plantas superiores e a possibilidade de serem cultivadas ao longo de todo ano em áreas impróprias para a agricultura (COUTO, 2016).

O cultivo de microalgas em águas residuárias associa biorremediação com produção de energias renováveis. Todavia, é importante compreender a cinética de crescimento desses microrganismos nos diversos tipos de efluentes, para que se possa elevar sua produtividade e aumentar a viabilidade do processo. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi estudar o potencial de biorremediação e produção de biocombustíveis a partir das microalgas.

## **METODOLOGIA**

Este trabalho foi realizado através de revisão de literatura, que consiste no processo de busca, análise e descrição de um corpo do conhecimento. A pesquisa foi fundamentada em livros, artigos de periódicos, trabalhos de conclusões de curso, dissertações e teses, nacionais e internacionais, do período de 2007 a 2016, sobre o tema estudado. A partir do levantamento bibliográfico foi elaborada uma discussão, onde foi possível analisar os pontos relevantes do estudo.

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

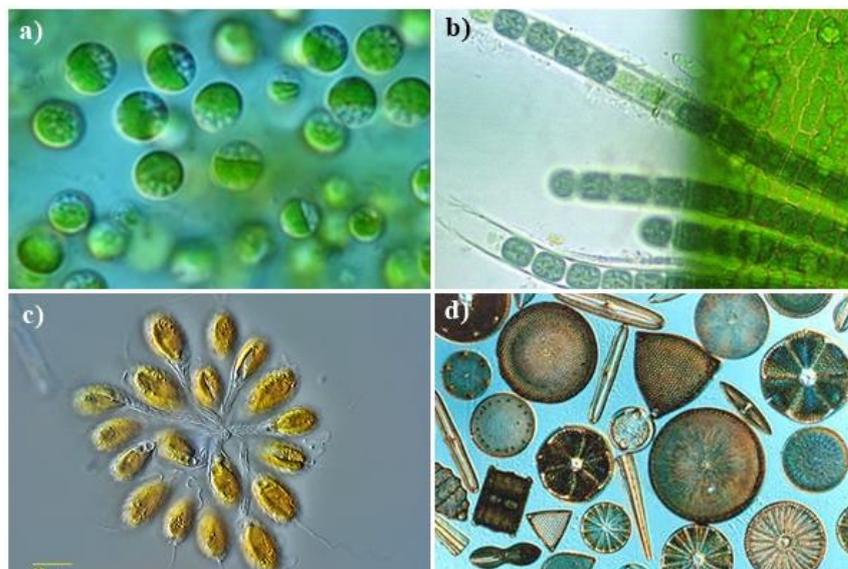
### **Microalgas**

As microalgas fazem parte de um heterogêneo grupo de organismos. Estão entre as formas de vida mais antigas do planeta, sendo consideradas como precursoras das plantas. São predominantemente aquáticas e unicelulares, com estrutura e organização simplificadas, constituindo a base de inúmeras cadeias tróficas. Podem ser encontradas por todo mundo, principalmente em ambientes aquáticos marinhos e de água doce, como também podem ser encontradas na superfície de alguns tipos de solos (LOURES, 2016). Apresentam rápido crescimento, podendo formar colônias, e suportam diferentes faixas de temperatura, pH e intensidade luminosa.

Acredita-se que existam entre 200 a 800 mil espécies de microalgas, dentre as quais apenas 50 mil foram descritas. Todas elas são capazes de produzir  $O_2$ , aumentando sua concentração na atmosfera. Possuem gamas de tamanhos celulares que podem variar de 2 a 200  $\mu m$  e variadas estratégias de alimentação, das autotróficas às heterotróficas. Os fatores ambientais afetam o seu desenvolvimento, podendo reduzir sua taxa de crescimento ou causar algum desequilíbrio metabólico, induzindo as células a estabelecerem um novo estado de crescimento (PÔJO, 2016).

De acordo com sua organização estrutural, as microalgas são classificadas como seres eucariontes. São divididas em doze grupos, onde os mais abundantes, ilustrados na Figura 1, são as algas verdes (*Chlorophyceae*), as verde-azuis (*Cyanophyceae*), as marrons douradas (*Chrysophyceae*) e as diatomáceas (*Bacillariophyceae*) (AL HATTAB; GHALY, 2015).

Figura 1 – Classes mais abundantes de microalgas: a) *Chlorophyceae*; b) *Cyanophyceae*; c) *Chrysophyceae*; d) *Bacillariophyceae*.



Fonte – Google Imagens, 2017.

Uma das características relevantes das microalgas é sua capacidade de transformar a luz solar e o CO<sub>2</sub> presente na atmosfera em variadas formas de energia através do processo da fotossíntese. Por meio desse processo, são produzidos carboidratos, proteínas, lipídios e ácidos nucleicos, sendo que suas proporções na biomassa variam de acordo com as espécies e condições de cultivo (CHISTI, 2007). Todas as microalgas apresentam um ou mais dos tipos de clorofila existentes (*a*, *b*, *c* e *d*), sendo a clorofila *a* o pigmento mais importante para a realização da fotossíntese (AL HATTAB; GHALY, 2015).

A biomassa produzida pela assimilação de CO<sub>2</sub> pode ser transformada em alimento humano e ração animal, uma vez que é fonte de vitaminas e sais minerais. As clorofilas podem ser utilizadas industrialmente como corantes. Já os açúcares e ácidos graxos presentes na biomassa podem ser convertidos em biocombustíveis. Os triglicerídeos das microalgas conhecidas apresentam composição de ácidos graxos semelhante à dos óleos vegetais utilizados para produção de biodiesel (LOURES, 2016).

As microalgas também podem ser utilizadas nas indústrias cosméticas e farmacêuticas, assim como para prevenção da poluição, atuando na biorremediação de efluentes. De maneira geral, esses microrganismos podem ser aplicados em uma diversidade de seguimentos e, por esse motivo, têm sido objeto de diversos estudos. A caracterização e seleção das espécies mais promissoras para cada tipo de aplicação são fatores que contribuem para o sucesso da utilização da biotecnologia algal.

O cultivo de microalgas para fins comerciais começou na década de 60, com a cultura de *Chlorella* sp. no Japão. No Brasil, os primeiros estudos envolvendo microalgas se iniciaram na década de 70, com a criação de um laboratório com algumas dezenas de cepas na Universidade de São Paulo. A partir de 1980 esses cultivos começaram a se difundir pelo país, com o envolvimento de pesquisadores e instituições de vários estados (LOURES, 2016).

Quanto ao seu metabolismo, os cultivos de microalgas podem ser classificados em (1) fotoautotrófico, quando a luz é utilizada como única fonte de energia, que é convertida em energia química através das reações fotossintéticas; (2) heterotrófico, onde somente compostos orgânicos dissolvidos são utilizados como fonte de carbono e energia; (3) mixotrófico, quando ocorre simultaneamente a realização de fotossíntese e o consumo de carbono orgânico e inorgânico; (4) fotoheterotrófico, onde a luz é necessária para promover as reações que degradam os compostos orgânicos inseridos no meio de cultivo (VIDAL, 2016).

A Tabela 1 apresenta de forma resumida as características de cada tipo de cultivo.

Tabela 1 – Características dos cultivos de microalgas quanto ao seu metabolismo.

<b>Condição de cultivo</b>	<b>Fonte de energia</b>	<b>Fonte de carbono</b>
Fotoautotrófico	Luz	Inorgânico
Heterotrófico	Compostos orgânicos	Orgânico
Mixotrófico	Luz ou compostos orgânicos	Inorgânico ou orgânico
Fotoheterotrófico	Luz	Orgânico

Fonte – Adaptado de LOURES, 2016.

