

Microalgas como substrato para etanol de terceira geração: uma reflexão

Wesley Marcondes de Jesus¹
Aristeu Gomes Tininis²
Claudia Regina Cançado Sgorlon Tininis³

Resumo: Segundo a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) em 2018 a energia gerada no mundo a partir de fontes renováveis representavam apenas 14 %, no Brasil, aproximadamente 45 % da energia transformada é de fontes renováveis. Entretanto, os biocombustíveis geram resíduos potencialmente poluidores que precisam ser mitigados. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi realizar um levantamento bibliográfico de dados recentes e relevantes sobre o potencial das microalgas na usina sucroalcooleira. As microalgas são organismos unicelulares fotoautotróficos, podem habitar diversos ambientes como águas residuárias e efluentes gasosos, e se desenvolvem facilmente utilizando luz e gás carbônico. Essa diversidade dá às microalgas o status de promissora fonte de biocombustíveis de terceira geração, o que gera grande entusiasmo em torno desse tema. Essa diversidade também lhes dá características importantes que permitem a biorremediação na indústria. Porém, os entraves de ordem econômica ainda inviabilizam a produção em larga escala, sendo necessário investimentos do setor público e privado em tecnologias e pesquisas, pois, a utilização das microalgas e seus subprodutos é altamente promissora e sustentável. Portanto, a possibilidade da integração do cultivo de microalgas na indústria sucroalcooleira é real, sendo possível no futuro o uso de microalgas em bioprocessos de larga escala a um baixo custo.

Palavras-chave: Microalgas; etanol; tratamento de efluentes; resíduo; biorrefinaria

Abstract: According to the Energy Research Company (EPE), in 2018 in the world, energy generated from renewable sources represented only approximately 14 %, while in Brazil about 45 % of all energy comes from renewable sources. However, biofuels generate potentially polluting residues that need to be mitigated. Therefore, the objective of this work was to carry out a bibliographic survey of recent and relevant data on the potential of microalgae in the sugar and alcohol mill. Microalgae are single-celled photoautotrophic organisms that can inhabit different environments such as wastewater and gaseous effluents, and they develop easily using light and carbon dioxide. This diversity gives microalgae the status of promising third-generation biofuels source, which generates great enthusiasm around this topic. This diversity also gives them important characteristics that allow bioremediation in the sugar-alcohol industry. However, economic barriers still make its large-scale production unfeasible, requiring large public and private sector investment in technologies and research, as the use of microalgae and their by-products is highly promising for sustainable development. Therefore, the possibility of integrating the cultivation of microalgae to the functioning of the sugar-alcohol industry is real and not new, being possible in the future the use of microalgae in large-scale bioprocesses at low cost.

¹ Discente do curso de Especialização em Produção Sucroenergética do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Câmpus Matão, wesleymdejesus@gmail.com

² Docente da área de Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Câmpus Matão, aristeu@ifsp.edu.br

³ Docente da área de Engenharia de Alimentos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Câmpus Matão, sgorlonif@ifsp.edu.br

Keywords: Microalgae; ethanol; effluent treatment; residue; biorefinery

Introdução

Nos últimos anos a busca por fontes alternativas de combustíveis vêm ampliando a matriz energética, sendo um assunto que frequentemente retorna às pautas trazendo à tona os biocombustíveis como: biodiesel, bioquerosene, bioetanol, biometano e biohidrogênio (SEVERO *et al.*, 2019). Todos foram impulsionados pela busca de fontes de energia limpa e sustentável diante do aumento da população e o crescente consumo de combustíveis fósseis. De acordo com Vasudevan e Fu (2010), no ritmo de consumo dos últimos anos as reservas mundiais de petróleo serão exauridas em cerca de 40 anos e as de gás em 60 anos. Com o passar do tempo, novas descobertas podem ser feitas para diminuir a possibilidade de utilização dos combustíveis fósseis, porque já se sabe que esse tipo de combustível está fadado ao fim, a longo prazo (GANESAN *et al.*, 2020).

O setor sucroenergético tem uma grande relevância na economia brasileira, gerando aproximadamente 800 mil empregos diretos e indiretos e contribuindo de forma significativa no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. Segundo afirmações de Jaime Finguerut, diretor do Instituto de Tecnologia Canavieira (ITC) na abertura do workshop Sugar & Ethanol Brazil em 2019, o setor sucroenergético representava 2% do PIB brasileiro, o que mostra a importância do setor para a economia (SETOR..., 2019; SILVA *et al.*, 2021).

