

## BIOMASSA DE MICROALGAS COMO MATÉRIA PRIMA PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS: UMA VISÃO GERAL

Isabelle Mariane de Lima Ferreira <sup>1</sup>  
Alyxandra Carla de Medeiros Batista <sup>2</sup>  
Aruzza Mabel de Morais Araújo <sup>3</sup>  
Amanda Duarte Gondim <sup>4</sup>

### RESUMO

A biomassa de microalgas vem se destacando no contexto de inovação sustentável de energia, a fim de utilizá-las para a produção de biocombustíveis, devido a sua composição de alto valor agregado composta, principalmente, por lipídeos, proteínas e carboidratos que são base para insumos energéticos, fertilizantes e suplementos alimentares. Além das vantagens de cultivo, como: a capacidade de desenvolvimento em condições adversas, como águas residuais; elevada produtividade; ciclo celular curto e não competem diretamente com a produção alimentar. Assim, este trabalho fez um levantamento de todos os fatores envolvidos na produção do biocombustível à base de biomassa de microalgas, que vão do cultivo até as técnicas de conversão mais utilizadas.

**Palavras-chave:** Biomassa de microalga, energia, biocombustíveis.

### INTRODUÇÃO

Dos diversos fatores que contribuem para o andamento da sociedade, como o crescimento e avanço da população, o consumo de energia desempenha um papel significativo. Ademais, os combustíveis fósseis, atualmente utilizados como fontes de energia, representam um risco ambiental, pois são grandes responsáveis pela poluição do ar por meio da liberação de CO<sub>2</sub> e outros compostos tóxicos. Assim, para atender a demanda global por energia, associado com a necessidade de utilizar combustíveis que possam reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), gerou-se um enorme interesse na produção de fontes de energias renováveis. Perante o exposto, os biocombustíveis mostram-se como uma direção ambiental alternativa com grande potencial energético (VOLOSHIN et al., 2016).

---

<sup>1</sup> Doutoranda do Curso de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, [limaisabelle94@gmail.com](mailto:limaisabelle94@gmail.com);

<sup>2</sup> Doutoranda do Curso de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, [alyxandrac@gmail.com](mailto:alyxandrac@gmail.com);

<sup>3</sup> Professora Visitante da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, [aruzzamabel@gmail.com](mailto:aruzzamabel@gmail.com);

<sup>4</sup> Professor orientador: adjunto, Instituto de Química - UFRN, [amandagondim.ufrn@gmail.com](mailto:amandagondim.ufrn@gmail.com);

Os biocombustíveis, são combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos que são, inteiramente, produzidos a partir de matérias-primas de origem renovável, sendo classificados de primeira à quarta geração dependendo da matéria-prima de partida. Os biocombustíveis de primeira geração, incluem as culturas alimentares tradicionais, como: trigo, milho, cana-de-açúcar e soja. Os de segunda geração, utilizam fontes não alimentares, como a biomassa lignocelulósica de mandioca, madeiras, palhas, além de resíduos de óleo. A terceira geração, englobam as algas e micróbios como matéria-prima. E a quarta geração, que faz uso da engenharia genética para modificar as biomassas e gerar produtos com alto rendimento de energia (LEE et al., 2021).

O desenvolvimento de um biocombustível, inicia, sobretudo, com a escolha de uma matéria-prima que atenda os aspectos que decorrem todo andamento da produção. Para isto, essencialmente, levam-se em conta o custo-benefício e as condições ambientais do processo de produção, tais como: o uso de terra e solos aráveis, utilização de regiões biodiversas e recursos sustentáveis, como a água doce. Além disso, a problemática envolvendo a concorrência com a produção de alimentos, é um dos questionamentos que têm sido incluídos nessa abordagem (UMDU; TUNCER; SEKER, 2009).

Em vista disso, as microalgas como matéria-prima para a produção de biocombustível, são uma alternativa para o dilema envolvendo combustível versus alimentos, gerado pela produção das culturas energéticas convencionais. Uma vez que, podem ser cultivadas em locais adversos, em esgoto ou água salgada, não necessitam de terrenos férteis para a produção, além de taxas de crescimento muito mais rápidas do que as culturas terrestres (BABICH et al., 2011).