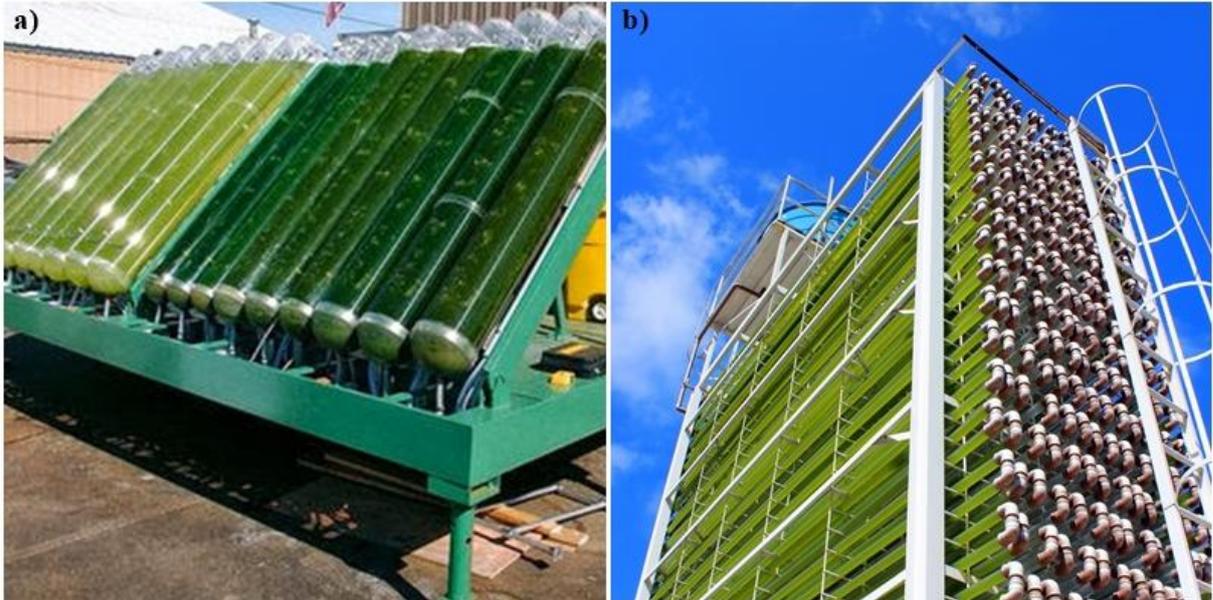
A produção de microalgas em larga escala pode ser realizada em diferentes tipos de sistemas, que podem ser abertos ou fechados. De forma geral, os sistemas abertos são projetados para locais que tenham disponibilidade de área e radiação solar, no entanto favorecem contaminações através de agentes externos e oferecem menor controle sobre as condições de cultivo. Já os sistemas fechados foram desenvolvidos para superar as limitações existentes em relação aos abertos, potencializando a produtividade de biomassa. Por outro lado, apresentam maior custo e demanda energética quando comparados com os sistemas abertos (COSTA, 2016). As Figuras 2 e 3 apresentam exemplos de cultivos de microalgas em sistemas abertos e fechados.

Figura 2 – Cultivo de microalgas em sistemas abertos: a) Centro de pesquisa de microalgas nos Estados Unidos; b) Fazenda no Sul de Taiwan, que utiliza microalgas para produção de alimentos orgânicos.



Fonte – Google Imagens, 2017.

Figura 3 – Cultivo de microalgas em sistemas fechados: a) Centro de pesquisa de microalgas na Embrapa de Brasília-DF; b) Fotobiorreatores de microalgas do NPDEAS, Universidade Federal do Paraná.



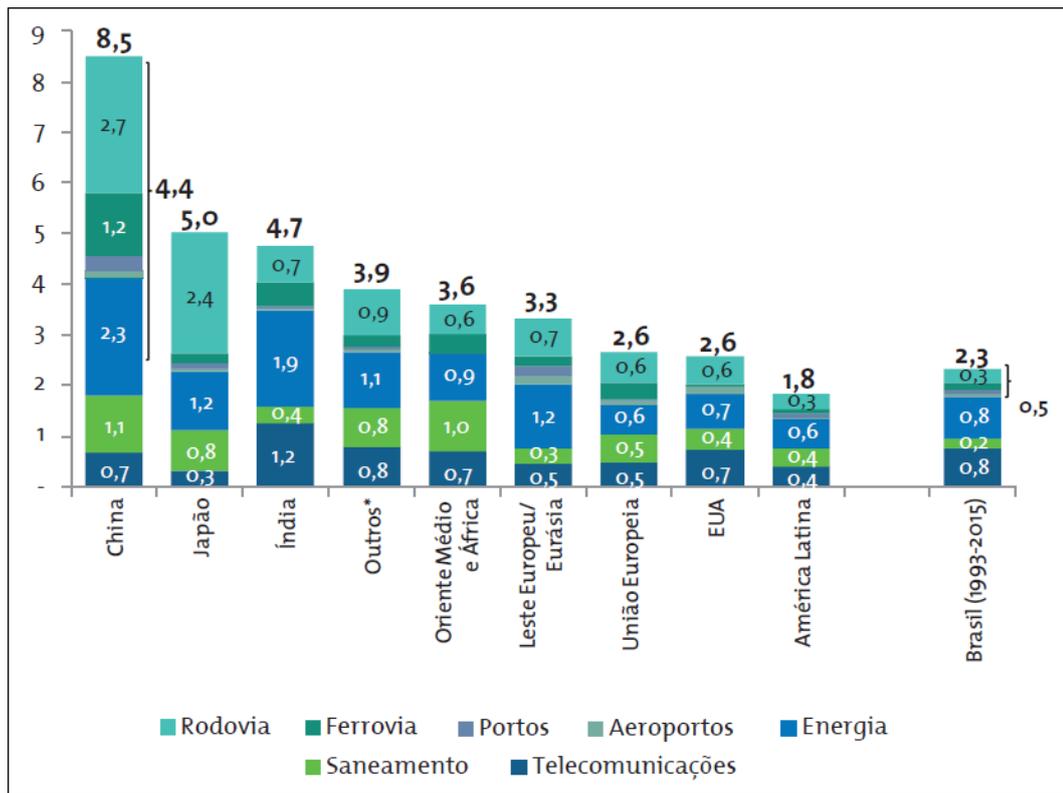
Fonte – Google Imagens , 2017

### **Biorremediação de águas residuárias através das microalgas**

Os serviços de saneamento básico, que compreende o abastecimento de água potável, a gestão de resíduos sólidos, a coleta e tratamento de esgotos e o manejo de águas pluviais, são essenciais para a saúde e o bem-estar da população, assim como para a preservação do meio ambiente (DA SILVA; ALVES; DOS SANTOS PORTILHO, 2016). No entanto, no Brasil, o descaso com as questões que envolvem saneamento ainda é frequente e poucos investimentos públicos são direcionados a esse setor (FERREIRA, 2016).

A Figura 4 apresenta uma média ponderada dos investimentos em infraestrutura como percentual do produto interno bruto (PIB) em diversos países, no período de 1992-2011, e no Brasil, no período entre 1993-2015. Pode-se observar a disparidade entre as economias quanto ao que cada país investe em infraestrutura, destacando-se o baixo investimento do Brasil em saneamento (0,2% do PIB), inclusive quando comparado com economias emergentes como China e Índia. Isso resulta em um atendimento muito aquém do desejado pela sociedade brasileira, colocando o Brasil na 106ª posição do ranking de cobertura do saneamento, entre 192 países (PUGA; PEREIRA, 2016).

Figura 4 – Comparação internacional dos investimentos em infraestrutura (média ponderada, 1992-2011, %PIB).

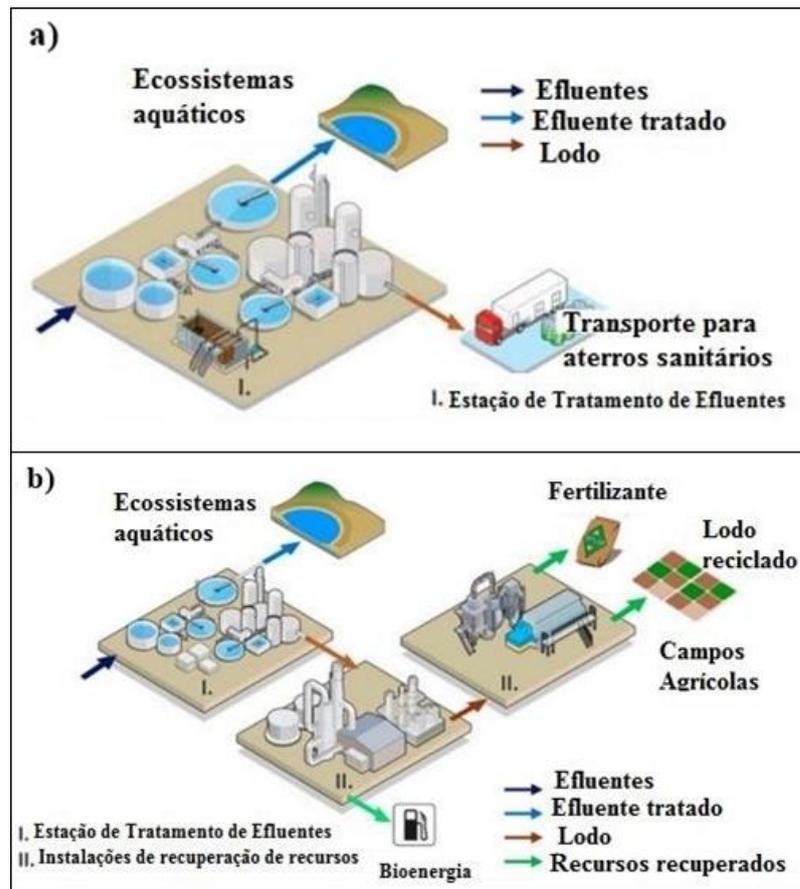


Fonte – Adaptado de Puga; Pereira, 2016.