A agroindústria brasileira atua de forma sustentável, preocupada com o meio ambiente e os efeitos do elevado consumo de combustíveis fósseis. A produção do etanol oferece ao mercado um combustível obtido de fontes renováveis, ecologicamente correto. Além da produção de etanol e açúcar, que são os principais produtos da cana-de-açúcar, muitas unidades industriais elevam sua eficiência produzindo energia elétrica, reduzindo conseqüentemente os custos e ampliando a sustentabilidade do setor (SILVA *et al.*, 2021).

As usinas produtoras de etanol e açúcar processaram aproximadamente 663 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em 2020 sendo necessária uma área de colheita de cerca de 8,6 bilhões de hectares. Atualmente o setor sucroalcooleiro produz em torno de 41,5 milhões de toneladas de açúcar por ano, sendo o maior produtor mundial, e 32,6 milhões de litros de etanol, sendo o segundo maior produtor atrás apenas dos EUA (ESTEVEZ *et al.*, 2021).

O processamento desse enorme volume de matéria-prima gera uma grande quantidade de resíduos que, se não tratados adequadamente, podem ser poluidores. Mas quando utilizados

corretamente passam a ser matéria prima para outros setores. No processamento da cana-de-açúcar os resíduos industriais têm sido amplamente utilizados. O bagaço, gerado em larga escala, na moagem da cana, aproximadamente 280 Kg/tonelada de cana, é utilizado como combustível de caldeira e para produção de celulose. A vinhaça, resíduo da destilação do mostro, também gerada em larga escala, de 12 a 18 litros/litro de álcool, é utilizada como fertilizante no campo, na produção de metano e produção de biomassa, possui um alto potencial poluidor, rico em matéria orgânica, potássio, cálcio, magnésio e nitrogênio. A torta de filtro, resíduo da filtragem do caldo de cana, é gerado de 40 a 60 Kg/tonelada de cana, é também utilizada como fertilizante.

Os biocombustíveis de primeira geração, como o etanol, são geralmente derivados de culturas alimentares ricas em sacarose, amido ou óleos vegetais e utilizam tecnologia já dominada e implementada na indústria, como fermentação e transesterificação, porém, constantemente são alvos de críticas pelo uso da terra agrícolas, competindo diretamente com outras culturas e trazendo à tona a discussão pela escassez de alimentos. Assim, para se viabilizarem como alternativa sólida, os biocombustíveis cada vez mais devem garantir um ganho energético positivo e benefícios ambientais como sequestro de CO₂ e redução de emissões e competitividade econômica em larga escala, mas sem comprometer a produção de alimentos (NAIK *et al.*, 2010; VIEIRA, 2013).

Em contrapartida a segunda geração de biocombustíveis propõe a utilização de matéria-prima proveniente de biomassa, que são basicamente resíduos lignocelulósicos que não são tradicionalmente utilizados na alimentação humana ou animal. Esses resíduos representam 50% da produção mundial de biomassa, sendo uma alternativa de baixo custo sem concorrência com a produção de alimentos (ESCOBAR *et al.*, 2009).

A transformação de biomassa lignocelulósica em açúcares fermentáveis para produção de etanol de segunda geração (2G) também já possui sua tecnologia estabelecida, e constantes avanços contribuem para a melhoria do processo e redução dos custos. A utilização de resíduos como o bagaço da cana-de-açúcar, palhas, madeiras e serragens, para produção do etanol celulósico com o intuito de complementar a oferta de etanol de primeira geração (1G), já é vista como uma alternativa promissora para atender à crescente demanda mundial (JOHN *et al.*, 2011; VIEIRA, 2013).

Por outro lado, a terceira geração de biocombustíveis (3G) surge na constante busca por alternativas que forneça energia limpa a custos competitivos. Um grande entusiasmo é gerado em torno das microalgas, sendo uma das principais matéria-prima com alto potencial de

assegurar a sua produção. A versatilidade desses microrganismos está atrelada a sua baixa exigência nutricional, o que os torna uma opção atrativa para produção de biocombustíveis, como o biodiesel, bioetanol, biometanol e biohidrogênio, (OLIVEIRA; SILVA, 2018). Adicionalmente as microalgas podem ainda serem utilizadas para alimentação animal e como fertilizante orgânico, devido a sua elevada relação N:P ou ainda para geração de energia elétrica. Essa biomassa quando queimada, pode gerar até 8,12 MWh por tonelada (HOLANDA *et al.*, 2011). Essa seria uma alternativa para aumentar a oferta de energia elétrica (AMARO; GUEDES; MALCATA, 2011).

O número exato de espécies de microalgas ainda não é conhecido, podendo existir até 100.000, mas apenas cerca de 35.000 foram identificadas até o momento. Essa diversidade também se reflete em sua composição bioquímica, tornando-as fontes quase que ilimitada de produtos (ANDRADE, 2019; DERNER *et al.*, 2006).