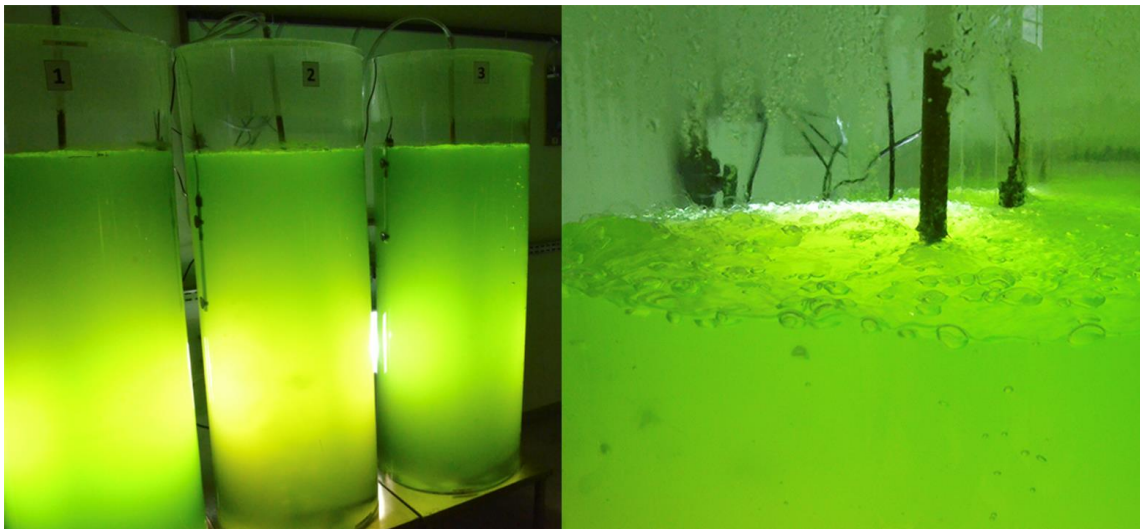
Por conseguinte, este trabalho mostra as características que as microalgas possuem, e a sua capacidade produtiva e energética de excelência para a produção de biocombustíveis, que podem satisfazer a enorme demanda energética da sociedade sem causar déficit de biomassa potencial.

## **MICROALGAS**

As microalgas, são microrganismos fotossintéticos que vivem em ambientes aquáticos (de água doce ou salgada) com a capacidade de converter luz solar, água, dióxido de carbono e nutrientes inorgânicos em biomassa (Figura 1) (DEMIRBAS; FATIH DEMIRBAS, 2011). Podem ser classificados como procariontes ou eucariontes, de acordo com a organização estrutural das células, tendo como representantes de estrutura procarionte as cianobactérias (*Cyanophyceae*) e de estrutura eucarionte as algas douradas (*Chrysophyceae*) (SCOTT et al.,

2010). Contabilizam-se a existência de, aproximadamente, mais de 300.000 espécies de microalgas das quais apenas 25.000 espécies são descritas (DERNER et al., 2006). Além das algas verde-azuladas (cianobactérias) e algas douradas, as microalgas são classificadas quanto aos tipos de pigmentos em: algas verdes (*Chlorophyceae*) e diatomáceas (*Bacillariophyceae*) (MATHIMANI et al., 2019).

Figura 1: Produção de biomassa de microalga.



Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa

Em termos de composição química, as microalgas são compostas, majoritariamente, por lipídeos, proteínas e carboidratos em que as proporções de cada conteúdo depende forma de cultivo de cada espécie (CHOO et al., 2017). A disponibilidade de diferentes espécies de microalgas garantem uma ampla variabilidade de aplicações e produtos, desde culturas alimentares para consumo humano, produtos de valor agregado para a indústria farmacêutica, até a utilização como fontes de energia (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010).

Devido à sua capacidade fotossintética, a produção de biomassa microalgal através da conversão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), luz e nutrientes inorgânicos, permite que o método de cultivo possa ser realizado em sistemas abertos e fechados (PEREIRA et al., 2012). Em sistemas abertos (Figura 2), o cultivo é realizado em lagoas ou tanques abertos expostos e em contato direto com a atmosfera. Possuem vantagens relativas ao baixo custo de produção, construção dos tanques e manutenção acessível, como, por exemplo, a limpeza da superfície. Porém, apresentam como desvantagens: a facilidade de contaminação com o meio e a evaporação da água pela livre exposição com a atmosfera (DEMIRBAS; FATIH DEMIRBAS, 2011). Além

das características sazonais da região que podem interferir na produtividade da biomassa. Nesta forma de cultivo, a espécie de microalga e os nutrientes são introduzidos no tanque e uma roda de pás circulam continuamente para evitar a sedimentação até que a colheita seja realizada (FRANCO et al., 2013).

Figura 1: Sistema de cultivo *raceway*.