Dados de 2014 do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) mostram que apenas 40,8% dos esgotos domésticos gerados no Brasil recebem algum tipo de tratamento, fazendo com que quase 60% sejam lançados in natura nos corpos d'água. É importante ressaltar que esses dados representam somente índices de atendimento, não levando em consideração a qualidade dos efluentes gerados nas Estações de Tratamento de Esgotos.

Para se alcançar 100% de tratamento das águas residuárias municipais seria necessário o investimento de R\$ 302 bilhões em infraestrutura de coleta e tratamento de esgoto, ao longo de 20 anos (SUNDSTROM et al., 2015). Diante disso, torna-se cada vez mais importante o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de remediação de efluentes (Figura 5), onde se possa aliar o tratamento de esgotos com a geração de produtos com valor agregado (SILVA, 2016). A biorremediação pelas microalgas se encaixa nesse conceito, uma vez que combina o tratamento de águas residuárias com a produção de biomassa, que pode ser empregada na geração de energia, o que reduz os custos do sistema e acelera o processo de universalização do saneamento.

Figura 5 – Tecnologias de tratamento de efluentes: a) Convencional; b) Nova concepção.



Fonte – SILVA, 2016.

A necessidade de uma otimização nos sistemas de tratamento de águas residuárias está além da busca pelo aproveitamento de seus subprodutos. Sistemas convencionais como lagoas de estabilização e reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) não apresentam resultados satisfatórios de remoção de nitrogênio e fósforo. Já os lodos ativados produzem efluente com boa qualidade e possibilitam, através de variações na configuração do sistema original, uma remoção de nutrientes apropriada. No entanto, os custos com implantação, manutenção e mecanização dos lodos ativados são altos, implicando em desvantagens para esses sistemas (SILVA FILHO, 2009).

Com isso, ressalta-se a importância do desenvolvimento de tecnologias de tratamento de águas residuárias que sejam mais sustentáveis, mas que também sejam eficazes para remoção de nutrientes, uma vez que o tratamento insuficiente juntamente com o lançamento indevido de efluentes domésticos e industriais em corpos hídricos pode acarretar no acúmulo de nitrogênio e fósforo. Estes são nutrientes essenciais para a manutenção da vida aquática, no entanto, seu excesso favorece o crescimento desordenado de algas causando o fenômeno

conhecido como eutrofização, que resulta em impactos negativos para o meio ambiente e para a sociedade.

Outro problema que tem ganhado importância da comunidade científica é a presença de metais pesados – como o arsênio, o chumbo e o mercúrio – em efluentes industriais e em lixiviados de aterros sanitários. Apesar de algumas espécies, em concentrações reduzidas, constituírem micronutrientes essenciais, podem ocasionar efeitos tóxicos agudos ou crônicos para os organismos se presentes em concentrações elevadas. Esta toxicidade acarreta em problemas tanto para os corpos receptores, quanto para sistemas de tratamento que utilizem etapas de biorremediação (pois estas podem ser prejudicadas). As principais tecnologias que permitem a remoção de metais pesados apresentam custo elevado, pois envolvem procedimentos físicos ou químicos complexos, que podem implicar na utilização de reagentes caros (PEREIRA, 2016).

Estudos envolvendo a aplicação de microalgas no tratamento de águas residuárias vêm sido realizados desde 1960, com sua utilização para redução de nitrogênio e fósforo de efluentes que seriam lançados no meio ambiente (NASCIMENTO, 2016). Foi observado que o crescimento de microalgas em águas contaminadas leva a diferentes resultados no que diz respeito aos aspectos quantitativos e qualitativos da biomassa produzida, assim como na incorporação de poluentes. Isso ocorre devido à variabilidade na composição dos efluentes, à capacidade de assimilação de nutrientes de cada espécie de microalga e à sua tolerância às condições físico-químicas do meio em que estão inseridas (PEREIRA, 2016).

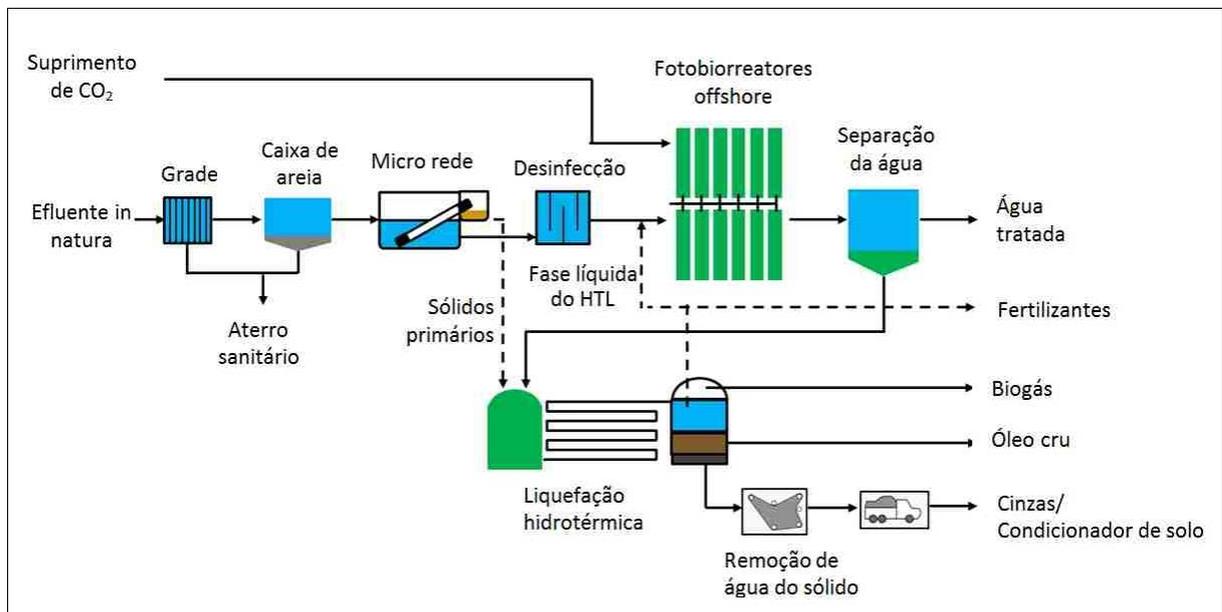
Contudo, inúmeras pesquisas já comprovaram que as microalgas são seres eficientes para o tratamento de águas residuárias, como pode ser observado no estudo de Silva et al. (2016), onde foi avaliado o potencial de biorremediação da microalga *Scenedesmus* sp. sobre efluentes da indústria têxtil e foi obtida remoção de 88,8% de alumínio, 85,2% de cromo, 99,8% de nitratos e 99,9% de nitritos em efluente puro.

Também há possibilidade de se intensificar a remediação por microalgas, utilizando-as em conjunto com outros microrganismos. Sundstrom et al. (2015) implantaram uma estação piloto de tratamento avançado por microalgas, no estado do Alabama (EUA), onde utilizaram a relação simbiótica entre microalgas e bactérias heterotróficas para o tratamento de efluentes domésticos, chegando a uma remoção de 83,1% de nitrogênio, 95,6% de fósforo, 87,2% de DQO e 93,6% de DBO.

Além do potencial de biorremediação, a utilização das microalgas no tratamento de águas residuárias pode dispensar a demanda por energia, destacando-se quando comparada com outras tecnologias, como os lodos ativados que requerem intensa utilização de insumos

energéticos. No piloto elaborado por Sundstrom et al. (2015), cujos processos de tratamento estão representados na Figura 6, a agitação dos fotobiorreatores de microalgas é feita através do movimento das ondas do mar, onde a biomassa microalgal produzida possibilita a geração de biogás ou combustíveis líquidos, melhorando ainda mais o saldo energético do sistema.

Figura 6 – Fluxo de processos do tratamento avançado de águas residuárias por microalgas.



Fonte – SUNDSTROM et al., 2015.

O Brasil proporciona diversas vantagens no que diz respeito à utilização de microalgas para o tratamento de efluentes e geração de produtos com valor agregado, onde se destacam:

- Clima quente, intensa radiação solar e variação mínima entre as condições de verão e inverno, que permitem melhor crescimento microalgal.
- Grande disponibilidade de litoral e de terras não aráveis para implantação dos cultivos, gerando oportunidades econômicas para regiões como o semiárido.
- Infraestrutura de biocombustíveis desenvolvida e preparada, permitindo a integração e comercialização de biodiesel e bioetanol de microalgas, por exemplo.