As microalgas são organismos unicelulares eucariotos fotoautotróficos que podem habitar meios aquáticos e se desenvolvem utilizando luz e gás carbônico. Dessa forma elas fazem a conversão de luz solar em energia química, gerando biomassa rica em ácidos graxos, proteínas e carboidratos (BERTOLDI; SANT'ANNA; OLIVEIRA, 2008; CARDOSO; ELIZA; MARQUES, 2011). Esses organismos possuem uma grande capacidade de adaptação, sendo capazes de utilizar diferentes metabolismos energéticos, como fotossíntese, respiração e fixação/assimilação de nitrogênio, além de possuir a habilidade de se desenvolverem em ambientes com baixos teores nutricionais (ORTENZIO *et al.*, 2015). A composição bioquímica das microalgas como a concentração total de proteínas, lipídios e carboidratos pode variar de acordo com os tratos do cultivo, variáveis como intensidade luminosa, temperatura, pH e agitação, cujos fatores são importantes durante o cultivo (PICARDO, 2012; SCHMITZ; DAL MAGRO; COLLA, 2012; TEIXEIRA; MORALES, 2007). Além dos biocombustíveis, a biomassa produzida pode ser destinada a várias aplicações como a produção de proteína unicelular para alimentação humana, enzimas, pigmentos, como carotenoides e clorofila, além de antibióticos, hidrocarbonetos e vitaminas (BERTOLDI; SANT'ANNA; OLIVEIRA, 2008; HUBERT *et al.*, 2017).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é realizar uma breve revisão exploratória apresentando dados recentes e relevantes sobre o panorama do potencial das microalgas na indústria sucroalcooleira.

O cultivo

O cultivo de microalgas geralmente é determinado por seu tipo de metabolismo nutricional, podendo ser autotrófica, heterotrófica e mixotrófica. Tendo como insumos principais, energia solar, água, CO₂ e macronutrientes, como fósforo e potássio. No cultivo autotrófico as microalgas são fotossintetizantes e utilizam a luz como fonte de energia e o CO₂ do ar como fonte de carbono para sintetizar suas biomoléculas. Já no heterotrófico as microalgas utilizam compostos orgânicos como o glicerol, a glicose e o acetato como fonte de energia e carbono. No cultivo mixotrófico atuam ambos os metabolismos, autotrófico e heterotrófico de forma simultânea, fazendo com que a microalga assimile o CO₂ e carbono fornecidos (BUHELLEY, 2015; CARDOSO; ELIZA; MARQUES, 2011; COSTA, 2018).

O modo de cultivo pode ser feito em sistemas aberto ou fechado. Os sistemas abertos têm exposição total ao ambiente, sendo geralmente realizados em lagoas ou tanques. Esse tipo de cultivo tem sido usado há décadas e continua sendo o mais utilizado atualmente, tendo baixo custo de construção e operação, entretanto, tem um elevado risco de contaminação. Geralmente é um canal, lagoa ou tanque fechado que pode variar em formas e utilizar aparatos mecânicos para misturar a cultura, construído de concreto ou chão batido, podendo ser forrado com material impermeável.

Já os sistemas fechados são feitos em fotobiorreatores, de vários formatos, sendo geralmente tubulares ou planares, e transparentes à luz visível, o que permite maior controle do processo resultando em uma elevada produção de biomassa de microalgas, entretanto, tem um elevado custo inicial. Estes são comumente construídos com materiais mais rígidos e transparentes como vidro, plástico e policarbonato. Os fotobiorreatores tubulares e placas achatadas são os principais utilizados. Podem ser posicionados horizontalmente, verticalmente ou inclinados e podem ser interligados por tubulações de distribuição. O uso de qualquer uma das variadas técnicas de cultivo será influenciada pelas características do local que está sendo realizado o cultivo, pela quantidade de luz necessária, pela espécie e os processos de recuperação da biomassa: centrifugação, floculação e filtração (BERTOLDI; SANT'ANNA; OLIVEIRA, 2008; COSTA, 2018).

Quando comparado com culturas vegetais, esses microrganismos possuem maior eficiência fotossintética e podem ser cultivados em condições consideradas adversas para outras culturas terrestres como em águas salinas ou salobras.

