

BIOCOMBUSTÍVEIS PROVENIENTES DE MICROALGAS: UMA REVISÃO SOBRE MÉTODOS DE CULTIVO E EXTRAÇÃO DE ÓLEO

Fernanda Barbosa Siqueira

Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

Combustíveis renováveis e energia são uma grande preocupação em todo o mundo, e novas matérias-primas e processos para a sua geração estão sendo investigados. Microalgas estão recebendo cada vez mais atenção em todo o mundo como uma fonte alternativa e renovável para a produção de energia. Por meio de vários processos de conversão, as microalgas podem ser utilizadas para produzir diferentes tipos de biocombustíveis, os quais incluem biodiesel, biogás de síntese, bio-óleo, bioetanol e bio-hidrogênio. Apesar de tantas promessas promissoras, as algas enfrentam dificuldade em competição de preço em relação aos combustíveis fósseis, revelando seus subprodutos como mais auspicioso e rentáveis.

Palavras-chave: microalgas, biocombustível, combustíveis renováveis.

ABSTRACT

Renewable fuels and energy are the major concern worldwide and new raw materials and processes for its generation are being investigated. Microalgae are receiving increasing worldwide attention as an alternative and renewable of energy production. Through various conversion processes, microalgae can be used to produce many different kinds of biofuels, which include biodiesel, bio-syngas, bio-oil, bio-ethanol, and bio-hydrogen. Although many promising promises, algae face a difficulty in price competition against fossil fuels, revealing that your sub-products are more promising and profitable.

Keywords: microalgae, biofuel, renewable fuel.

1. INTRODUÇÃO

A partir da Revolução Industrial, a qualidade de vida dos cidadãos e a concorrência econômica dos países foram intensamente influenciadas pela energia. Nesse contexto, as economias que investem no desenvolvimento ao acesso a recursos energéticos de baixo custo e baixo impacto ambiental, obtêm importantes vantagens comparativas.

Após as crises do petróleo da década de 1970 e 1980, grande parte do debate sobre os mercados mundiais de petróleo foram centrados nas limitações de seu abastecimento. A segurança energética foi (e continua sendo) uma grande preocupação, com grandes depósitos de recursos controlados e localizados nos países membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Além disso, a crescente procura de petróleo, uma resposta de oferta limitada e o aumento dos preços em meados da década de 2000, elevou as preocupações sobre seu esgotamento.

Os combustíveis derivados da biomassa assumem papel importante neste cenário. Diante dos impactos e a crescente preocupação mundial com as questões ambientais e esgotamento de recursos, o biodiesel é um produto que está em destaque. Esse tipo de combustível é produzido a partir de biomassas renováveis, pela transesterificação de triglicerídeos com álcoois de cadeia curta, produzindo ésteres monoalquílicos de ácidos graxos de cadeia longa. Além de poder ser misturado ao diesel fóssil em qualquer proporção (diminuindo o custo dos combustíveis originários unicamente de fontes fósseis), o biodiesel é biodegradável, não tóxico e renovável (KNOTHE et al., 2006; MOHANTY et al., 2009).

Com base nas matérias-primas, os biocombustíveis são categorizados como primeira geração, segunda e de terceira geração. Biocombustíveis derivados de plantas cultivadas, como amêndoa, cevada, camelina, coco, amendoim, louro, aveia, semente de papoula, semente de quiabo, farelo de arroz, gergelim, girassol, soja, trigo, são denominados como matérias-primas de primeira geração, caracterizam-se pelos biocombustíveis produzidos principalmente de matérias-primas cultivadas e pela baixa complexidade tecnológica para a sua produção. Gorduras animais e resíduos de cozinha, materiais não destinados a consumo, também são usados para produzir biocombustíveis, conhecidos como matérias-primas de segunda geração. A segunda geração permite o uso de todas as formas de biomassa lignocelulósica e são de alta complexidade tecnológica. No entanto, essas matérias-primas não têm fornecimento estável para satisfazer as necessidades energéticas do futuro. Alternativamente, os microrganismos, chamados terceira geração de matérias-primas, podem ser utilizados. Esta geração aproveita-se de novas colheitas de energia especialmente projetadas. Há progresso significativo a ser feito a este respeito.

Avanços recentes em biologia de planta, o aparecimento de técnicas de procriação rápida e extremamente eficiente (procriação molecular), os rápidos avanços no campo da genômica, e *design* clássico de colheitas transgênicas promete resultar em plantas com propriedades que as tornam mais apropriadas para a conversão em bioprodutos (RASHID et al., 2014).

O setor de bioenergia vive uma expectativa pela solidificação das microalgas como fonte viável de biomassa para a produção de biocombustíveis. O biodiesel obtido a partir de microalgas é de fácil cultivo, possui uma boa quantidade intracelular de lipídeos, manipulação genética das vias metabólicas viável, além da capacidade de duplicação da biomassa em um curto período de tempo e possibilidade de controlar estas condições.

As microalgas são organismos fotossintetizantes, aquáticos, que crescem em ambientes de águas doce e salgada. Elas podem usar diferentes metabolismos energéticos para manutenção de suas estruturas, como fotossíntese, respiração e fixação de nitrogênio, o que torna algumas espécies organismos com vasta aplicação tecnológica (BOROWITZKA, 1999).

De acordo com Chisti (2007), estes microrganismos são utilizados em diversos setores como na aquicultura, produção de suplemento alimentar e extração de compostos de alto valor comercial, apresentando potencial para uso em biorremediação e biofertilização, assim como para a produção de vários tipos diferentes de biocombustíveis. Estes incluem o metano produzido pela digestão anaeróbia da biomassa das microalgas.

As microalgas, por apresentarem alto potencial fotossintético junto com a sua promissora tecnologia de fixação de CO₂, tornaram assunto de grande interesse de pesquisas. As microalgas eucariontes e procariontes (cianobactérias) são capazes de sintetizar lipídeos sob condições ambientais adequadas (PEREIRA et al., 2012).