Fonte: Instituto Agrônomo do Paraná (Iapar)

No caso dos sistemas fechados (Figura 3), comumente chamados de fotobiorreatores, não há contato direto com o meio externo, permitindo a variabilidade de condições de cultura para cada espécie que será cultivada, e o controle dos parâmetros de crescimento, como pH, temperatura e disponibilidade de CO<sub>2</sub>. Os fotobiorreatores, têm características gerais vantajosas comparadas as de sistema aberto: há maior produtividade de biomassa das microalgas, bem como uma produção em larga escala. As paredes do reator impedem a troca direta de gases no meio e a contaminação com agentes exteriores (como poeira e microrganismos), além de evitar a evaporação e perdas de CO<sub>2</sub>. Como desvantagens, destacam-se: elevado custo de produção, operação e cultivo da microalga. Ademais de danificação do aparato como bioincrustação e superaquecimento (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). Podem ser de dois tipos, tubulares e planares.

Figura 2: Sistema de cultivo em fotobiorreatores.



Fonte: Núcleo de PD de Energia Autossustentável (NPDEAS)

A coleta e separação do meio de cultura, é realizada de acordo com o objetivo determinado da produção da biomassa da microalga. Os métodos mais empregados na separação são: floculação, flotação e centrifugação (CHISTI, 2007). Normalmente, depois destas etapas, a biomassa colhida tem um alto teor de umidade, portanto, deve ser processada e armazenada para deixá-la inalterada por mais tempo (FRANCO et al., 2013). Para isto, uma etapa de desidratação ou secagem é feita, deixando a biomassa da microalga pronta para os processos de conversão que podem ser realizados, como, por exemplo, a produção do biodiesel (LEE et al., 2015).

## MICROALGAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

As microalgas com seu potencial e vantagens de produtividade, aliado à sua composição de alto valor agregado, são exploradas em diferentes esferas de pesquisa (acadêmica e industrial) (CULABA et al., 2020). Sobretudo, como matéria-prima para a produção de biocombustíveis o que, claramente, torna-se evidente pelas inúmeras pesquisas realizadas nesta área nos últimos anos. A relevância das microalgas é dada por suas vantagens, em comparação com a aplicabilidade das culturas convencionais, como matéria prima de biocombustíveis. Destacadamente, são elas:

- Elevada taxa de crescimento, devido ao seu ciclo celular curto (normalmente 24 horas), satisfazendo a elevada demanda por matéria-prima para o biocombustível;
- Não competem diretamente com a produção alimentar;
- Podem ser cultivadas em terras não-aráveis;
- O cultivo pode ocorrer durante o ano inteiro, pois não há dependência com características de uma dada estação do ano;
- Além do baixo consumo de água, podem ser cultivadas e produzidas com as águas residuais integradas com fontes salinas;
- A captura de CO<sub>2</sub> durante a produção possibilita a mitigação de CO<sub>2</sub> de alta eficiência.

Essas vantagens tornam as microalgas fontes de energia alternativas e renovável para a produção de biocombustível com alta capacidade energética e produtiva para substituir o uso dos combustíveis fósseis (KUMAR et al., 2016). De outro modo, a produção de microalgas possui algumas limitações que precisam ser supridas. Principalmente, com relação aos custos de produção, cultivo e manutenção de fotobiorreatores (MOODY; MCGINTY; QUINN, 2014). Bem como, no beneficiamento para a produção de biocombustível, como processos de secagem, extração e conversão; além da estocagem e transporte (LI et al., 2008). No entanto, com o desenvolvimento de pesquisas, essas barreiras serão brevemente minimizadas (RAHEEM et al., 2018).

## POTENCIAL ENERGÉTICO

O caráter promissor das microalgas, destaca-se por sua capacidade de produzir biomassa com composição de alto valor agregado, secretados por metabólitos, e sua proporção pode variar dependendo da espécie da microalga e das condições de cultivo (intensidade luminosa, composição do meio de cultura, temperatura, pH, entre outros) (ABDO et al., 2016). Os constituintes mais relevantes, como: lipídeos, proteínas, carboidratos, pigmentos e biomoléculas, têm potencial para ser utilizados em domínios diferentes, como na indústria farmacêutica, de cosméticos, suplementos alimentares, fertilizantes, ração para animais e empregados na produção de biocombustíveis (PENG et al., 2020).

As microalgas, têm ganhado muito interesse na produção de biocombustível devido a elevada quantidade de biomassa de microalga e o seu alto teor de lipídeos (DVORETSKY et al., 2019). A biomassa de microalga pode ser utilizada para gerar alguns tipos de biocombustíveis renováveis, por exemplo: biodiesel, bio-óleo, bio-gás e bio-hidrogênio (SUPARMANIAM et al., 2019).