Uso de resíduos e efluentes

Um dos maiores custos na produção de microalgas é a elaboração de um meio de cultura que atenda às necessidades de cada espécie. Esse custo pode representar de 40 a 60% do valor total da produção, o que associado a outras dificuldades acaba inviabilizando o desenvolvimento em larga escala (BERTOLDI; SANT’ANNA; OLIVEIRA, 2008; TAHER, 2013). Entretanto, vemos que a capacidade adaptativa desse organismo permite o uso de uma grande variedade de meios de cultura, sendo possível reutilizar resíduos como esgoto doméstico, águas residuais, efluentes de biodigestores ou lodo (SOARES *et al.*, 2020; NASCIMENTO *et al.*, 2016; VIDAL *et al.*, 2019), além de resíduos da suinocultura, bovinocultura e oriundos de laticínios (BLANCO *et al.*, 2015; OLIVEIRA, 2013; SILVA, 2018; TAHER, 2013). A diversidade de meios de cultura onde podem ser cultivadas as microalgas novamente evidencia o potencial tecnológico desse organismo ainda tão pouco estudado.

Fortin *et al.* (2020), utilizando a microalga *Chlorella vulgaris* em meios de cultivo com 40% de vinhaça, além de crescimento celular, obtiveram a redução nos teores de sódio e potássio presente no meio. Característica essa que poderia ajudar a atenuar os efeitos causados pela vinhaça utilizada na fertirrigação. Candido, Lombardi e Lima (2015), também cultivando *Chlorella vulgaris*, em meio de cultivo com 20, 30 e 40 % de vinhaça, viram que não houve diferença significativa de crescimento para as diferentes concentrações, entretanto a maior densidade celular se deu em concentração de 30% de vinhaça.

Saavedra, Concha e Bastos (2019) utilizando clorofícea *Desmodesmus subspicatus* em vinhaça previamente clarificada por coagulação eletroquímica, obtiveram produtividade de biomassa de 1,45 g L⁻¹ dia⁻¹, e remoção de 66 % do carbono orgânico total e 75 % do nitrogênio total.

A utilização da vinhaça como substrato para crescimento de microalgas ainda representa um desafio biotecnológico, não obstante, o uso de microalgas pode representar uma possibilidade para o tratamento da vinhaça.

O CO₂

As microalgas assimilam o dióxido do carbono e com utilização da luz solar transformam o carbono em açúcares e posteriormente em gorduras dentro da célula, liberando

oxigênio. O interesse em estudar microrganismos fotossintéticos, como as microalgas, tem crescido nos últimos anos, pela importância destes nas diversas cadeias alimentares e pela possibilidade da aplicação comercial de diversas substâncias sintetizadas por estes microrganismos.

Na presença de CO₂ esses microrganismos apresentam eficiência fotossintética maior que os vegetais terrestres, produzindo mais biomassa por hectare em menos tempo. Estima-se que cada tonelada de biomassa algácea produzida, consuma cerca 1,75 toneladas de CO₂ através da fotossíntese, isso representa de vinte a quarenta vezes mais do que o assimilado pelas culturas oleaginosas (HOLANDA *et al.*, 2011).

O processo de cogeração de energia pela queima do bagaço em caldeiras e a fermentação em dornas, que podem atingir milhares de litros, geram grandes quantidades de CO₂. Esse gás de efeito estufa (GEE), também pode ser visto como um importante subproduto, sendo uma das principais barreiras na produção em grande escala de microalgas, já que por vezes ele é exigido em concentrações superiores às encontradas na atmosfera. Atualmente já existe a possibilidade de captura do CO₂ gerado em processos como a fermentação do mosto, por meio da adaptação da planta industrial, de modo que o CO₂, que antes seria perdido, passe a ser comercializado pela usina alcooleira. Uma usina de médio porte pode recuperar e comercializar cerca de três mil kg/h de CO₂ (FERREIRA; SANTOS; REBELATO, 2012). A indústria sucroalcooleira tem potencial de favorecer a produção de microalgas no Brasil, com o propósito de atenuar futuras questões sobre emissões de GEE ou com o objetivo de processar as microalgas para geração de produtos com valor agregado, abrindo um grande potencial biotecnológico (CASTIÑEIRAS FILHO, 2020).

Picardo (2012) demonstrou que um cultivo de microalga *Isochrysis galbana* enriquecido com CO₂ promoveu aumento da produtividade de biomassa no cultivo *indoor*, onde se realiza o cultivo em um sistema fechado, com controle da luz e temperatura. Porém, esse aumento de biomassa não teve impacto sobre o acúmulo de lipídios. Reis *et al.* (2018) realizando cultivo da microalga *Haematococcus pluvialis* em fotobiorreatores constataram que a suplementação de CO₂ em 30 % resultou em crescimento celular de 1,13 g L⁻¹ em 10 dias. Cruz *et al.* (2018), após realizarem cultivos com a microalga *Monoraphidium sp.* em fotobiorreator com injeção de CO₂, mostraram a eficiência da fixação de CO₂, tendo o consumo de 1,2 g de CO₂ por grama de biomassa durante a fase exponencial de crescimento celular.