Em comparação aos biocombustíveis fornecidos pelo óleo de palma, canola, soja e cana-de-açúcar, as microalgas sozinhas podem ser manipuladas para gerar grandes quantidades de combustíveis renováveis, como o biodiesel, demonstrado na Tabela 1, (derivado do óleo extraído das microalgas), o bioetanol, bio-hidrogênio (produzido por processos fotobiológicos), bio-óleo (resultante da pirólise) e de metano produzido pela digestão anaeróbia da biomassa das microalgas em curtos períodos de tempo (MA & HANNA, 1999). A produção destes biocombustíveis pode ser associada com a mitigação do gás CO₂ oriundo de combustão, tratamento de águas residuais e a produção de produtos químicos de alto valor.

TABELA 1 - Comparação de diferentes matérias-primas para produção de biocombustível (Adaptado PEREIRA et al., (2012).

Fonte de biodiesel	Produtividade óleo (L/ha)
Mamona*	806*
Pinhão Manso	1892
Milho	172
Soja	446
Canola	1190
Coco	2689
Óleo de Palma	5950
Microalga*	58700

*variedades com 30% óleo (em peso) na biomassa

2. MÉTODOS DE CULTIVOS

Atualmente, um grande esforço de investigação está sendo focado no cultivo de algas que representa, em última instância, a etapa que determinará a viabilidade econômica do processo (MATA et al., 2010). De acordo com Maxwell et al. (1985) para a implementação de uma unidade de cultivo de algas a seleção do local e avaliação de recursos têm de ser realizada considerando diversos critérios: (i) o abastecimento de água/demanda, sua salinidade e química; (ii) a topografia do terreno, geologia, e da propriedade; (iii) a condições climáticas, temperatura, isolamento, evaporação, precipitação; (iv) o acesso fácil a nutrientes e fontes de abastecimento de carbono.

As microalgas são cultivadas principalmente em lagoas abertas ou em fotobiorreatores fechados (FBR), onde há o emprego de CO₂ enriquecido nesses sistemas. Assim há reciclagem deste gás, reduzindo suas emissões, enquanto a biomassa de algas é convertida em biocombustíveis. Uma lagoa típica compreende um canal oval em circuito fechado, com 0,25 e 0,4 m de profundidade, aberto ao ar e misturado com uma roda para circular a água e evitar a sedimentação (as lagoas são mantidas rasas para otimizar a absorção óptica). Em sistemas

de fotobiorreatores, o meio de cultura é feito em tubos ou placas transparentes e o caldo de microalgas é circulado a partir de um reservatório central. Esse sistema permite um melhor controle do ambiente da cultura de algas, mas tendem a ser mais caros, além de uma demanda de energia maior (SLADE & BAUEN, 2013).

As microalgas heterotróficas são cultivadas em grandes fermentadores com açúcar ou amido, semelhante à fermentação com etanol de milho que já fornece quase 10% dos combustíveis líquido destinados ao transporte. As algas (macroalgas) são cultivadas em água do mar, tipicamente em sistemas próximos da costa, embora o cultivo de oceanos abertos tenha sido estudado no passado e seja novamente de interesse, e até mesmo o cultivo *on shore* de algas é uma possibilidade.

Em comparação com a biomassa terrestre, as microalgas são atraentes pelas seguintes razões: altas taxas de crescimento e elevada eficiência fotossintética, o que leva a significativa produtividade por área, sem ser necessário ter solos férteis – há possibilidade de serem cultivadas em antigos lixões ou em áreas desérticas - as demandas de baixa altitude, especialmente na operação de reação fechada, e o potencial de capacidades de síntese ao usar estirpes específicas (por exemplo, para aditivos alimentares, produtos farmacêuticos, cosméticos e pigmentos) (FRANZ et al, 2012).

Há três componentes principais na biomassa de microalgas: carboidratos, proteínas e lipídeos. Para constituir uma matéria-prima de biodiesel, esta deve ser rica em ácido graxo, podendo concluir que uma microalga com um teor de proteínas muito alto e baixo teor de lipídeos não seria útil como matéria-prima para biocombustíveis. A maior parte do óleo natural de microalgas está na forma de triacilgliceróis (lipídeos formados pela ligação de 3 moléculas de ácidos graxos com o glicerol, um triálcool de 3 carbonos, através de ligações do tipo éster); os ácidos graxos presentes nas algas podem ser de cadeia curta e longa, no entanto, os ácidos graxos de cadeia curta são os mais propensos para a produção de biodiesel (CHISTI, 2007).

Em qualquer processo que visa a produção de óleo pela fotossíntese, o objetivo principal é uma alta produtividade de óleo, ou, em outras palavras, uma alta eficiência fotossintética da produção de lipídeos, que varia de acordo com a espécie de microalga, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Conteúdo de óleo de algumas espécies de algas.
(Adaptado SCHENK et al., 2008)

Microalga	Conteúdo de Óleo (% peso seco)
<i>Botryococcus Braunii</i>	25,0 - 75,0
<i>Chlorella sp.</i>	28,0 - 32,0
<i>Chlorella vulgaris</i>	5,0 - 28,0
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca sp.</i>	16,0- 37,0
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	16,7 - 71,0
<i>Euglena gracilis</i>	14,0 - 20,0
<i>Isochrysis sp.</i>	25,0 - 33,0
<i>Monallanthus salina</i>	>20,0
<i>Nannochloris sp.</i>	20,0 - 35,0
<i>Nannochloropsis sp.</i>	31,0 - 68,0
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35,0 - 54,0
<i>Nitzschia sp.</i>	16,0 - 47,0
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20,0 - 30,0
<i>Porphyidium cruentum</i>	9,0 - 18,8
<i>Scenedesmus obliquus</i>	11,0 - 55,0
<i>Scenedesmus sp.</i>	19,6 - 21,1
<i>Schizochytrium sp.</i>	50,0 - 77,0
<i>Spirulina maxima</i>	4,0 - 9,0
<i>Spirulina platensis</i>	4,0 - 16,6
<i>Tetraselmis suecica</i>	25,0 - 23,0
<i>Tetraselmis sp.</i>	12,6 - 14,7