A parede celular rígida das microalgas, formada essencialmente por carboidratos (celulose, manose, xilano) e proteínas (ácido urônico), além de glicoproteínas e minerais como cálcio e silicato, dificulta a acessibilidade aos substratos da biomassa (FON SING et al., 2013). Por isso, é fundamental uma etapa de pré-tratamento para romper a parede celular da biomassa e extrair os constituintes intracelulares necessários para a produção do biocombustível, como os lipídeos, proteínas e carboidratos (KUMAR et al., 2016). Além disso, a ruptura celular elimina a necessidade de etapas abrangentes no processo de extração do substrato, como temperatura e pressão elevadas (LEE; LEWIS; ASHMAN, 2012).

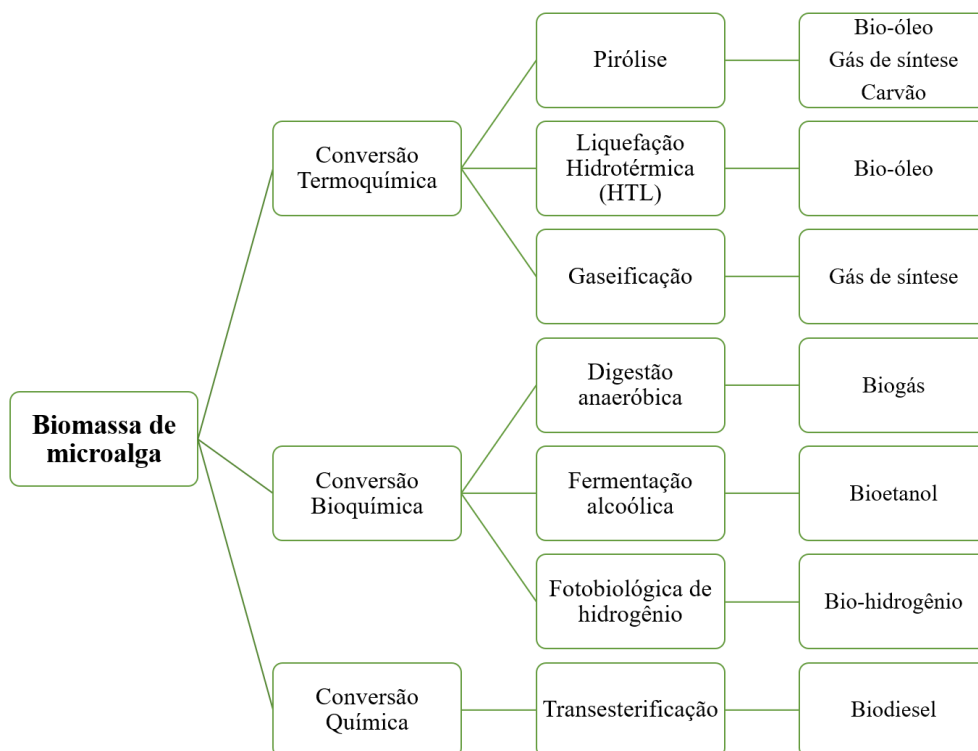
Os métodos utilizados para o rompimento celular podem ser químicos, mecânicos, físicos, enzimáticos e a combinação entre eles. Os métodos químicos usam solventes orgânicos e reações ácido-base para realizar a quebra (SHUBA; KIFLE, 2018). Nos métodos mecânicos, a ruptura ocorre por meio da força gerada por dispositivos mecânicos, tal como moinho de esferas, homogeneizador de alta pressão e cavitação (KUMAR et al., 2016). Os métodos físicos, usam as técnicas de sonificação, autoclave e micro-ondas. Já nos métodos enzimáticos, ocorre digestão enzimáticas com vários tipos de enzimas, como amilase e celulase. Cada espécie carrega uma composição de parede celular diferente, então a indicação do método precisa ser eficaz para dada composição da biomassa microalga (SHIONG KHOO et al., 2020).

## PROCESSOS DE CONVERSÃO PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Até aqui descrevemos todas as características, vantagens e rotas fundamentais até a biomassa estar pronta para ser usada como matéria prima para a geração de biocombustível.

Na produção de biocombustíveis, a partir da biomassa de microalga, todos os componentes principais são explorados. Para isto, vários processos de conversão são usados, dependendo de qual componente foi extraído para a produção, e qual biocombustível deseja ser obtido (BRENNAN; OWENDE, 2010). Os métodos de conversão são divididos em: processos termoquímicos, bioquímicos e químicos (LEE et al., 2015). O percurso para a produção de biocombustível a partir das microalgas, normalmente, segue o fluxograma 1 mostrado a seguir.

Fluxograma 1: Processos de conversão e produtos gerados a partir da biomassa de microalga.