Microalgas e o etanol 2G e 3G

A produção do etanol, 2G já possui seus procedimentos operacionais bem definidos. Os principais resíduos utilizados nessa operação são os celulósicos proveniente de culturas não alimentares ou resíduos agrícolas, com destaque para ao bagaço de cana-de-açúcar e o resíduo de processamento do milho, que somados, geram cerca de 128 a 180 milhões de toneladas por ano, possibilitando elevar o volume de etanol produzido sem recorrer à utilização de mais áreas agrícolas (MÜLLER *et al.*, 2019).

Entretanto esse bagaço precisa ser pré-tratado para ter seus açúcares liberados. O bagaço tem como componentes principais a celulose, hemicelulose e lignina, que compõem uma forte ligação entre si. Devido a essa estrutura rígida, não é possível iniciar o processo de fermentação, sem antes romper essa ligação para separar os componentes. Após o pré-tratamento a lignina é dissolvida e a celulose é liberada e passa por uma hidrólise, química ou enzimática, a fim de converter a celulose em glicose, a qual já pode passar por fermentação pelas vias tradicionais (ALVES; CARVALHO; CERIANI, 2020; FEITOSA, 2009; MORAIS *et al.*, 2017; MÜLLER *et al.*, 2019).

Além dos metabólitos de interesse gerados pelas microalgas como lipídeos e carboidratos, a parede celular desses organismos é similar à das demais matérias-primas lignocelulósicas, com a diferença de possuir menos lignina e hemicelulose em sua composição, sendo assim, o rompimento da parede celular e liberação dos açúcares fermentescíveis é mais fácil. (CARRIQUIRY; DU; TIMILSINA, 2011; RODRIGUES, 2020)

O etanol proveniente da fermentação dos açúcares das microalgas é comumente chamado de etanol de 3ª geração, por levar em conta o aproveitamento de resíduos e processos das gerações anteriores, dando origem a um biocombustível mais limpo. Quando comparado com demais fontes para a produção de biocombustíveis, os de 3ª geração têm um maior poder calorífico, baixa densidade e viscosidade (SILVA; SILVA, 2019). Entretanto para chegar a produção do etanol 3G as etapas de cultivo, colheita e preparação da célula devem ter sido cumpridas. A preparação da biomassa é feita de forma mecânica ou enzimática, muito similar a hidrólise (sacarificação) que ocorre na produção do etanol 2G. Após a preparação da biomassa a levedura *Saccharomyces cerevisiae* pode realizar a fermentação tradicional (RODRIGUES, 2020). Segundo Andrade (2019), espécies com alto teor de amido como *Chlorella*, *Chlamydomonas*, *Dunaliella*, *Scenedesmus* e *Tetraselmis* são as mais estudadas para produzir etanol devido a seus teores elevados de carboidratos.

O reaproveitamento de resíduos integrado à produção de biomassa com potencial tecnológico nos remete ao conceito de biorrefinarias e todo seu potencial de integração. Uma biorrefinaria refere-se a estrutura que aproveita a biomassa e resíduos, gerando produtos com valor agregado como químicos, combustíveis, lubrificantes, fertilizantes, eletricidade, entre outros. Os produtos podem representar uma inovação sustentável ou um substituto de um produto existente. As indústrias de etanol já utilizam esse conceito a bastante tempo, com a cogeração de energia e o etanol 2G, entretanto esse conceito ainda pode ser ampliado (CASTIÑEIRAS FILHO, 2020).

O aumento da participação dos biocombustíveis na matriz energética tem como principal objetivo reduzir a dependência de combustíveis fósseis e reduzir os impactos decorrentes dos GEE. A integração dessas cadeias produtivas visa otimizar processos e reduzir resíduos, beneficiando o processo como um todo. A produção de biocombustíveis de 3ª geração em larga escala, atualmente é pouco viável devido a altos custos de investimento, contudo a integração com outros processos pode tanto viabilizar a produção de microalgas em maiores escalas, quanto melhorar parâmetros do próprio processo. A integração da indústria sucroenergética à produção de microalgas pode ser o incentivo inicial para abrirmos uma porta tecnológica de grande potencial.