É possível aumentar os valores de lipídeos a fim de auxiliar a viabilização econômica da produção de biodiesel a partir do óleo de microalgas, apesar de alguns organismos já apresentarem valores expressivos no percentual de lipídeos. Este resultado pode ser obtido por meio da aplicação de condições de estresse (deficiência de nutrientes, anaerobiose, temperaturas extremas) na fase de crescimento da biomassa microalgal (SCOTT et al., 2010; KIRROLIA et al., 2013).

Algumas análises indicam que a produção de biodiesel a partir de microalgas pode apresentar algumas vantagens frente a outros tipos de biomassa em relação à extração de óleo. Enquanto a soja produz de 0,2 a 0,4 toneladas de óleo por hectare, o pinhão manso produz de 1 a 6 toneladas de óleo por hectare e o dendê, de 3 a 6 toneladas de óleo por hectare, as algas, segundo pesquisas mais otimistas, em um

hectare podem produzir 237 mil litros de biocombustível (USP, 2011).

O cultivo de microalgas em lagoas abertas é a abordagem habitual (BOROWITZKA, 1999; POSTEN & SCHAUB, 2009). Contudo, a produção de biomassa oriunda de microalgas pode ser realizada em biorreatores. Metabolicamente é possível utilizar a rota fotossintética em fotobiorreatores ou a rota respiratória em biorreatores heterotróficos (RODOLFI et al., 2009).

Nos sistemas fotossintéticos, a produção de biomassa é realizada por meio da conversão de dióxido de carbono (CO_2), energia luminosa e nutrientes inorgânicos. As microalgas utilizam o dióxido de carbono do ar e a luz, por meio da fotossíntese, para converter em várias formas, tais como polissacáridos, proteínas, lipídeos e hidrocarbonetos (KIRROLIA et al., 2013). O cultivo fotossintético (autotrófico) concede dois tipos de disposição da biomassa: em sistemas abertos, nos quais os cultivos estão expostos em contato direto com a atmosfera; e sistemas fechados, em que o contato com a atmosfera é significativamente reduzido ou inexistente. Os principais arranjos dos reatores abertos são tanques retangulares, circulares e do tipo *raceway* (BOROWITZKA, 1999). Nos sistemas fechados, normalmente empregam-se reatores do tipo coluna de bolhas, *air-lift* e arranjos tubulares espirais (JACOB-LOPES et al., 2009).

O reator fechado é mais adequado para algumas microalgas que são facilmente contaminadas por outros micróbios, exceto para algumas microalgas especiais que conseguem sobreviver bem em ambientes extremos, tais como com pH elevado (por exemplo, *Spirulina sp*) e alta salinidade (por exemplo, a *Dunaliella sp*) ou podem crescer muito rapidamente (por exemplo, *Chlorella sp*) em lagoas abertas (HUANG et al., 2010).

Como mitigar as emissões dos gases do efeito estufa, principalmente o CO_2 , é um dos problemas ambientais mais discutidos na atualidade, o cultivo autotrófico possui um aspecto bastante positivo que é o uso de CO_2 resultante de processos industriais, o que representa uma forma de minimizar as emissões desses gases, além da diminuição dos custos de produção da biomassa microalgal.

O cultivo heterotrófico de microalgas oferece várias vantagens sobre o cultivo fototrófico, incluindo a eliminação da exigência de luz, bom controle do processo de cultivo e baixo custo para a colheita da biomassa, já que a densidade celular obtida é mais elevada (CHEN & JOHNS, 1991). Na cultura heterotróficas, tanto o crescimento celular como a biossíntese de produtos são significativamente influenciados por vários fatores ambientais e nutricionais.

Em sistemas heterotróficos a conversão de compostos orgânicos se baseia na ausência de energia luminosa para a produção de biomassa, onde as células utilizam compostos orgânicos como fonte de energia e de carbono, conseqüentemente, são empregados nestes

cultivos os reatores fechados do tipo *air-lift*, coluna de bolhas e os agitados mecanicamente (QUEIROZ et al., 2007).

Microalgas cultivadas heterotróficamente, geralmente acumulam mais lipídeos do que os fotoautotroficamente cultivadas (MIAO & WU, 2004). Em contraste com a cultura autotrófica, a cultura heterotrófica pode ser realizada em biorreatores microbianos convencionais. Assim, é mais fácil alterar as condições para melhorar o rendimento de biomassa e reduzir o custo de produção de biomassa de microalgas. O biodiesel a partir de óleo de microalgas heterotrófico poderia ser uma alternativa competitiva ao óleo diesel convencional (MIAO & WU, 2006).

Segundo Jiang et al. (2011) há ainda um terceiro tipo de cultivo de microalgas denominado mixotrófico, onde é utilizada a luz, compostos orgânicos e inorgânicos como fonte de energia e CO₂ e compostos orgânicos como fonte de carbono.

De acordo com estudo realizado por Zhao et al. (2012), a taxa de crescimento em cultura mixotrófica é a soma do crescimento autotrófica e o crescimento heterotrófico. O crescimento de algumas microalgas em sistema mixotrófico pode chegar a ser de três a dez vezes maior em produção de biomassa comparado com fototrófico.

3. MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DO ÓLEO PARA BIODIESEL

Todo o processo de produção de biodiesel consiste em isolamento estirpe e seleção, cultivo das microalgas, colheita, secagem, extração lipídeos e, finalmente, a produção de biodiesel.