- **Processos termoquímicos**

Na conversão termoquímica, ocorre a decomposição térmica dos componentes orgânicos da biomassa gerando produtos líquidos, sólidos e gasosos. Este processo, compreende as técnicas de pirólise, liquefação e gaseificação.



A pirólise é um método de decomposição térmica da matriz orgânica, na ausência de oxigênio e altas taxas de aquecimento (cerca de 50-1000 °C/min) e temperatura de média a alta (350-700 °C), gerando um produto líquido pirolítico denominado bio-óleo, pela condensação de vapores orgânicos (BRIDGWATER, 2012). O bio-óleo é um combustível líquido cru, com características semelhantes ao combustível de origem fóssil, composto por hidrocarbonetos, com alto valor de aquecimento e alta viscosidade. Além do bio-óleo, uma fração gasosa (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) e carvão também são produzidos (BRENNAN; OWENDE, 2010).

Na gaseificação, o processo ocorre em atmosfera inerte, ou reduzida de oxigênio, e alta temperatura (800-1000 °C) (KHOO et al., 2013). Na tecnologia, a biomassa reage com oxigênio e vapor (água) para gerar uma mistura de CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N e CH<sub>4</sub>, ou seja, gás de síntese que já é em si um combustível (BRENNAN; OWENDE, 2010).

A liquefação hidrotérmica (HTL), é um processo no qual ocorre conversão da biomassa da microalga, na sua forma úmida, em baixa temperatura (300-350 °C) e alta pressão (5-20 MPa), para gerar o combustível líquido, bio-óleo (KUMAR et al., 2016). Durante a reação HTL, a água atua como um solvente de reação e reagente para a hidrólise da biomassa. A técnica tem a vantagem de converter a biomassa úmida em energia. Visto que, a etapa de secagem da biomassa é um dos processos que mais consomem energia (LEE et al., 2015).

Como descrito acima, os processos termoquímicos, normalmente, geram produtos sólidos (carvão), líquidos (fração orgânica condensada), gasosos (fração orgânica não condensada), além de cinzas (material inorgânico). Cada fração desses produtos dependem dos parâmetros utilizados em cada processo, especialmente, temperatura, pressão, condições do reator, tempos de residência e taxas de aquecimento. Além disso, o auxílio de catalisadores, durante ou depois dos processos, pode melhorar a qualidade dos produtos, deixando-os com composição mais semelhante com os combustíveis à base de petróleo ou biocombustíveis estáveis prontos para utilização.

- **Processos bioquímicos**

Os processos bioquímicos alcançam a conversão da biomassa de microalga em biocombustível através dos processos de digestão anaeróbica, fermentação alcoólica e produção fotobiológica de hidrogênio.

A digestão anaeróbica é um processo que converte a matriz orgânica da biomassa em metano (CH<sub>4</sub>), também conhecido como biogás, além de traços de outros gases, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S). O processo ocorre em três estágios contínuos

de hidrólise, fermentação e metanogênese (BRENNAN; OWENDE, 2010). Durante a hidrólise, os compostos orgânicos são transformados em açúcares solúveis, seguidamente, fermentados por bactérias, convertendo os açúcares em álcoois, ácidos graxos voláteis (AGV), ácido acético, e uma porção de gás com  $H_2$  e  $CO_2$  que são metabolizados por metanogênese em  $CH_4$  (60-70%) e  $CO_2$  (30-40%). Esta metodologia, alcança altas taxas de recuperação de energia através da conversão da biomassa de microalga, além da possibilidade de utilizar a biomassa com alto teor de umidade (80-90%) (HOSSAIN, 2019).

No processo de fermentação, ocorre a conversão da biomassa em etanol. Inicialmente, a biomassa é triturada e o amido contido é convertido em açúcar na presença de enzimas ou ácido (GANESAN et al., 2020). Posteriormente, é processado por leveduras que convertem o açúcar em etanol. Concluindo, com a etapa de separação do etanol em uma coluna de destilação (HOSSAIN, 2019). Para obter a biomassa de microalga à base de amido para a produção do etanol, a biomassa precisa ser pré-tratada para que o amido seja extraído da microalga por meios mecânicos ou enzimáticos (MCKENDRY, 2002).

A produção fotobiológica de hidrogênio ocorre, pois, as microalgas possuem características genéticas, metabólicas e enzimáticas necessárias para produzir o gás hidrogênio ( $H_2$ ) (BRENNAN; OWENDE, 2010). Sob condições anaeróbicas (ausência de gás oxigênio,  $O_2$ ), as microalgas eucariontes, podem produzir hidrogênio ( $H_2$ ) como um doador de elétrons (resultando em  $H^+$ ) no processo de fixação de  $CO_2$  no escuro, ou evoluir  $H_2$  na luz. Na fotossíntese, as microalgas convertem as moléculas de água em íons de hidrogênio ( $H^+$ ) e oxigênio (HOSSAIN, 2019). Os íons de hidrogênio são então, sucessivamente, convertidos por enzimas hidrogenase em  $H_2$  (MELIS, 2002).