### Produção de biocombustíveis a partir das microalgas

Energia é um fator de extrema importância para o desenvolvimento econômico de qualquer nação. Sua crescente demanda associada à intensa utilização dos recursos naturais tem sido responsável pelo estabelecimento de uma crise energética mundial. Combustíveis

fósseis como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural, não são renováveis e estão fadados ao esgotamento. Além disso, promovem a emissão de gases poluentes como o CO<sub>2</sub>, óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos, que provocam desequilíbrios ambientais e alterações climáticas.

Neste seguimento as energias renováveis e sustentáveis vêm ganhando cada vez mais espaço, destacando-se os biocombustíveis como a opção mais viável para a redução gradativa do consumo de combustíveis fósseis, uma vez que possibilitam a substituição destes sem a necessidade de alteração de infraestruturas (BARATA, 2016). Além disso, o Brasil já é um destaque na utilização de energias alternativas, com a participação de 41,2% de renováveis em sua Matriz Energética Nacional, que é um valor bem elevado em relação à média mundial de 13,5%, conforme dados de 2015 do Balanço Energético Nacional realizado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Isso ressalta a potencialidade para a integração e comercialização dos biocombustíveis no país.

Produzidos a partir da matéria orgânica, os biocombustíveis podem ser divididos em três gerações, que diferem entre si por fatores como o tipo de matéria-prima e a tecnologia de processamento utilizada. A primeira geração requer um processo simples de produção e compreende os biocombustíveis fabricados a partir de espécies vegetais da agricultura, como soja, milho, cana-de-açúcar e trigo. Essas culturas necessitam de grandes áreas de terras aráveis para seu cultivo, entrando em concorrência com a produção de alimentos, além de utilizarem grandes quantidades de fertilizantes, pesticidas e água para irrigação, contribuindo com o surgimento de problemas ambientais (MAGRO et al., 2016; PÔJO, 2016).

Os biocombustíveis de segunda geração são produzidos através da celulose e de outras fibras vegetais existentes na madeira e em partes não comestíveis das plantas, que são convertidas em combustível por meio de processos bioquímicos ou termoquímicos. Novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas a fim de aumentar o leque de matérias-primas, tornando viável a exploração de espécies de grama, resíduos agrícolas e industriais. Não há competição com a produção de alimentos, visto que são aproveitadas todas as partes das plantas não utilizadas na indústria alimentar. No entanto, o custo de produção é muito mais elevado quando comparado com a primeira geração (BARATA, 2016; LOURES, 2016).

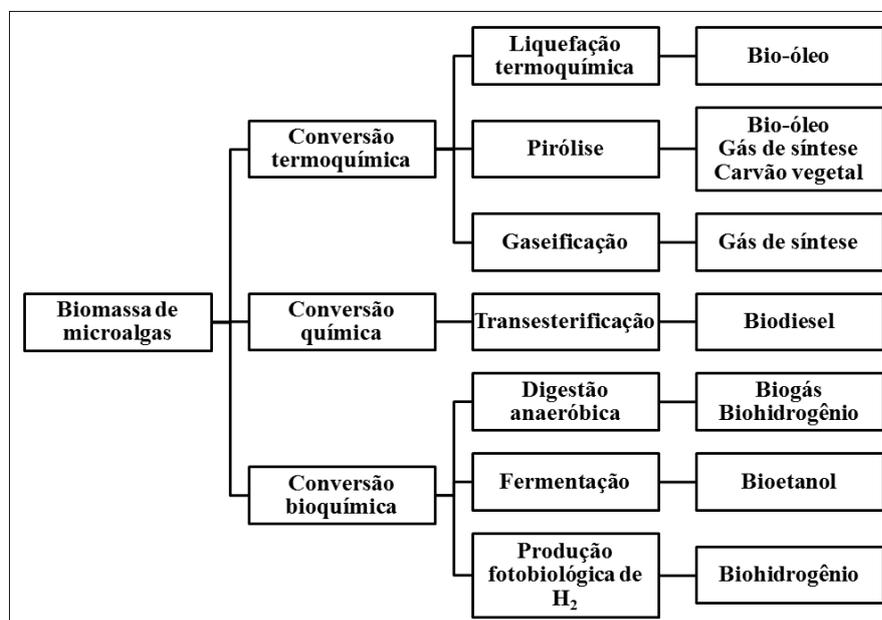
A terceira geração de biocombustíveis compreende os produzidos a partir da biomassa de microrganismos. Vários estudos (MATA et al., 2010; MIRANDA, 2011; SCHIMITZ et al., 2012; TORRES et al., 2014; ORTENZIO et al., 2015) apontam as vantagens das microalgas com relação às outras culturas para obtenção de energia. Dentre elas, destacam-se:

- Elevado teor de compostos biológicos com alto valor comercial, tais como proteínas, carboidratos, lipídios e pigmentos.

- Maiores produtividades de biomassa, óleos e/ou açúcares, que as das plantas terrestres, gerando maior rendimento para produção de biodiesel e bioetanol.
- Capacidade de absorver grande quantidade de CO<sub>2</sub> da atmosfera e de fontes poluentes, podendo ser utilizadas para biofixação de gases do efeito estufa (GEE) em indústrias.
- Possibilidade de cultivo em águas residuárias, promovendo remediação de efluentes e economia de água doce, com redução de impactos ambientais e custos com nutrientes.
- Possibilidade de cultivo em terras não aráveis, evitando competições por áreas com a produção alimentícia e gerando oportunidades econômicas para as regiões semiáridas.
- Produção não sazonal, possibilitando diversas colheitas ao longo de todo o ano.
- Possibilidade de estimulação celular para maior acumulação de óleos e açúcares, através de variações nas condições físico-químicas dos cultivos.

A biomassa microalgal pode ser convertida em formas utilizáveis de energia através de processos termoquímicos, químicos ou bioquímicos (Figura 7). O método a ser adotado deve ser determinado pela quantidade de biomassa obtida, pela forma de energia final desejada e pela viabilidade do processo de conversão (LOURES, 2016). As microalgas que apresentam alta porcentagem de lipídios podem ser utilizadas para a geração de biodiesel. Já as que possuem elevado teor de açúcares são adequadas para a produção de bioetanol. Os resíduos gerados a partir da biomassa podem ser empregados na elaboração de outros biocombustíveis, como o biogás, através da biodigestão anaeróbica, e também fertilizantes orgânicos.

Figura 7 – Processos de conversão da biomassa de microalgas em biocombustíveis.



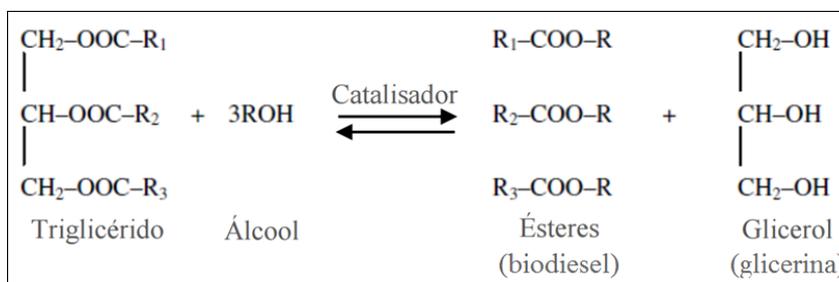
Fonte – Adaptado de AZEREDO, 2012; BORGES et al., 2014.

## Biodiesel

O biodiesel é uma forma de combustível que é biodegradável, não tóxica, apresenta a mesma quantidade de energia que o diesel derivado de petróleo e não promove a liberação de compostos  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$  na atmosfera, se consolidando como uma fonte de energia muito mais limpa e ambientalmente correta. Além disso, pode ser utilizado em motores movidos a diesel, sem modificações dos mesmos (AL HATTAB; GHALY, 2015).

O biodiesel é uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos. A forma mais comum de produção é através da transesterificação química (Figura 8) dos triglicerídeos existentes no óleo extraído da biomassa, que reagem com um álcool (normalmente o metanol ou o etanol) na presença de um catalisador para acelerar a reação (BARATA, 2016).

Figura 8 – Reação de transesterificação para obtenção do biodiesel.



Fonte – Adaptado de BARATA, 2016.

Outro aspecto positivo da geração de biodiesel é que na reação de transesterificação também se obtém a glicerina como produto. Esta possui valor comercial e pode ser empregada na constituição de cosméticos e produtos de limpeza. Quanto à matéria-prima utilizada no processo, as microalgas se destacam com um rendimento de óleo relativamente superior que o de culturas terrestres de primeira geração, como soja e milho, além de demandarem menores requisitos de área, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação de diferentes matérias-primas para produção de biodiesel.