As microalgas são capazes de produzir uma elevada gama de lipídeos e a distribuição destes nas células depende da espécie, assim como das condições de cultivo (HU et al., 2008). Estes lipídeos incluem fosfolipídeos, glicolipídeos, mono-, di- e triacilgliceróis, dentre outros. Os triacilgliceróis são, dentro os lipídeos passíveis de extração, os únicos facilmente convertidos em biodiesel pelo método de transesterificação, o mais adotado comercialmente.

Não há um método de extração de óleo que seja aplicável a todas as espécies de microalgas, devido à variação no tamanho das células de microalgas e sua estrutura. Vários métodos são utilizados para realizar a lise celular como processos mecânicos, químicos e biológicos (RASHID et al, 2014).

Os métodos mecânicos são amplamente utilizados para a extração de óleo das células de microalgas, por meio do qual as células são rompidas por força física (KIM et al., 2013). A eficiência na extração do óleo por meio deste processo depende da espécie de microalgas que será utilizada. Por exemplo, *Spirulina sp.* não tem parede celular rígida e sua extração de óleo é mais fácil do que a espécie *Chlorella sp.*

A ruptura mecânica pode ser realizada por vários métodos, tais como ultra-sônico, *bead beating*, e micro-ondas.

Bead beating é um método simples e rápido de rompimento celular. Neste método, as células são rompidas por sua colisão com grânulos de metal. Estudos têm demonstrado que a eficiência deste método depende do tamanho do reator, características do grânulo, e a velocidade de agitação. Com base em estudos recentes, foi demonstrado que a eficiência do presente método é bastante baixa. Além disso, a entrada de alta energia e dissipação de calor durante a operação reduz a sua aplicação (RASHID et al., 2014).

A alta intensidade ultra-sônica (400-800 KHz) produz microbolhas, ondas de choque e calor, que são úteis para quebrar a parede celular de microalgas. Este método é considerado como o melhor para a ruptura de células, mas não pode ser aplicado em todas as espécies de microalgas. A eficiência ultra-sônica depende de vários parâmetros, tais como o tamanho do microbolha, de densidade média, concentração de células de microalgas, temperatura e frequência. O ultra-som é uma tecnologia eficiente, no entanto, o alto consumo de energia e dissipação de calor são os principais gargalos para a sua aplicação em larga escala. (RASHID et al., 2014).

O método de micro-ondas possui radiações na faixa de 300 MHz a 300 GHz. Quando a biomassa das microalgas é atingida por essas ondas, a água do interior da célula passa pelo processo de aquecimento, virando vapor, acarretando a lise da parede celular de dentro para fora (LEE et al., 2012). Dentre os métodos de ruptura celular testados por Lee et al. (2012), o método de micro-ondas se mostrou o mais eficiente, com maior porcentagem de extração de lipídeos em todas as espécies.

O rompimento celular pode ser induzido por métodos químicos, igualmente. Os produtos químicos comumente utilizados são clorofórmio, hexano, benzeno, ácidos e álcalis. A extração química pode ser realizada na biomassa de microalgas molhada ou seca, sendo que a biomassa seca apresenta alta eficiência de extração. Processos químicos mostram alta permeabilidade na biomassa seca em relação a biomassa molhada. Considerando o elevado custo de secagem, a extração a partir de biomassa seca não é economicamente viável (RASHID et al., 2014).

Outro método que pode ser realizado é a extração do óleo utilizando choques osmóticos e enzimas. Em choque osmótico, as células são rompidas por um desenvolvimento de pressão através da parede da célula (KIM et al., 2013).

O método bioquímico para a extração do óleo contido nas células das microalgas consiste em processo de transesterificação (o qual produz biodiesel) e processo de fermentação (processo que origina o etanol).

O processo de transesterificação ocorre num reator onde o catalisador e metanol misturados reagem com os triglicérides presentes em óleo de algas. O produto a montante é então bombeado para um tanque separador. Quando se utiliza um catalisador de base ou ácido, a camada superior é dominada por éster metílico, álcool em excesso e o catalisador, ao passo que o nível mais baixo é dominado por glicerol (GUAN et al., 2004; KOUZU et al., 2008).

O processo de transesterificação enzimática é influenciado pelo pH da própria enzima, a concentração de substratos, e pelo espaçamento entre as moléculas de enzima do substrato. O catalisador enzimático não se altera durante o processo, e é eficaz para a reutilização (SUALI & SARBATLY, 2012). O biodiesel é produzido por transesterificação do glicerol como um produto secundário.

A produção de etanol a partir de microalgas é obtida principalmente por meio da fermentação do amido, açúcar e celulose contida na biomassa de microalgas, ou seja, é necessária a obtenção de grandes quantidades de biomassa com elevado teor de carboidratos (KIM et al., 2011).

Dependendo do seu percurso pré-tratamento, a biomassa de microalgas a ser submetida à extração de lipídeos pode assumir um dos seguintes estados físicos: concentrado, concentrado interrompido ou pó seco. Durante a extração de lipídeos, a biomassa de microalgas é exposta a um solvente de extração o qual extrai os lipídeos para fora das matrizes celulares. Uma vez que os lipídeos brutos são separados a partir dos resíduos celulares, do solvente de extração e da água (apenas quando a extração é realizada em concentrado ou concentrado interrompido) a sua massa pode ser medida gravimetricamente. Idealmente, a tecnologia de extração de lipídeos para a produção de biodiesel oriundo de microalgas deve ter um nível elevado de especificidade para os lipídeos, a fim de minimizar a co-extração de contaminantes não-lipídeos, tais como proteínas e hidratos de carbono (HALIM et al., 2012).