Conclusão

Tanto os produtos quanto os efluentes da cadeia de produção de etanol de primeira ou segunda geração são fontes potenciais de nutrientes para as microalgas. O uso desses efluentes para a produção de biomassa algácea permitiria a integração da produção dos biocombustíveis de primeira, segunda e terceira geração. Plantas integradas e baseadas no conceito de biorrefinarias poderiam se beneficiar dessa integração na medida que seria possível reduzir os custos com nutrientes para cultivo e no tratamento de efluentes, elevando a quantidade de matéria-prima disponível para geração de energia elétrica e produção de etanol.

Esforços ainda precisam ser realizados para ampliar os estudos com microalgas e sua integração em indústrias com o objetivo de produzir biocombustíveis de terceira geração em larga escala.

Referências

ALVES, F. B.; CARVALHO, A.; CERIANI, R. A produção de etanol de segunda geração como ferramenta de ensino da ODS 7 da Agenda de 2030 da ONU. *In: CONGRESSO{VIRTUAL} DE INICIAÇÃO CIENTIFICA DA UNICAMP*, 28., 2020. Online. **Anais [...]**. [S. l.]: Unicamp, 2020. p. 1-5. Disponível em: <https://www.prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2020P16479A34343O108.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2021.

AMARO, H. M, GUEDES, A. C: MALCATA, F. X. Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3402-3410, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.014>. Acesso em: 31 mar. 2021.

ANDRADE, F. P. de. **Produção de biomassa microalgal a partir do soro do leite visando a produção de bioetanol**. Orientador: Renata Maria Rosas Garcia Almeida. 2019. 81 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Energia da Biomassa) - Universidade de Federal de Alagoas, Rio Largo, AL, 2019.

BERTOLDI, F.; SANT'ANNA, E.; OLIVEIRA, J. Revisão: Biotecnologia de Microalgas. **Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 26, n. 1, p. 9-20, 2008.

BLANCO, D.; SUÁREZ, J.; JIMÉNEZ, J.; GONZÁLEZ, F.; ALVAREZ, L. M.; CABEZA, E.; VERDE, J. Eficiencia del tratamiento de residuales porcinos en digestores de laguna tapada. **Pastos y Forrajes**, v. 38, n. 4, p. 1-7, 2015.

BUHELLY, R. J. R. **Avaliação do perfil de ácidos graxos e resposta bioquímica de *Isochrysis galbana* sob diferentes condições fotoautotróficas, visando a produção de ácidos graxos poli-insaturados (ÔMEGA 3)**. Orientador: Donato A. Gomes Aranda. Dissertação (Mestrado em Ciências em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). 2015. 107 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CANDIDO, C.; LOMBARDI, A. T.; LIMA, M. I. S. Cultivo de *Chlorella Vulgaris* em vinhaça filtrada. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 35, p. 55-62, 2015. Disponível em: http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/206. Acesso em: 29 mar 2021.

CARDOSO, A.; ELIZA, G.; MARQUES, A. K. O uso de microalgas para a obtenção de biocombustíveis. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 9, n. 4, p. 542-549, 2011.

CARRIQUIRY, M. A.; DU, X.; TIMILSINA, G. R. Second generation biofuels: economics and policies. **Energy Policy**, v. 39, n. 7, p. 4222-4234, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.036>. Acesso em: 28 mar 2021.

CASTIÑEIRAS FILHO, S. L. P. **Potencial de integração da produção de biodiesel derivado de microalgas à indústria sucroalcooleira no Brasil – análise termodinâmica e ambiental**. Orientador: Florian Alain Yannick Pradelle. 2020. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

COSTA, M. H. J. da. **Cultivo de microalgas em efluentes de piscicultura visando a obtenção de biomassa com potencial proteico para aplicação em ração animal**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2018.

CRUZ, Y. R.; LEONETT, A. Z. F.; CHENARD DÍAZ, G.; CARLIZ, R. G.; ROSSA, V.; GALINDO, M.; ARANDA, D. A. G.; OLIVEIRA, L. B. Biofixação de CO₂ pela microalga *Monoraphidium* sp. **Acta Scientiae et Technicae**, v. 6, n. 1, p. 14-20, 2018.

DERNER, R. B.; OHSE, S.; VILLELA, M.; CARVALHO, S. M. De; FETT, R. Microalgas, produtos e aplicações. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1959-1967, 2006.

ESCOBAR, J. C.; LORA, E. S.; VENTURINI, O. J.; YÁÑEZ, E. E.; CASTILLO, E. F.; ALMAZAN, O. Biofuels: environment, technology and food security. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6-7, p. 1275–1287, 2009.

ESTEVES, H. B. B.; COSTA, A. O. da; ARAUJO, R. B.; GANDELMAN, D. A.; SILVA, E. J. G. da; NASCIMENTO, J. R. do; SANTOS, L. B. O. dos; RIBEIRO, M. D. B.; BARBOSA, P. I. da C.; HENRIQUES, R. M. **Nota Técnica: Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2020**. Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, jul. 2021. 87.