Fonte vegetal	Rendimento de óleo (L óleo/ha.ano)	Utilização do solo (m <sup>2</sup> .ano/kg biodiesel)	Produtividade (kg biodiesel/ha.ano)
Milho	172	66	152
Soja	636	18	562
<i>Jatropha</i>	741	15	656
Canola	974	12	862
Girassol	1.070	11	946
Mamona	1.307	9	1.156
Palma	5.366	2	4.747
Microalgas (baixo teor de óleo)	58.700	0,2	51.927

Microalgas (médio teor de óleo)	97.800	0,1	86.515
Microalgas (alto teor de óleo)	136.900	0,1	121.104

Fonte – Adaptado de MATA et al., 2010.

### ***Bioetanol***

O bioetanol é um combustível obtido via processo bioquímico, através da fermentação do amido encontrado na biomassa. Embora a energia presente no etanol seja 68% menor que a do combustível de petróleo, sua combustão é mais limpa, com emissão inferior de substâncias tóxicas. Sua queima reduz em até 80% o lançamento de CO<sub>2</sub>, quando comparada com a da gasolina, enquanto que elimina completamente a possibilidade de chuva ácida causada pelo dióxido de enxofre (PÔJO, 2016).

Algumas microalgas têm a capacidade de produzir altos níveis de carboidratos como polímeros de reserva, em vez de lipídios. Estas espécies se qualificam como candidatas ideais para a produção de bioetanol, uma vez que seus hidratos de carbono podem ser extraídos para produzir açúcares fermentáveis (PÔJO, 2016). Quanto ao rendimento de bioetanol produzido, mais uma vez é realçado o potencial das microalgas, quando comparado com outras matérias-primas, conforme explanado na Tabela 3.

Outra vantagem é que a produção de bioetanol microalgal pode ser anexada à geração de biodiesel, através da fermentação dos resíduos resultantes após extração do óleo. O CO<sub>2</sub> liberado na fermentação também pode ser aproveitado pelas microalgas (BARATA, 2016).

Tabela 3 – Comparação de diferentes matérias-primas para produção de bioetanol.

<b>Fonte vegetal</b>	<b>Rendimento de bioetanol (gal/acre)</b>	<b>Rendimento de bioetanol (L/ha)</b>
Palha de milho	112-150	1.050-1.400
Trigo	277	2.590
Mandioca	354	3.310
Sorgo doce	326-435	3.050-4.070
Milho	370-430	3.460-4.020
Beterraba açucareira	536-714	5.010-6.680
Microalgas	5.000-15.000	46.760-140.290

Fonte – Adaptado de NGUYEN et al., 2012.

### ***Biogás***

O biogás é produzido através da digestão anaeróbica quer dos resíduos da biomassa, quer da própria biomassa em si sem nenhum processamento. É composto principalmente de uma mistura de metano (55-75%) e CO<sub>2</sub> (25-45%). O metano pode ser utilizado como gás

combustível e também para geração de eletricidade, já o CO<sub>2</sub> proveniente do processo pode ser direcionado para assimilação pelas microalgas. Além disso, os sólidos remanescentes da digestão anaeróbica podem ser reprocessados e usados como fertilizantes, contribuindo para o estímulo às práticas agrícolas sustentáveis (CARDOSO et al., 2011).

As microalgas apresentam altos teores de lipídios, proteínas e carboidratos (Tabela 4), e baixas quantidades de celulose e lignina, fazendo com que a digestão anaeróbia apresente boa estabilidade e eficiência na conversão para biogás, tornando a biomassa microalgal uma matéria-prima em potencial para esse processo (CARDOSO et al., 2011; PÔJO, 2016).

Tabela 4 – Composição química de algumas espécies de microalgas.

<b>Espécies</b>	<b>Proteínas (%)</b>	<b>Carboidratos (%)</b>	<b>Lipídios (%)</b>
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50–56	10–17	12–14
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8–18	21–52	16–40
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella vulgaris</i>	51–58	12–17	14–22
<i>Spirogyra</i> sp.	6–20	33–64	11–21
<i>Dunaliella bioculata</i>	49	4	8
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglena gracilis</i>	39–61	14–18	14–20
<i>Prymnesium parvum</i>	28–45	25–33	22–38
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3
<i>Porphyridium cruentum</i>	28–39	40–57	9–14
<i>Spirulina platensis</i>	46–63	8–14	4–9
<i>Spirulina maxima</i>	60–71	13–16	6–7
<i>Synechococcus</i> sp.	63	15	11
<i>Anabaena cylindrica</i>	43–56	25–30	4–7

Fonte – Adaptado de LOURES, 2016.

Assim como a produção de bioetanol, a geração de biogás também pode ser acoplada à de biodiesel, após a extração dos lipídios, contribuindo para um sistema neutro de carbono se o biogás gerado fornecer energia para as etapas de produção e processamento das microalgas (BARATA, 2016). Também pode ocorrer a integração entre o tratamento de águas residuárias através de microalgas com a produção de biogás, reduzindo os custos do sistema e tornando-o mais acessível, o que colabora para a preservação do meio ambiente e para a universalização do saneamento (SINGH; GU, 2010).

### **Bio-óleo**

Quando a biomassa de microalgas é processada sob altas temperaturas (400–800°C) e ausência de oxigênio (pirólise) são formados produtos em três fases físicas: líquida, sólida e

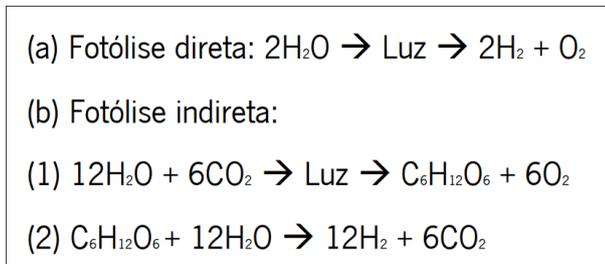
vapor. A fase líquida corresponde a uma mistura complexa denominada bio-óleo, que é um líquido de cor negra composto por diferentes produtos químicos, que pode ser aproveitado como combustível ou utilizado para outras finalidades, cujas características dependem do tipo de microalga usada, das condições de cultivo e dos procedimentos de conversão empregados (CARDOSO et al., 2011).

O bio-óleo também pode ser produzido através da liquefação hidrotérmica e possui diversas características indesejáveis: são altamente ácidos, instáveis, viscosos, contém sólidos e altos teores de oxigênio (35-40% p/p) e água (15-30%). Contudo, devido ao seu promissor potencial para substituir o petróleo bruto, existem diversas pesquisas sobre sua estabilização e modernização, onde foi demonstrado que o bio-óleo microalgal possui qualidade superior ao de biomassas lignocelulósicas, como a madeira. (PÔJO, 2016).

### ***Biohidrogênio***

O biohidrogênio é produzido a partir de microalgas ou cianobactérias através do uso da radiação solar na fotossíntese, para converter água em bio-H<sub>2</sub> no processo conhecido como biofotólise, podendo ocorrer de forma direta ou indireta. A biofotólise direta envolve energia luminosa e os sistemas fotossintéticos microalgais para converter água em O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. Porém, durante a fotossíntese, o oxigênio pode inibir a enzima hidrogenase. A biofotólise indireta supera essa limitação ao produzir O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> em duas fases distintas (PÔJO, 2016). As reações de biofotólise para obtenção do hidrogênio estão apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Reações de biofotólise para obtenção do biohidrogênio.



Fonte – PÔJO, 2016.

A biomassa de microalgas, após colheita e secagem, também pode ser utilizada para produção de biohidrogênio através da digestão por bactérias anaeróbicas. Esse gás possui a vantagem de não se acumular na cultura, sendo rapidamente liberado para a fase gasosa, ao contrário de outros produtos que também passam pela fermentação e podem até atingir níveis

tóxicos. A geração de biohidrogênio pode ser acoplada à mitigação de CO<sub>2</sub> pelas microalgas, bem como à biorremediação de águas residuárias (BARATA, 2016).