A transformação da biomassa excedente da microalga em biocombustível é tão importante quanto a extração lipídica para gerar biodiesel e, neste contexto, dois tipos de processos de conversão têm sido explorados: termoquímicos e bioquímicos. A extração de lipídeos, acrescida da conversão de biomassa em outros combustíveis, torna o processo com um rendimento próximo a 100% e as microalgas como um dos organismos mais eficientes na geração de combustíveis não fósseis (AMIN, 2009; McKENDRY, 2002).

Os processos termoquímicos são divididos em gaseificação, onde a biomassa residual originária da extração de lipídeos contendo esqueletos carbônicos é convertida a gás por oxidação parcial com ar e oxigênio em temperaturas elevadas; liquefação, que consiste na conversão da biomassa em combustível líquido através de uma reação

hidrotérmica; pirólise, onde a produção do biocombustível baseia-se na ruptura da estrutura original da biomassa pela ação do calor em atmosfera com pouco ou na ausência de oxigênio; e hidrogenação, que é um processo de redução química a elevadas temperaturas e pressões na presença de catalisador e solvente (NAGLE & LEMKE, 1990; GUSCHINA & HARWOOD, 2006; SUALI & SARBATLY, 2012).

As técnicas de conversão bioquímicas incluem a fermentação alcoólica, a qual é realizada na ausência de ar e produz biogás, uma mistura de metano e dióxido de carbono; digestão anaeróbica e produção de hidrogênio foto-biológico (PRAGYA et al., 2013; DERMIBAS, 2010).

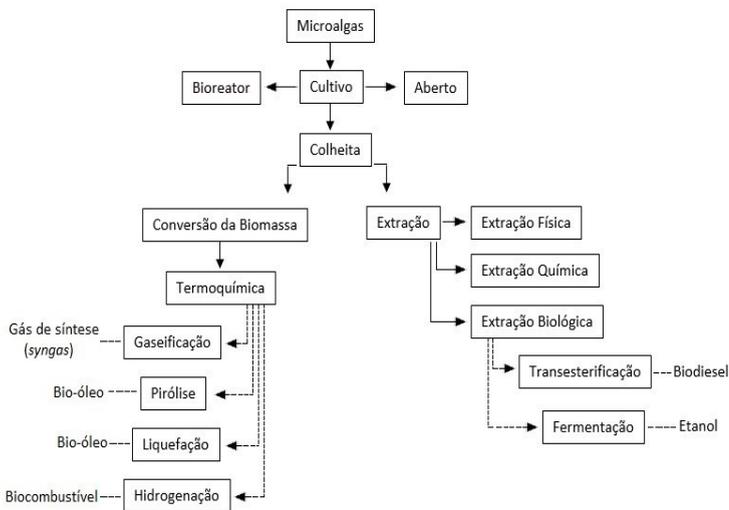


Figura 1 - Síntese das transformações de microalgas para biocombustíveis e seus principais produtos (Adaptado SUALY & SARBATLY, 2012)

4. OUTROS COMBUSTÍVEIS

4.1 Bioetanol

Embora possa parecer benéfico usar materiais vegetais renováveis para biocombustível, o uso de resíduos vegetais e outras fontes de biomassa para os biocombustíveis levanta muitas preocupações sobre os principais problemas ambientais, incluindo a escassez de alimentos e grave destruição dos recursos vitais do solo (SMITH, 2008). Para uma determinada linha de produção, a comparação das

matérias-primas inclui várias questões: (1) composição química da biomassa, (2) práticas de cultivo, (3) a disponibilidade de práticas e uso da terra, (4) o uso de recursos, (5) balanço de energia, (6) emissão de gases de efeito estufa, gases acidificantes e gases de destruição da camada de ozônio, (7) empobrecimento do solo, (8) injeção de pesticidas, (9) erosão do solo, (10) contribuição para perda de biodiversidade e valor paisagístico, (11) preço de produção da biomassa, (12) alto custo de logística (transporte e armazenamento da biomassa), (13) valor econômico direto das matérias-primas tendo em conta os co-produtos, (14) criação ou manutenção de emprego, e (15) as necessidades de disponibilidade de água (BALAT & BALAT, 2009).

Certas espécies de microalgas têm a capacidade de produzir elevados níveis de carboidratos ao invés de lipídeos como reserva de polímeros. Estas espécies são candidatas ideais para a produção de bioetanol a partir do carboidrato extraídos de microalgas, para produzir açúcares fermentáveis (MUSSATTO et al., 2010).

A produção de etanol pode ser realizada de acordo com o seguinte procedimento: na primeira etapa, o cultivo de microalgas usando a luz solar de energia é realizada em tanques abertos ou cobertos ou fotobiorreatores fechados. Na segunda etapa, a biomassa deve estar concentrada. Após a colheita, o amido de microalgas é extraído das células com o auxílio de dispositivos mecânicos ou enzimas. Após a extração de amido, enzimas amilolíticas são utilizadas para promover a formação de açúcares fermentáveis. A espécie de levedura *S. cerevisiae* é então adicionada para iniciar a fermentação alcoólica. No final da fermentação, o caldo fermentado contendo etanol é escoado do tanque e bombeado para um tanque de retenção para ser alimentado para uma unidade de destilação (AMIN, 2009; DAROCH et al., 2013).

4.2 Bio-hidrogênio

O hidrogênio é uma fonte limpa de combustível importante, com larga aplicação em células combustível, liquefação do carvão e modernização de óleos pesados (por exemplo, betume). Portanto, a demanda na produção de hidrogênio tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. Eletrólise da água, reforma a vapor de hidrocarbonetos e processos de auto-térmico são métodos bem conhecidos para a produção de gás hidrogênio, mas não é rentável devido aos requisitos de alta energia.

O hidrogênio pode ser produzido biologicamente por uma variedade de meios, incluindo pelo vapor de bio-óleos, biofotólise da água por algas, escuro e foto-fermentação de materiais orgânicos geralmente carboidratos oriundos de bactérias (KAPDAN & KARGI, 2006).