FEITOSA, I. C. **Produção de enzimas lipolíticas utilizando bactéria isolada de solo com histórico de contato com petróleo em fermentação submersa**. Orientador: Álvaro Silva Lima. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Tiradentes, Aracaju, SE, 2009.

FERREIRA, D.; SANTOS, L.; REBELATO, M. G. Análise da viabilidade econômica de uma planta para captura de CO₂ na indústria alcooleira. **Revista Gestão & Tecnologia**, v. 12, n. 2, p. 64-88, 2012.

FORTI, J. C.; LANZA, M. G. D. B.; FERREIRA, M. S.; SOUZA, R. R. de; URIBE, R. A. M.; SANTOS, F. A. dos. Redução de nutrientes da vinhaça por microalgas *Chlorella vulgaris*. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e5879108763, 2020.

GANESAN, R.; MANIGANDAN, S.; SAMUEL, M. S.; SHANMUGANATHAN, R.; BRINDHADEVI, K.; LAN CHI, N. T.; DUC, P. A.; PUGAZHENDHI, A. A review on prospective production of biofuel from microalgae. **Biotechnology Reports**, v. 27, p. e00509, 2020.

HOLANDA, L. R. de; RAMOS, F. de S.; MEDEIROS, E. R. C.; SANTOS, J. dias dos. O cultivo de microalgas para a geração de eletricidade. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 7., 2011, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2011. Disponível em: https://www.inovarse.org/sites/default/files/T11_0355_1625.pdf. Acesso em 30 mar 2021.

HUBERT, F.; POISSON, L.; LOISEAU, C.; GAUVRY, L.; PENCRÉAC'H, G.; HÉRAULT, J.; ERGAN, F. Lipids and lipolytic enzymes of the microalga *Isochrysis galbana*. **Oilseeds and fats, Crops and Lipids**, v. 24, n. 4, D407, 2017.

JOHN, R. P.; ANISHA, G. S.; NAMPOOTHIRI, K. M.; PANDEY, A. Micro and macroalgal biomass: a renewable source for bioethanol. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 186-193, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.139>. Acesso em: 28 mar. 2021.

MORAIS, P. P.; PASCOAL, P. V.; ROCHA, E. de S.; MARTINS, E. C. A. Etanol de 2 geração: atual produção e perspectivas. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, v. 7, n. 1, p. 45-57, 2017.

MÜLLER, C.; MILANI, L. M.; GIEHL, A.; BARRILLI, É. T.; DEOTI, L.; LUCARONI, A. C.; TADIOTO, V.; TREICHEL, H.; ALVES JÚNIOR, S. L. Resíduos de cana-de-açúcar e milho como matéria prima do etanol 2G: atualidades e perspectivas. *In*: VOIGT, C. L. (org.). **Impactos das Tecnologias na Engenharia Química 3**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019, p. 8-22, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.22533/at.ed.3191901042>. Acesso em: 28 mar. 2021.

NAIK, S. N.; GOUD, V. V.; ROUT, P. K.; DALAI, A. K. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 578-597, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>. Acesso em: 28 mar. 2021.

NASCIMENTO, R. C. do; FERNANDES, M. S.; SANTANA, H.; CEREIJO, C.; GARCIA, L. C.; SIQUEIRA, F. G.; BRASIL, B. dos S. A. F. Cultivo de Microalgas em fotobiorreatores de placas planas para a produção de biomassa e biorremediação de efluente da agroindústria de óleo de palma. *In*: ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA EMBRAPA AGROENERGIA, 3., 2016, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: EMBRAPA, 2016. p. 102-109.

OLIVEIRA, A. C. de. **Produção de biomassa de microalga *Scenedesmus* sp. em efluente de bovinocultura biodigerido**. Orientador: André Bellin Mariano. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2013.

OLIVEIRA, S. S.; SILVA, C. F. Prospecção tecnológica da produção de bio-óleo a partir da biologia de *Chlorella Vulgaris* pelo processo de pirólise. **Revista Gestão Inovação e Tecnologias**, v. 8, n. 4, p. 4660-4669, 2018.

ORTENZIO, T., Y.; AMARAL, G. G. do; ALMEIDA, S. dos S.; OLIVEIRA, E. C. A. M. de. Cultivo de microalgas utilizando resíduos agroindustriais para a produção de biocombustíveis: perspectivas e desafios. **Bioenergia em Revista: diálogos**, ano 5, n. 1, p. 58-65, jan./jun. 2015.