A produção fotossintética do hidrogênio ( $H_2$ ) a partir da água, possui duas perspectivas essenciais: na primeira, a produção de  $H_2$  é um processo de fotossíntese de duas etapas que compreendem a produção de oxigênio fotossintético e a geração do gás hidrogênio ( $H_2$ ) separadas. No primeiro momento, as algas são cultivadas fotossinteticamente em condições normais. No segundo momento, as algas são privadas de enxofre, estimulando condições anaeróbicas e a produção consistente de hidrogênio (BRENNAN; OWENDE, 2010). A segunda perspectiva, considera a produção simultânea de oxigênio fotossintético e gás hidrogênio ( $H_2$ ). Nesta análise, os elétrons que são liberados na oxidação fotossintética da água, são postos diretamente no processo de evolução do hidrogênio ( $H_2$ ) mediado pela enzima hidrogenase. O oxigênio liberado durante a fotossíntese inibi a hidrogenase que produz o  $H_2$ , por isso, a cultura de biomassa deve ser submetida a condições anaeróbicas (HOSSAIN, 2019).

Como visto, todos os processos bioquímicos são capazes de gerar energias limpas, eficientes e com alto valor de aquecimento.

- **Processo químico: produção de biodiesel**

A conversão química, envolve a conversão da fração lipídica (óleo) das microalgas em biodiesel através da reação de transesterificação. O óleo das microalgas é composto, principalmente, de triglicerídeos, água e resíduos. Após o processo de ruptura celular, para extrair a fração lipídica das microalgas para a produção do biocombustível, vários métodos de extração podem ser utilizados, tais como: extração com solventes orgânicos, fluidos subcríticos, líquidos iônicos, ou em conjunto com as técnicas de ultrassom e micro-ondas (HOSSAIN, 2019). Na reação de transesterificação, os triglicerídeos reagem com mono-álcoois (normalmente metanol ou etanol) na presença de um catalisador gerando ésteres metílicos de ácidos graxos (o biodiesel). O catalisador pode ser de três tipos: ácido, básico e enzimático (LI et al., 2008).

As características químicas do biodiesel são muito semelhantes com as do diesel de petróleo, possibilitando seu uso como biocombustível (comercial) (HARRIS et al., 2018). A capacidade acumulativa de lipídeos na biomassa das microalgas, tornam-na uma fonte alternativa altamente promissora para a produção de biodiesel (VOLOSHIN et al., 2016).

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As microalgas apresentam elevado potencial para suprir a alta demanda por energia da sociedade e, ao mesmo tempo, ser uma fonte de energia sustentável e alternativa. Além de alta viabilidade e excelente custo-benefício de produção. Algumas questões operacionais ainda precisam ser elucidadas para o desenvolvimento dos biocombustíveis, como uma metodologia geral e eficaz de cultivo, colheita, processamento da biomassa; e o aproveitamento e melhoramento de refinarias para os derivados da biomassa de microalga. Porém, essas barreiras serão brevemente minimizadas, com o desenvolvimento de estudos e, em um futuro próximo, podem se tornar umas das principais matérias-primas para biocombustíveis.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo auxílio financeiro, ao Laboratório de Análises Ambientais Processamento Primário e Biocombustíveis (LABPROBIO), ao Núcleo de Processamento Primário e Reuso de Água Produzida e Resíduos (NUPPRAR), ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

## REFERÊNCIAS

ABDO, Sayeda M.; ABO EL-ENIN, S. A.; EL-KHATIB, K. M.; EL-GALAD, M. I.; WAHBA, S. Z.; EL DIWANI, G.; ALI, Gamila H. **Preliminary economic assessment of biofuel production from microalgae** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.119.

BABICH, I. V; VAN DER HULST, M.; LEFFERTS, L.; MOULIJN, J. A.; O'CONNOR, P.; SESHAN, K. Catalytic pyrolysis of microalgae to high-quality liquid bio-fuels. *[S. l.]*, 2011. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.04.043.

BRENNAN, Liam; OWENDE, Philip. **Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.10.009.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, *[S. l.]*, v. 38, p. 68–94, 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048.

CHISTI, Yusuf. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, *[S. l.]*, v. 25, n. 3, p. 294–306, 2007. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.02.001.