O processo de foto-fermentação no escuro é uma nova abordagem para a produção de bio-hidrogênio. Um dos principais problemas na produção de hidrogênio pelo método foto-fermentativo no escuro é o custo da matéria-prima. Rica em carboidratos, resíduos sólidos deficientes em nitrogênio como celulose e amido contendo resíduos agrícolas, da indústria alimentar e de alguns efluentes da indústria de alimentos (tais como soro de queijo, óleo de azeite e leveduras de águas residuais da indústria) podem ser utilizados para a produção de hidrogênio, usando tecnologias de bio-processos adequados. A utilização dos resíduos mencionados para a produção de hidrogênio fornece geração de energia de baixo custo, além do tratamento simultâneo dos resíduos (KAPDAN & KARGI, 2006).

4.3 Bio-óleo

Quando a biomassa é processada sob a alta temperatura na ausência de oxigênio, os produtos são produzidos em três fases: a fase do vapor, a fase líquida, e a fase sólida. A fase líquida é uma mistura complexa denominada bio-óleo (LI et al., 2008).

As composições dos bio-óleos podem variar significativamente de acordo com os tipos de matérias-primas e as condições de processamento. Bio-óleos demonstraram ser adequado para a geração de energia tanto por via combustão externa (por exemplo, ciclos de vapor, ciclos de Rankine orgânicos e motores Stirling) quanto por combustão interna (por exemplo, motores a diesel e motores de turbina a gás) ou por co-incineração com diesel fóssil ou gás natural. No entanto, eles possuem várias características indesejáveis, tais como alto teor de oxigênio, baixo conteúdo de calor, alta viscosidade a baixa temperatura, e instabilidade química que impedem a sua utilização como combustíveis de transporte de qualidade (CHIARAMONTI et al., 2007).

A maioria dos estudos têm-se centrado na utilização de biomassa convencional de silvicultura e fontes agrícolas. Foi estimado que no ano de 2000, a maioria da energia da biomassa, seria produzida a partir de madeira e resíduos (64%), seguidos de resíduos sólidos urbanos (RSU) (24%), resíduos agrícolas (5%) e gases de aterros (5%) (DERMIBAS, 2001). Recentemente, algumas investigações foram realizadas sobre a adequação da biomassa de microalgas para a produção de bio-óleo e demonstraram que, em geral, bio-óleos de microalgas são de melhor qualidade do que os bio-óleos de madeira (MIAO et al., 2004).

4.4 Biogás

Agaseificação é a conversão de biomassa em gás combustível,

tais como H_2 , CH_4 , CO_2 e amoníaco. O gás de produto de baixo valor calórico (cerca de 4-6 MJ/Nm³) pode ser queimado diretamente ou usado como combustível para motores a gasolina e turbinas a gás, ou pode ser usado como matéria-prima, gás de síntese (*syngas*), na produção de produtos químicos, por exemplo metanol (McKENDRY, 2002).

Embora o gás de síntese tenha um valor de aquecimento inferior ao do gás natural, ele ainda pode ser usado no ciclo de produção de energia elétrica de alta eficiência, ou pode ser usado para fazer muitos produtos, incluindo fertilizantes de amoníaco, produtos químicos derivados de metanol e combustíveis sintéticos de queima limpa (AMIN, 2009).

A maneira mais direta do uso energético de microalgas é a produção de metano para biogás. Após concentração celular por meio de filtração ou centrifugação, não é necessário processamento adicional. O biogás também é capaz de lidar com o conteúdo de água relativamente elevado. Em comparação com outros tipos de biomassa de microalgas, há estirpes que não possuem compostos resistentes, como lignina. A fermentação pode ocorrer muito rapidamente. Outra vantagem considera logística, como o cultivo de microalgas e produção de biogás são basicamente tecnologias descentralizadas. CO_2 e minerais podem ser aproveitados de volta para a fase de produção de algas de forma bastante eficiente. A fermentação é também uma opção para o uso de biomassa residual após a extração de biodiesel ou outros compostos valiosos (POSTEN & SCHAUB, 2009).

5. DESAFIOS

As altas taxas de crescimento, as densidades de crescimento razoáveis e os preços crescentes do petróleo tem sido citado como razões para investir de maneira significativa para transformar algas em biocombustíveis. No entanto, para que as algas amadureçam como uma plataforma viável, economicamente, para compensar o uso do petróleo e, conseqüentemente, reduzir emissões de CO_2 , há uma série de obstáculos que devem ser superados desde de como e onde crescem essas algas até o processamento de seu combustível. Os principais desafios incluem o isolamento de tensão, fornecimento e utilização de nutrientes, gestão da produção, gestão da colheita, o desenvolvimento de co-produtos, extração de combustíveis, refino e utilização de biomassa residual (HANNON et al, 2011).

Entre os fatores mais importantes que determinam a viabilidade econômica em geral, estão a produção primária efetiva de biomassa por área, que resulta da integração das taxas de produtividade da biomassa em períodos críticos. As taxas de crescimento são afetadas, de acordo com as espécies individuais utilizadas, por condições externas:

disponibilidade de luz, temperatura, disponibilidade de nutrientes, concentração de CO₂ local e de compostos inibidores (FRANZ et al, 2012).