### *Biorrefinarias de microalgas*

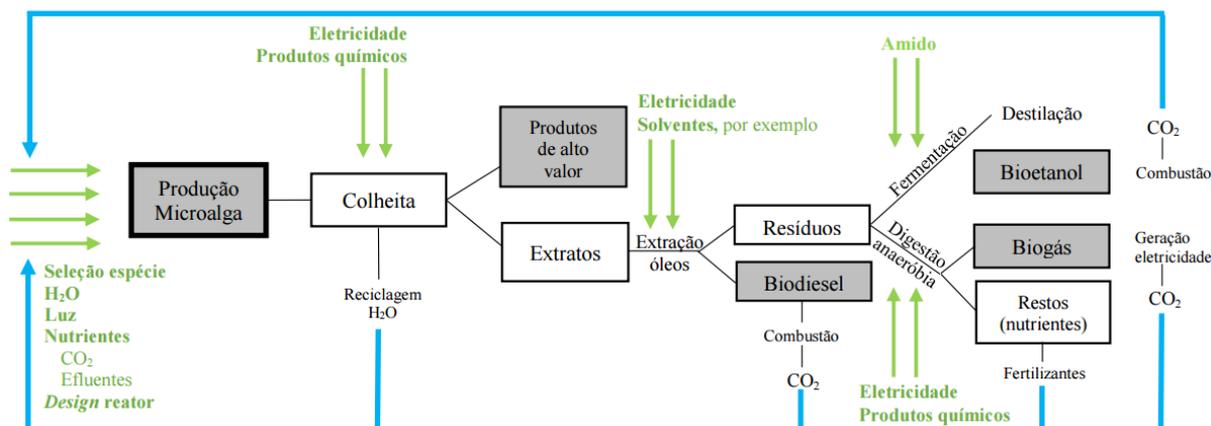
Apesar dos aspectos positivos o uso de microalgas para geração de biocombustíveis ainda é um desafio do ponto de vista econômico, devido a processos como colheita, secagem e processamento da biomassa. As microalgas possuem baixas densidades e permanecem em suspensão no meio de cultura, o que torna a separação difícil e dispendiosa. Além disso, a utilização de sistemas abertos favorece a contaminação dos cultivos, podendo atrapalhar seu crescimento (PÔJO, 2016). Neste sentido, ressalta-se a importância dos investimentos no setor científico, de modo que técnicas mais econômicas e energeticamente sustentáveis sejam desenvolvidas para a fabricação dos biocombustíveis e subprodutos de microalgas.

Mata et al. (2010) indicam que a produção de biocombustíveis a partir de microalgas pode ser acessível e ambientalmente sustentável se estiver associada a outros processos que gerem benefícios econômicos e ambientais, como a biorremediação de águas residuárias e/ou a mitigação de CO<sub>2</sub> proveniente de gases de combustão industriais. Surge então o conceito de biorrefinaria, que é definida como um processo onde a biomassa é convertida numa gama de produtos e formas de energia, utilizáveis em diversas áreas e com máximo aproveitamento econômico. É um procedimento semelhante ao das refinarias de petróleo, onde são obtidos diversos produtos finais a partir de uma matéria-prima inicial (BARATA, 2016).

O conceito de estações de tratamento de esgotos mais sustentáveis, onde se alia a biorremediação de águas residuárias com a geração de produtos com valor agregado, vem de encontro à concepção de biorrefinarias de microalgas. Neste sistema as microalgas podem ser utilizadas para dar o polimento necessário aos efluentes domésticos e agroindustriais, isoladas ou em ação conjunta com bactérias heterotróficas.

Estas liberam CO<sub>2</sub> que pode ser conduzido para os cultivos microalgais, onde a biomassa acumulada poderá ser usada para fabricação de biodiesel, bioetanol, biogás e biohidrogênio, que podem ser empregados no funcionamento do próprio sistema, além da formação de produtos como fertilizantes e ração animal, melhorando a viabilidade econômica do conjunto e promovendo a preservação ambiental. A Figura 10 apresenta um exemplo simplificado da integração de sistemas numa biorrefinaria de microalgas.

Figura 10 – Exemplo simplificado da integração de sistemas numa refinaria de microalgas, onde as setas verdes representam os *inputs* do sistema.



Fonte – BARATA, 2016.

As biorrefinarias surgem como soluções promissoras para o máximo aproveitamento da biomassa de microalgas, contribuindo para a elaboração de fontes energéticas inovadoras, substituição do uso dos combustíveis fósseis, evolução de estações de tratamento de esgotos e criação de uma gama de produtos com valor agregado. Devem-se continuar os estudos para melhorar a viabilidade econômica de processos como colheita e secagem da biomassa e extração de lipídios. Também é importante a escolha da espécie mais adequada de microalga, que se adapte aos nutrientes disponíveis e às condições climáticas locais.

### Estudos acerca do potencial das microalgas para aplicação em biorrefinarias

A potencialidade das microalgas para biorremediação de águas residuárias e obtenção de biocombustíveis tem sido estudada por universidades, centros de pesquisa e empresas por todo o mundo. Num contexto de biorrefinaria, os estudos buscam a viabilidade econômica dos cultivos microalgais, analisando fatores como a substituição de meios sintéticos por efluentes domésticos e agroindustriais, assim como métodos sustentáveis e menos onerosos de colheita de biomassa.

Ramirez (2013) avaliou o desenvolvimento da microalga *Scenedesmus* sp. em meio *Guillard* modificado, suplementado com diferentes concentrações de vinhaça, onde em 32% desse efluente (proporções maiores inibem o crescimento da espécie estudada) foram obtidas remoções de 95,5% de DBO, 96% de nitrogênio e 98,8% de fósforo. Nesta perspectiva, Nayak et al. (2016) analisaram o crescimento da *Scenedesmus* sp. em efluentes domésticos, onde houve remoção de 70-98% de nitratos, fosfatos e DQO.

Escapa et al. (2015) estudaram a capacidade da microalga *Chlorella sorokiniana* para biorremediação de água contaminada com nutrientes e fármacos, onde foi obtida remoção de 70% para os nitratos, 89% para os fosfatos e 93% para o ácido salicílico. A mesma espécie foi estudada por Li et al. (2015), que analisaram a influência da concentração de nutrientes sobre seu acúmulo de lipídios e amido, verificando que a depleção de nitrogênio por curto período de tempo promove o armazenamento de carbono sob a forma predominante de amido e a escassez prolongada desse nutriente estimula uma maior condensação de lipídios. Estudo semelhante foi realizado por Sonmez et al. (2016), que observaram maior acúmulo de lipídios na microalga *Micractinium* sp. em condições de depleção de fósforo.

Nascimento (2016) analisou o crescimento das microalgas *Chlamydomonas biconvexa* e *Tetranephris* sp. em fotobiorreatores *air lift* com efluente de lagoa de estabilização de POME (*palm oil mill effluente*), onde ambas espécies se mostraram eficazes para remoção de nitrogênio e fósforo ( $\geq 60\%$  e  $\geq 90\%$ , respectivamente). No mesmo seguimento, Costa (2016) estudou o cultivo de microalgas em lagoas de alta taxa para o tratamento de efluentes primário e secundário da indústria de carnes, onde obteve crescimento de biomassa e remoção eficiente de nutrientes, superior à dos lodos ativados para redução de nitrogênio e fósforo.

Barreiro et al. (2015) analisaram o desenvolvimento de quatro espécies de microalgas em subproduto aquoso da liquefação hidrotérmica da biomassa, onde a *Chlorella vulgaris* e a *Nannochloropsis gaditana* apresentaram crescimento satisfatório em substituição de até 75% dos nutrientes do meio sintético pela adição da água residuária.

Ma et al. (2016) cultivaram a *Chlorella vulgaris* em esgoto sintético suplementado com glicerol pré-tratado proveniente da produção de biodiesel e observaram que a adição de 10 g/L desse resíduo promoveu bom crescimento celular e o acúmulo lipídico e de biomassa, além da redução de 95% do nitrogênio total do efluente.

Os estudos apresentados corroboram o potencial das microalgas para biorremediação de águas residuárias, uma vez que apontam a eficiência de diversas espécies microalgais para remoção de contaminantes em efluentes domésticos e agroindustriais, destacando-as como alternativas promissoras para o desenvolvimento de estações de tratamento de esgotos mais sustentáveis, assim como para a integração nos processos produtivos das indústrias, com a possibilidade de geração de energia, tornando esses sistemas mais acessíveis do ponto de vista econômico e acelerando a universalização do saneamento, gerando benefícios ambientais e de saúde pública, como a preservação da qualidade das águas superficiais e a mitigação de gases do efeito estufa.

No contexto de biorrefinaria, as águas residuárias podem substituir de forma total ou parcial os meios de cultura sintéticos, dependendo de suas características. No entanto, se faz importante o estudo da cinética de crescimento microalgal para avaliar as influências que os diversos efluentes podem exercer sobre a produtividade de biomassa e o acúmulo de metabólitos, como lipídios e açúcares, pois a composição diferenciada desses meios de cultura alternativos podem inibir ou favorecer algum deles. No estudo realizado por Vidal (2016) o efluente de UASB proporcionou uma boa aglomeração de lipídios na *Chlorella* sp. (18,1%), no entanto não beneficiou a produtividade lipídica da *Scenedesmus* sp., cujo teor de lipídios chegou a 10,4%.