CHOO, Min Yee; OI, Lee Eng; SHOW, Pau Loke; CHANG, Jo Shu; LING, Tau Chuan; NG, Eng Poh; PHANG, Siew Moi; JUAN, Joon Ching. Recent progress in catalytic conversion of microalgae oil to green hydrocarbon: A review. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, *[S. l.]*, v. 79, p. 116–124, 2017. DOI: 10.1016/j.jtice.2017.06.028.

CULABA, Alvin B.; UBANDO, Aristotle T.; CHING, Phoebe Mae L.; CHEN, Wei Hsin; CHANG, Jo Shu. Biofuel from microalgae: Sustainable pathways. **Sustainability (Switzerland)**, *[S. l.]*, v. 12, n. 19, p. 1–19, 2020. DOI: 10.3390/su12198009.

DEMIRBAS, Ayhan; FATIH DEMIRBAS, M. Importance of algae oil as a source of biodiesel. **Energy Conversion and Management**, *[S. l.]*, v. 52, n. 1, p. 163–170, 2011. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.06.055.

DERNER, Roberto Bianchini; OHSE, Silvana; VILLELA, Maurício; CARVALHO, Sabrina Matos De; FETT, Roseane. Microalgas, produtos e aplicações. **Ciência Rural**, *[S. l.]*, v. 36, n. 6, p. 1959–1967, 2006. DOI: 10.1590/s0103-84782006000600050.

DVORETSKY, Dmitry; DVORETSKY, Stanislav; TEMNOV, Mikhail; TUGOLUKOV, Evgeny; AKULININ, Evgeny; GOLUBYATNIKOV, Oleg; USTINSKAYA, Yana; ESKOVA, Maria. The study of the lipid extraction process for the production of third-

generation biofuel from the pre-treated microalgae *Chlorella vulgaris* biomass. **Chemical Engineering Transactions**, [S. l.], v. 74, p. 73–78, 2019. DOI: 10.3303/CET1974013.

FON SING, Sophie; ISDEPSKY, Andreas; BOROWITZKA, Michael A.; MOHEIMANI, Navid Reza. Production of biofuels from microalgae. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 47–72, 2013. DOI: 10.1007/s11027-011-9294-x.

FRANCO, André Luiz Custódio; LÔBO, Ivon Pinheiro; DA CRUZ, Rosenira Serpa; TEIXEIRA, Cláudia Maria Luz Lapa; DE ALMEIDA NETO, José Adolfo; MENEZES, Rafael Silva. Biodiesel De Microalgas: Avanços E Desafios. **Química Nova**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 437–448, 2013. DOI: 10.1590/S0100-40422013000300015.

GANESAN, Ramya; MANIGANDAN, S.; SAMUEL, Melvin S.; SHANMUGANATHAN, Rajasree; BRINDHADEVI, Kathirvel; LAN CHI, Nguyen Thuy; DUC, Pham Anh; PUGAZHENDHI, Arivalagan. **A review on prospective production of biofuel from microalgae***Biotechnology Reports* Elsevier B.V., , 2020. DOI: 10.1016/j.btre.2020.e00509.

HARRIS, Jesse; VINER, Kelsey; CHAMPAGNE, Pascale; JESSOP, Philip G. Advances in microalgal lipid extraction for biofuel production: a review. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [S. l.], v. 12, n. 6, p. 1118–1135, 2018. DOI: 10.1002/bbb.1923.

HOSSAIN, S. M. Zaki. Biochemical Conversion of Microalgae Biomass into Biofuel. **Chemical Engineering and Technology**, [S. l.], v. 42, n. 12, p. 2594–2607, 2019. DOI: 10.1002/ceat.201800605.

KHOO, H. H.; KOH, C. Y.; SHAIK, M. S.; SHARRATT, P. N. Bioenergy co-products derived from microalgae biomass via thermochemical conversion - Life cycle energy balances and CO<sub>2</sub> emissions. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 143, p. 298–307, 2013. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.004.

KUMAR, Kanhaiya; GHOSH, Supratim; ANGELIDAKI, Irini; HOLDT, Susan L.; KARAKASHEV, Dimitar B.; MORALES, Merlin Alvarado; DAS, Debabrata. **Recent developments on biofuels production from microalgae and macroalgae***Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.055.

LEE, Andrew K.; LEWIS, David M.; ASHMAN, Peter J. Disruption of microalgal cells for the extraction of lipids for biofuels: Processes and specific energy requirements. [S. l.], 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.06.034.

LEE, Ok Kyung; SEONG, Dong Ho; LEE, Choul Gyun; LEE, Eun Yeol. **Sustainable production of liquid biofuels from renewable microalgae biomass***Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.04.016.