Diversos autores estimaram preços e custos diferentes para produção de biocombustível de microalgas. Norsker et al. determina que os custos de produção sejam de 4,95, 4,16 e 5,96 € kg⁻¹ de biomassa em lagoas abertas, FBR tubulares horizontais e FBRs de painel plano, respectivamente, para uma instalação de 100 hectares. Chisti estima que o custo por galão de produção seja de US\$2,95 e US\$3,80 para FBRs e lagoas abertas respectivamente, para uma instalação que produz 100 mil kg de biomassa anualmente. Alternativamente, Davis et al. encontra preços mínimos de venda de lipídeos de algas de 8,52 \$ gal⁻¹ para o sistema de lagoas e 18,10 \$ gal⁻¹ para FBRs para que se obtenha uma taxa de retorno interna de 10% em uma instalação que produz 10 MG ano⁻¹. Richardson et al. também avaliam uma instalação de produção produzindo 10 MG ano⁻¹ e descobriram que o sistema de lagoas possui um menor custo de produção (\$ 12,74 gal⁻¹) em comparação com PBRs, que atinge um custo de \$ 32,57 gal⁻¹. No entanto, é possível dizer que esses estudos assumiram produtividades otimistas e que não refletem com precisão as produtividades reais e o conteúdo de lipídeos celulares atualmente realizável nos sistemas de lagoas abertas e FBRs existentes. Quinn et al. relatou uma média de dois anos de 7,4 g de biomassa m⁻² d⁻¹ e 35% de conteúdo lipídico de *Nannochloropsis sp.* cresceu no sistema Solix FBR. Rodolfi et al. relataram produtividades externas médias de 11g de biomassa m⁻² d⁻¹ e 40% de conteúdo lipídico para *Nannochloropsis sp.* em fotobiorreatores de parede verde.

O desenvolvimento bem-sucedido de uma indústria de biocombustíveis e co-produtos com base em algas requer uma combinação efetiva entre inovações técnicas em sistemas e processos, juntamente com a viabilidade econômica na implementação prática e ampliação integrada para produção e comercialização. Permitir o avanço e a comercialização bem-sucedidos, do campo ainda imaturo de biocombustíveis de algas, também requer a confiança, envolvimento e investimento das principais instituições públicas e privadas de forma a reduzir os riscos técnicos e superar desafios. A viabilidade econômica do processo em termos de minimização dos custos operacionais e de manutenção, juntamente com a maximização da produção de microalgas ricas em óleo, é o fator chave para a comercialização bem-sucedida de seu combustível (GENDY & EL-TEMTAMY, 2013).

Para ter uma noção do progresso potencial necessário, foi realizada uma análise econômica simplificada por meio de uma microalga que, supostamente, produz 0,21 g/l/dia de biomassa, com um teor de lipídeo de 21%. Nesse modelo, o óleo à base de petróleo teria de custar cerca de \$710 por barril para que as taxas de crescimento e acumulação

de lipídeos deste organismo sejam competitivas às tecnologias de produção que são atualmente utilizadas (RODOLFI et al., 2009).

Concomitantemente, o alto custo da colheita da biomassa de algas pode gerar um balanço energético negativo, já que ela pode chegar a 30% do custo total do processo (GUDIN & CHAUMONT, 1991). Além disso, deve-se notar que a escolha dos métodos de rompimento celular, solventes químicos e condições de extração, em sua maioria, variam de acordo com os estirpes das microalgas. Em outras palavras, não há um único método que pode dar extração de lipídeos de maneira eficiente para todos os tipos de estirpes de microalgas.

Com a tecnologia atual as estimativas atuais de biocombustíveis baseados em algas que variam de US \$ 300-2600 por barril, os obstáculos técnicos precisam ser superados para que esse preço se torne competitivo e haja redução de custos. Algumas dessas melhorias podem significar a melhoria de estratégias de crescimento e engenharia, além da otimização do uso de todo o organismo (HANNON et al, 2011).

A produção diversificada de biocombustíveis a partir das algas é necessária para melhorar seu balanço energético. Um dos exemplos de sucesso é a utilização da biomassa de microalgas para produção de etanol, uma vez que há uma elevada concentração de carboidratos presentes na sua biomassa. Outros tipos de biocombustíveis potenciais que podem ser derivados a partir do resíduo de biomassa de microalgas é o bio-óleo, além ainda da consolidada produção para a obtenção de biomassa, diversas microalgas têm sido cultivadas por sua capacidade de sintetizar compostos considerados nutracêuticos, tais como os ácidos graxos poli-insaturados e pigmentos carotenóides (astaxantina, betacaroteno, luteína, cantaxantina etc.), que apresentam propriedades terapêuticas. Atualmente, são comercializadas como alimento natural ou incorporadas em massas, petiscos, doces, bebidas etc., tanto como suplemento nutricional quanto como corantes naturais (BECKER, 2004).

6. CONCLUSÃO

Recentemente, encontrar novas fontes de energia para substituir o petróleo tem sido um tema atual e emergente de interesse mundial. Biocombustível de algas é um candidato ideal que eventualmente poderia substituir combustíveis derivados do petróleo devido a várias razões, como alto teor de óleo, de alta produção, menos exigência de terra, etc.

A vantagem da microalga como fonte renovável de biodiesel tem sido discutida extensivamente por apresentar altos rendimentos de produção, quando comparados às culturas terrestres. Além disso, a pouca ou nenhuma dependência de variações sazonais e, principalmente, sua composição celular com alto rendimento de óleo e a falta de compostos não fermentadores para a produção de biogás fazem das microalgas uma excelente fonte alternativa para a produção de biodiesel.

Contudo, o alto preço para a produção de biocombustível derivado de alga não é competitivo em relação ao combustível proveniente do petróleo, tornando essa prática inviável.

Além disso o índice de eficiência de conversão de energia obtida por microalgas é relativamente menor do que a colza, óleo de palma e pinhão manso, indicando a produção de biocombustíveis a partir de microalgas insustentável (LAM & LEE, 2012).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIN, S. Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae. *Energy Conversion and Management*, vol. 50, p. 1834-1840, 2009.

BALAT, M. & BALAT, H. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy*, vol. 86, p. 2273–2282, 2009.