PICARDO, M. C. **Desempenho de *Isochrysis galbana* na produção de óleo e sequestro de CO₂ com fotobiorreator piloto**. Orientador: Ofélia de Queiroz Fernandes Araujo. 2012. 201 f. Tese (Doutorado em Ciências em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

REIS, D. F.; MACHADO JUNIOR, F. R. da S.; ORES, J. D. C.; LEMES, A. C.; BURKERT, C. A. V.; BURKERT, J. F. de M. Influência do CO₂ no crescimento de *Haematococcus pluvialis* e na produção de carotenoides. **UNICIÊNCIAS**, v. 22, n. especial, p. 25-29, 2018. Disponível em: <http://revista.pgsskroton.com.br/index.php/uniciencias/article/view/6790>. Acesso em: 31 mar. 2021.

RODRIGUES, A. O. **Avaliação do uso de biomassa de microalga como substrato para leveduras na síntese de etanol.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2020.

SAAVEDRA, M. D. M.; CONCHA, V. O. C.; BASTOS, R. G. Produção de biomassa microalgal em efluente sucroalcooleiro clarificado por coagulação eletroquímica. *In: SILVA, H. C. da (org.). Engenharia ambiental e sanitária: interfaces do conhecimento 2.* Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019, cap. 30, p. 363-378.

SCHMITZ, R.; DAL MAGRO, C.; COLLA, L. M. Aplicações ambientais de microalgas. **Revista CIATEC – UPF**, vol. 4, n. 1, p. 48-60, 2012. Disponível em: <http://seer.upf.br/index.php/ciatec/article/view/2393/1767>. Acesso em: 31 mar. 2021.

SETOR sucroenergético representa 2% do PIB brasileiro, afirma diretor do ITC. (2019). **JornalCana**, [S. l.], 7 maio 2019. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/setor-sucro-energetico-representa-2-do-pib-brasileiro-afirma-diretor-do-itc/>. Acesso em: 31 mar. 2021.

SEVERO, I. A.; SIQUEIRA, S. F.; DEPRÁ, M. C.; MARONEZE, M. M.; ZEPKA, L. Q.; JACOB-LOPES, E. Biodiesel facilities: What can we address to make biorefineries commercially competitive? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 112, p. 686-705, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.020>. Acesso em: 31 mar. 2021.

SILVA, B. M.; SILVA, W. S. D. Um panorama da implantação do etanol de 3^a geração como uma fonte de energia sustentável. **ENGEVISTA**, v. 21, n. 1, p. 176-192, 2019. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/13289>. Acesso em: 31 mar. 2021.

SILVA, D. A. **Microalgas aplicadas ao tratamento de efluentes oriundos de laticínios.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2018.

SILVA, D. L. G.; BATISTI, D. L. S.; GIACOMELLI FERREIRA, M. J.; MERLINI, F. B.; CAMARGO, R. B.; BARROS, B. C. B. Sugarcane: Economic, social, environmental, by-products and sustainability. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, e44410714163, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/14163>. Acesso em: 31 mar. 2021.

SOARES, R. B.; GONÇALVES, R. F.; MARTINS, M. F.; PETERLI, Z. Avaliação do poder calorífico da biomassa algal obtida por coagulação-floculação. **Revista DAE**, v. 223, n. 68, p. 78-87, 2020. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_223_n_1861.pdf. Acesso em: 31 mar. 2021.

TAHER, D. M. **Biodiesel de microalgas cultivadas em dejetos suíno biodigerido.** Orientador: André Bellin Mariano. 2013. 106 f. Mestrado (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

TEIXEIRA, C. M.; MORALES, M. E. **Microalga como matéria-prima para a produção de biodiesel.** Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/agroenergia+_PDeI_Biodiesel_Algas_000g6f3kcwr02wx5ok0o71pxt430fm5w.pdf. Acesso em: 31 mar. 2021.

VASUDEVAN, P. T.; FU, B. Environmentally sustainable biofuels: advances in biodiesel research. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 47-63, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12649-009-9002-1>. Acesso em: 31 mar. 2021.

VIDAL, I. C. de A.; FERREIRA, W. B.; FERNANDES, M. S. M.; LOPES, T. S. de A.; PAIVA, W. de. Estudo do crescimento da microalga *Scenedesmus acuminatus* (Lagerheim) Chodat 1902 em águas residuárias. **Revista DAE**, v. 67, n. 218, p. 35-48, 2019. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.031>. Acesso em: 31 mar. 2021.

VIEIRA, T. de Q. **Uso de resíduos líquidos no cultivo das microalgas *Chlorella sp* com potencial para produção de biocombustíveis**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2013.