LEE, Sze Ying; KHOIROH, Ianatul; VO, Dai Viet N.; SENTHIL KUMAR, P.; SHOW, Pau Loke. **Techniques of lipid extraction from microalgae for biofuel production: a review***Environmental Chemistry Letters*, 2021. DOI: 10.1007/s10311-020-01088-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01088-5>.

LI, Yanqun; HORSMAN, Mark; WU, Nan; LAN, Christopher Q.; DUBOIS-CALERO, Nathalie. Biofuels from microalgae. In: BIOTECHNOLOGY PROGRESS 2008, *Anais* [...]. [s.l.: s.n.] p. 815–820. DOI: 10.1021/bp.070371k.

MATA, Teresa M.; MARTINS, António A.; CAETANO, Nidia S. **Microalgae for biodiesel production and other applications: A review***Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.020.

MATHIMANI, Thangavel; BALDINELLI, Arianna; RAJENDRAN, Karthik; PRABAKAR, Desika; MATHESWARAN, Manickam; PIETER VAN LEEUWEN, Richard; PUGAZHENDHI, Arivalagan. Review on cultivation and thermochemical conversion of microalgae to fuels and chemicals: Process evaluation and knowledge gaps. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 208, p. 1053–1064, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.096.

MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 83, n. 1, p. 47–54, 2002. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00119-5.

MELIS, Anastasios. Green alga hydrogen production: Progress, challenges and prospects. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 2002, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.] p. 1217–1228. DOI: 10.1016/S0360-3199(02)00110-6.

MOODY, Jeffrey W.; MCGINTY, Christopher M.; QUINN, Jason C. Global evaluation of biofuel potential from microalgae. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [S. l.], v. 111, n. 23, p. 8691–8696, 2014. DOI: 10.1073/pnas.1321652111.

PENG, Licheng; FU, Dongdong; CHU, Huaqiang; WANG, Zezheng; QI, Huaiyuan. **Biofuel production from microalgae: a review** *Environmental Chemistry Letters* Springer, , 2020. DOI: 10.1007/s10311-019-00939-0.

PEREIRA, Claudio M. P.; HOBUSS, Cristiane B.; MACIEL, Juliana Villela; FERREIRA, Lizângela R.; DEL PINO, Francisco B.; MESKO, Márcia F.; JACOB-LOPES, Eduardo; NETO, Pio Colepicolo. Biodiesel derived from microalgae: Advances and perspectives. **Química Nova**, [S. l.], v. 35, n. 10, p. 2013–2018, 2012. DOI: 10.1590/S0100-40422012001000022.

RAHEEM, Abdul; PRINSEN, Pepijn; VUPPALADADIYAM, Arun K.; ZHAO, Ming; LUQUE, Rafael. A review on sustainable microalgae based biofuel and bioenergy production: Recent developments. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 181, p. 42–59, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.125.

SCOTT, Stuart A.; DAVEY, Matthew P.; DENNIS, John S.; HORST, Irmtraud; HOWE, Christopher J.; LEA-SMITH, David J.; SMITH, Alison G. Biodiesel from algae: Challenges and prospects. **Current Opinion in Biotechnology**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 277–286, 2010. DOI: 10.1016/j.copbio.2010.03.005.

SHIONG KHOO, Kuan; WAYNE CHEW, Kit; YONG YEW, Guo; HONG LEONG, Wai; HO CHAI, Yee; LOKE SHOW, Pau; CHEN, Wei-Hsin. Recent advances in downstream processing of microalgae lipid recovery for biofuel production The world energy system faces two major challenges: the requirement for more energy. [S. l.], 2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122996.

SHUBA, Eyasu Shumbulo; KIFLE, Demeke. Microalgae to biofuels: ‘Promising’ alternative and renewable energy, review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 81, n. May 2017, p. 743–755, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.042.

SUPARMANIAM, Uganeeswary; KEE LAM, Man; UEMURA, Yoshimitsu; WEI LIM, Jun; TEONG LEE, Keat; HOONG SHUIT, Siew. Insights into the microalgae cultivation

technology and harvesting process for biofuel production: A review. [S. l.], 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109361.

UMDU, Emin Selahattin; TUNCER, Mert; SEKER, Erol. Transesterification of Nannochloropsis oculata microalga's lipid to biodiesel on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> supported CaO and MgO catalysts. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 100, p. 2828–2831, 2009. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.12.027.

VOLOSHIN, Roman A.; RODIONOVA, Margarita V; ZHARMUKHAMEDOV, Sergey K.; NEJAT VEZIROGLU, T.; ALLAKHVERDIEV, Suleyman I. **Review: Biofuel production from plant and algal biomass** **International Journal of Hydrogen Energy**, 2016. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.084.