Várias espécies de microalgas possuem a capacidade de viver em ambientes extremos, adaptando o seu metabolismo de acordo com as alterações das condições ambientais, como pH, luminosidade, salinidade e disponibilidade de nutrientes. Isso torna a biomassa microalgal versátil para mudanças em sua composição bioquímica. Estudos como o de Li et al. (2015), Sonmez et al. (2016) e Zhu et al. (2017) comprovam que a depleção de nutrientes como o nitrogênio e fósforo podem ocasionar maiores acúmulos de lipídios e/ou açúcares, o que, de início, pode se tornar interessante para a produção de biodiesel e bioetanol. No entanto, esse aumento de alguns metabólitos pode ser oriundo da energia que as microalgas utilizam para o seu crescimento, sendo importante verificar se houve redução na produtividade de biomassa, o que pode não compensar as condições de “estresse” celular. Tal situação pode ser observada no estudo de Shekh et al. (2016), onde a *Chlamydomonas* sp. produziu maior teor de lipídios pela redução de nutrientes, em contrapartida, houve diminuição na formação de biomassa.

A capacidade das microalgas de se desenvolver em águas residuárias pode otimizar a produção de biocombustíveis com a utilização dos próprios resíduos gerados no processo, como descrito por Barreiro et al. (2015) e Ma et al. (2016), onde os compostos remanescentes da liquefação hidrotérmica e da transesterificação dos óleos da biomassa voltaram para o ciclo produtivo. Isso permite uma redução de custos pela economia de matéria-prima, aumentando a sustentabilidade e a viabilidade do processo; possibilita a geração de energias renováveis, melhorando o balanço energético do sistema; e destina de forma ambientalmente correta os resquícios da produção de biocombustíveis, preservando o meio ambiente.

No que corresponde à colheita de biomassa, Santos (2014) avaliou o efeito da eletrocoagulação sob a microalga *Nannochloropsis* sp. e obteve uma eficiência de remoção de 97%, utilizando uma densidade de corrente de 8,3 mA/cm<sup>2</sup> durante 10 min, revelando esta tecnologia como um método rápido, eficiente e de baixo custo, que permite a separação da biomassa sem a contaminação química desta e sem alteração significativa de sua qualidade

em termos de lipídios e pigmentos. Leitão (2015) analisou a viabilidade da recolha e secagem da microalga *Neochloris oleoabundans*, onde verificou que o método de eletrocoagulação gerou uma economia maior que 70% de energia em comparação com a centrifugação, para a coleta da biomassa, e a utilização de um secador solar permitiu a poupança de energia de 80% com relação à estufa.

Gutiérrez et al. (2015) estudaram a colheita de biomassa microalgal por coagulação-floculação e sedimentação utilizando os flocculantes naturais *Ecotan* e *Tanfloc*, onde ambos possibilitaram rápida e eficiente recuperação da biomassa (90% em 10-20 min) com dosagens de 10 e 50 mg/L, respectivamente, e não prejudicaram a digestão anaeróbia, gerando o mesmo rendimento de metano (~70%) que a biomassa sem flocculantes. Em outro estudo, também no ano de 2015, os mesmos autores buscaram uma alternativa mais sustentável que evitasse possíveis contaminações dos subprodutos microalgais e utilizaram o amido de batata como flocculante, onde a dosagem de 25mg/L promoveu a recuperação de mais de 95% da biomassa e aumentou seu rendimento de biogás, através da biodegradação do amido.

Estudos como o de Santos (2014), Leitão (2015) e Gutiérrez et al. (2015) comprovaram que é possível desenvolver e buscar tecnologias de colheita e secagem da biomassa microalgal que promovam altas eficiências, mínimas chances de contaminação e alterações químicas das células e custos cada vez menores, permitindo que esses processos se tornem mais atrativos economicamente e aumentando a viabilidade da utilização de microalgas para produção de biocombustíveis e produtos bioquímicos sustentáveis.

Apesar dos desafios econômicos e tecnológicos para geração de biocombustíveis e subprodutos de microalgas, diversos empreendimentos nesse ramo têm sido criados, comprovando que os estudos e a evolução das técnicas de produção podem tornar possível a viabilidade econômica desses sistemas em escala real. O Portal *Algae University* exibe uma listagem com algumas produtoras de microalgas distribuídas por todo o planeta. A lista aponta 60 empresas com as mais diversas abordagens de biotecnologia microalgal, onde quatro delas estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Empresas produtoras de microalgas para obtenção de biocombustíveis e produtos bioquímicos.

<b>Companhia</b>	<b>Região</b>	<b>Estratégias/procedimentos</b>
PetroSun	Scottsdale, Arizona, EUA	A PetroSun utiliza um processo chamado de “produção de energia carbono-negativa”. A biomassa microalgal é convertida por pirólise em CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> e fertilizante. O CO <sub>2</sub> é direcionado para a produção de microalgas, enquanto o H <sub>2</sub> é usado para gerar eletricidade. Uma vez que a matéria-prima fixa o CO <sub>2</sub> atmosférico e parte deste vira adubo, que não libera o CO <sub>2</sub> novamente, o resultado líquido é uma redução de

		carbono na atmosfera.
Blue Marble Energy	Seattle, Washington, EUA	A Blue Marble Energy utiliza consórcios bacterianos para, através da fermentação da biomassa, gerar bioenergia e produtos bioquímicos seguros, neutros em carbono e totalmente sustentáveis, promovendo a substituição do petróleo por matérias-primas renováveis. Além disso, a água usada no processo é reciclada e direcionada de volta para o sistema, reduzindo a demanda por água doce.
Seambiotic	Ashkelon, Israel, Ásia	A Seambiotic é uma empresa israelense de tecnologia limpa que utiliza microalgas para o sequestro de carbono e mais uma variedade de aplicações, incluindo produtos bioquímicos, alimentos, saúde e biocombustíveis. O empreendimento está associado com a Companhia de Energia Elétrica de Israel, promovendo a redução das emissões de CO <sub>2</sub> das usinas através do crescimento da biomassa microalgal.
A2BE Carbon Capture	Boulder, Colorado, EUA	A missão da A2BE Carbon Capture foi gerar uma indústria sustentável, cuja produção atenda a mercados de alimentos, combustíveis, agricultura e nutracêuticos. A empresa constrói sistemas de captura e reciclagem de carbono que utilizam microalgas e são adaptáveis ao clima, onde a biomassa gerada é processada por gaseificação, criando um sistema integrado com biocombustível.

Fonte – Adaptado de ALGAE UNIVERSITY, 2017.

Considerando os aspectos produtivos, sabe-se que as microalgas apresentam diversas vantagens em relação às outras matérias-primas utilizadas para fabricação de biocombustíveis. Do ponto de vista técnico, o Brasil apresenta as condições ideais para os cultivos. Essas circunstâncias ressaltam o potencial da biomassa microalgal para aplicação na biorremediação de efluentes e produção de biocombustíveis e produtos bioquímicos no país, onde o conceito de estações de tratamento de águas residuárias mais sustentáveis e biorrefinarias melhoram a viabilidade de sua aplicação.

## CONCLUSÃO

Através deste trabalho foi possível comprovar o enorme potencial das microalgas para a biorremediação de efluentes domésticos e agroindustriais, uma vez que diversas espécies já estudadas apresentaram eficiência para remoção de nutrientes, metais pesados e compostos químicos, como fármacos. Além disso, a predisposição da biomassa microalgal para acumular lipídios e açúcares de forma mais efetiva que as culturas terrestres ressalta sua potencialidade para produção de energias renováveis como biodiesel, bioetanol, biogás e biohidrogênio.

Os múltiplos benefícios proporcionados pelas microalgas, como a mitigação de CO<sub>2</sub> da atmosfera e sua capacidade de se desenvolver em ambientes extremos, sem requerer terras agricultáveis, destacam-nas como matéria-prima do futuro.

A possibilidade do uso desses microrganismos para diversos fins, através de biorrefinarias e da nova concepção de estações de tratamento de efluentes, torna sua aplicação mais viável e contribui para o desenvolvimento sustentável do Brasil. Ademais, apesar dos consideráveis avanços obtidos por pesquisadores e empresas de todo o mundo, a biotecnologia microalgal ainda demanda aperfeiçoamentos, onde se eleva a importância da realização de estudos maiores e investimentos nesse setor, principalmente no Brasil.

## PRODUCTION FROM MICROALGAE

### ABSTRACT

Brazil faces difficulties related to the availability of water and energy. This underscores the importance of effluent treatment and the development of alternative energies. The low investment of the country in basic sanitation has done with that almost 60% of domestic sewage are released without treatment, which results in immeasurable damage to the bodies of surface water. The proportion treated is not always monitored, which may or may not be in accordance with the standards of release. To minimize these difficulties, emerge the microalgae with its ability to assimilate compounds of difficult removal, such as nitrogen, phosphorus and heavy metals. This highlights its potential for bioremediation of wastewater, with the consequent production of biomass that could be used to manufacture products with added value, such as biofuels. These consolidate as future replacements for oil, with the advantage of being renewable, where the use of biomass shear stress for its production has several benefits, such as the mitigation of CO<sub>2</sub> emissions, since they have higher photosynthetic efficiency that crops on land, beyond the possibility of being grown on land, which avoids conflicts with the food production and generates economic opportunities for the semiarid. In this perspective, the aim of this study was to analyze the potential of microalgae for bioremediation of wastewater and production of biofuels, which was corroborated through literature review, the effectiveness of these micro-organisms for the absorption of contaminants and the feasibility of using its biomass for energy generation and biochemical products sustainable.

**Keywords:** Microalgae. Bioremediation. Biofuels.

## REFERÊNCIAS

- ALGAE UNIVERSITY: List of algae companies. Disponível em: <<http://www.algaeu.com/list-of-algae-companies.html>>. Acesso em: 6 de Fevereiro de 2017.
- AL HATTAB, Mariam; GHALY, Abdel. Production of Biodiesel from Marine and Freshwater Microalgae: A Review. *Algae*, v. 14, p. 18, 2015.
- AZEREDO, Vinícius Barbosa Salles de. **Produção de biodiesel a partir do cultivo de microalgas: estimativa de custos e perspectivas para o Brasil**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015 / Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2016.
- BARATA, Ana Filipa Lima. **Microalgas: produção económica e ambientalmente sustentável**. 2016. Tese de Doutorado.
- BARREIRO, Diego López et al. Cultivation of microalgae with recovered nutrients after hydrothermal liquefaction. *Algal Research*, v. 9, p. 99-106, 2015.
- BORGES, Wesley da Silva et al. Produção de bio-óleo empregando microalgas em diferentes meios de cultivo. 2014.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2015.
- CARDOSO, Aderlano da Silva; VIEIRA, Gláucia Eliza Gama; MARQUES, Anelise Kappes. O uso de microalgas para a obtenção de biocombustíveis. *Revista Brasileira de Biociências*, v. 9, n. 4, p. 542, 2011.
- CHISTI, Yusuf. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*, v. 25, n. 3, p. 294-306, 2007.
- COSTA, Luma Soares. Tratamento de efluentes primário e secundário da indústria de carnes com microalgas. 2016.

COUTO, Eduardo de Aguiar do et al. Produção de biomassa em lagoas de alta taxa com diferentes profundidades e seu aproveitamento para geração de energia via liquefação hidrotérmica. 2016.

DA SILVA, Elielson Borges; ALVES, Charles Soares; DOS SANTOS PORTILHO, José Clemilson. Diagnóstico Participativo de Saneamento Básico na comunidade rural do Baixo Rio Araguari, Município de Ferreira Gomes-Amapá, Brasil. **Biota Amazônia (Biote Amazonie, Biota Amazonia, Amazonian Biota)**, v. 6, n. 2, p. 17-23, 2016.

ESCAPA, C. et al. Nutrients and pharmaceuticals removal from wastewater by culture and harvesting of *Chlorella sorokiniana*. **Bioresource technology**, v. 185, p. 276-284, 2015.  
FERREIRA, Patrícia da Silva Figueiredo et al. Avaliação preliminar dos efeitos da ineficiência dos serviços de saneamento na saúde pública brasileira. **Revista Internacional de Ciências**, v. 6, n. 2, p. 214-229, 2016.

GUTIÉRREZ, Raquel et al. Harvesting microalgae from wastewater treatment systems with natural flocculants: effect on biomass settling and biogas production. **Algal Research**, v. 9, p. 204-211, 2015.

GUTIÉRREZ, Raquel et al. Influence of starch on microalgal biomass recovery, settleability and biogas production. **Bioresource technology**, v. 185, p. 341-345, 2015.

LEITÃO, Patrícia Filomena Carramão. **Utilização de tecnologias low cost para a produção, colheita e secagem de biomassa microalgal: comparação com as tecnologias convencionais**. 2015. Tese de Doutorado.

LI, Tingting et al. Regulation of starch and lipid accumulation in a microalga *Chlorella sorokiniana*. **Bioresource technology**, v. 180, p. 250-257, 2015.

LOURES, Carla Cristina Almeida. Otimização do processo de cultivo da microalga *Chlorella minutissima* como fonte de matéria-prima para a produção de biodiesel. 2016.

MA, Xiaochen et al. Cultivation of *Chlorella vulgaris* in wastewater with waste glycerol: Strategies for improving nutrients removal and enhancing lipid production. **Bioresource technology**, v. 207, p. 252-261, 2016.

MAGRO, Francisco Gerhardt et al. Produção de Bioetanol Utilizando Microalgas: Uma Revisão. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 37, n. 1, p. 159-174, 2016.

MATA, Teresa M.; MARTINS, Antonio A.; CAETANO, Nidia S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 1, p. 217-232, 2010.

MIRANDA, João Ricardo Pereira de Cabral. **Produção de bioetanol a partir da microalga *Scenedesmus obliquus***. 2011. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

NASCIMENTO, Rodrigo Carvalho do. Cultivo de microalgas em fotobiorreatores de placas planas para a produção de biomassa e biorremediação de efluente da agroindústria de óleo de palma. 2016.

NAYAK, Manoranjan; KAREMORE, Ankush; SEN, Ramkrishna. Performance evaluation of microalgae for concomitant wastewater bioremediation, CO<sub>2</sub> biofixation and lipid biosynthesis for biodiesel application. **Algal Research**, v. 16, p. 216-223, 2016.

NGUYEN, Thi Hong Minh et al. Bioethanol production from marine algae biomass: prospect and troubles. **Journal of Vietnamese environment**, v. 3, n. 1, p. 25-29, 2012.

ORTENZIO, Ygor Tadeu et al. Cultivo de microalgas utilizando resíduos agroindustriais para a produção de biocombustíveis: perspectivas e desafios. **Bioenergia em Revista: Diálogos** (ISSN: 2236-9171), v. 5, n. 1, 2015.

PEREIRA, Sérgio Filipe Leite. **CULTURA DE MICROALGAS PARA REMOÇÃO DE AZOTO DE LIXIVIADOS DE ATERRO**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade do Porto.

PÔJO, Vânia Isabel Novais Cunha. **Seleção de microalgas com potencial de produção de biocombustíveis**. 2016. Tese de Doutorado.

PUGA, Fernando Pimentel; PEREIRA, Alexandre Porciuncula Gomes. Infraestrutura no Brasil: ajustando o foco. **Textos para discussão**, v. 112, 2016.

RAMIREZ, Nelzy Neyza Vargas. Estudo do crescimento da microalga *Scenedesmus* sp. em vinhaça. 2013.

SANTOS, Marta Moreira dos. **Novas tecnologias de colheita de microalgas para a produção de biodiesel**. 2014. Tese de Doutorado.

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

SHEKH, Ajam Yakub et al. Stress enhances poly-unsaturation rich lipid accumulation in *Chlorella* sp. and *Chlamydomonas* sp. **Biomass and Bioenergy**, v. 84, p. 59-66, 2016.

SILVA, Karen Rocío Pérez et al. Uso de *Scenedesmus* para la remoción de metales pesados y nutrientes de aguas residuales para la industria textil. **Ingeniería solidaria**, v. 12, n. 20, 2016.

SILVA, Ludymyla Marcelle Lima. Avaliação de fotobiorreatores iluminados por diodos emissores de luz para o tratamento de efluentes domésticos. 2016.

SILVA FILHO, HERALDO ANTUNES. **Nitrificação em sistemas de lodo ativado**. 2009. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.[Links].

SONMEZ, Cagla et al. Evaluation of novel thermo-resistant *Micractinium* and *Scenedesmus* sp. for efficient biomass and lipid production under different temperature and nutrient regimes. **Bioresource technology**, v. 211, p. 422-428, 2016.

SUNDSTROM, Eric et al. Avaliação de tratamento avançado de esgoto por algas como alternativa sustentável às tecnologias estabelecidas. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015, Rio de Janeiro. Anais Eletrônicos ABES, 2015.

TORRES, Helenice Silva de Jesus; CASSINI, Servio Tulio Alves; GONÇALVES, Ricardo Franci. Isolamento, sobrevivência e caracterização da biomassa de microalgas cultivadas em efluente de tratamento de esgoto sanitário visando a produção de biocombustíveis. **IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental**, Porto Alegre: ABES, 2014.

VIDAL, Iana Chaiene de Araújo. Estudo da potencialidade de produção de biocombustíveis entre as microalgas *Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp. cultivadas em águas residuárias. 2016.

ZHU, L.-D. et al. Cultivation of *Chlorella* sp. with livestock waste compost for lipid production. **Bioresource Technology**, v. 223, p. 296-300, 2017.