BECKER, W. Microalgae in human and animal nutrition. In: RICHMOND, A. (Ed). *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. London: Blackwell Science, p.312-351, 2004.

BOROWITZKA, M. A. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnol.*, vol. 70, p.313-321, 1999.

CHEN, F.; & JOHNS, M. R. Effect of C/N ratio and aeration on the fatty acid composition of heterotrophic *Chlorella sorokiniana*. *Journal of Applied Phycology*, vol. 3, p. 203–209, 1991.

CHIARAMONTI, D.; OASMAA, A.; SOLANTAUSTA, Y. Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 11 (6), p. 1056–1086, 2007.

CHISTI, Y. Biodiesel from Microalgae. *Biotechnology Advances*, vol. 25, p. 294-306, 2007.

DAROCH, M. et al. Recent advances in liquid biofuel production from algal feedstocks. *Applied Energy*, vol. 102, p. 1371–1381, 2013.

DAVIS, R.; ADEN, A.; PIENKOS, P.T.. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. *Appl. Energy*, vol. 88, p. 3524–3531, 2011.

DEL RUE, F.; SETIER, P.A.; SAHUT, C.; COURNA, L.; ROUBAUD, A.; PELTIER, G.; FROMENT, A.K. An economic, sustainability, and energetic model of biodiesel production from microalgae. *Bioresour. Technol.*, vol. 111, p. 191–200, 2012.

DEMIRBAS, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion Management*, vol. 42 (11), p. 1357–1378, 2001.

DEMIRBAS, A. Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management*, vol. 51, p. 2738–2749, 2010.

FRANZ, A.; LEHR, F.; POSTEN, C.; SCHAUB, G. Modeling microalgae cultivation productivities in different geographic locations – estimation method for idealized photobioreactors. *Biotechnol. Journal*, vol. 7, p. 546–557, 2012.

GENDY, T. S. & EL-TEMAMY, S. A. Commercialization potential aspects of microalgae for biofuel production: An overview. *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 22, p. 43–51, 2013.

GUAN, Y.; DENG, M.; YU, X. & ZHANG, W. Two-stage photo-biological production of hydrogen by marine green alga *Platymonas subcordiformis*. *Biochem. Eng. Journal*, vol. 19, p. 69–73, 2004.

GUDIN, C. & CHAUMONT, D. Cell fragility: the key problem of microalgae mass production in closed photobioreactors. *Bioresource Technol.*, vol. 38, p. 145-151, 1991.

GUSCHINA, I. A. & HARWOOD, J. L. Lipid and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Progress in Lipid Research*, vol. 45, p. 160-186, 2006.

HALIM, R. et al. Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review. *Biotechnology Advances*, vol. 30, p. 709-732, 2012.

HANNON, M.; GIMPEL, J.; TRAN, M.; RASALA, BETH & MAYFIELD, S. Biofuels from algae: challenges and potential. *Biofuels*, vol. 1(5), p. 763–784, 2010.

HU, Q. et al. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*, vol. 54, p. 621–639, 2008.

HUANG, G.; CHEN, F.; WEI, D.; ZHANG, X.; CHEN, G. Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Applied Energy*, vol. 87, p. 38–46, 2010.

JACOB-LOPES, E.; REVAH, S.; HERNÁNDEZ, S.; SHIRAI, K. & FRANCO, TT. Development of operational strategies to remove carbon dioxide in photobioreactors. *Chemical Engineering Journal*, 153, p. 120–126, 2009.

JIANG, L.; LUO, S.; FAN, X.; YANG, Z. & GUO, R. Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO₂. *Applied Energy*, vol. 88, 3336–3341, 2011.

KAPDAN, I. K.; KARGI, F. Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technologie*, vol. 38 (5), p. 569–582., 2006.

KIM, J.; YOO, G.; LEE, H.; LIM, J.; KIM, K.; KIM, CW. Methods of downstream processing for the production of biodiesel from microalgae. *Biotechnol. Advances*, vol. 31, p. 862–876, 2013.

KIM, N.J.; Li H.; JUNG, K.; CHANG, C.H.; LEE, P.C. Ethanol production from marine algal hydrolyzate using *Escherichia coli* KO11. *Biore-source Technol.*, vol. 102, p. 7466–7469, 2011.

KIRROLIA, A. et al. Microalgae as a boon for sustainable energy production and its future research & development aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, p. 642–656, 2012.

KNOTHE, G.; VAN GERPEN, J.; KRAHL, J.; Manual de Biodiesel, Edgard Blucher: São Paulo, 2006.

KOUZU, M.; KASUNO, T.; TAJIKA, M.; YAMANAKA, S. & HIDAKA, J. Active phase of calcium oxide used as solid base catalyst for transesterification of soybean oil with refluxing methanol. *Applied Catalysis A: General*, vol. 334, p. 357–365, 2008.

LEE, A. K.; Lewis, DAVID M.; ASHMAN, P. J. Disruption of microalgal cells for the extraction of lipids for biofuels: Processes and specific energy requirements. *Biomass and Bioenergy*, vol. 46, p. 89–101, 2012.

LI, Y., HORSMAN, M., WU, N., LAN, C. Q. & DUBOIS-CALERO, N. Biofuels from Microalgae. *Biotechnol. Progress*, vol. 24, p. 815–820, 2008.

MA, FANGRUI & HANNA, MILFORD, B. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, vol. 70 (1), p. 1–15, 1999.

MATA, T. M. et al. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, p. 217–232, 2010.

MAXWELL, E. et al. Resource evaluation and site selection for microalgae production systems. *SERI/TR-215-2484*, 1985.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, vol. 83, p. 47–54, 2002.

MIAO, X. & WU Q. Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. *Bioresource Technology*, vol. 97, p. 841–846, 2006.

MIAO, X. & WU Q. High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides*. *Journal of Biotechnology*, vol. 110, p. 85–93, 2004.

MIAO, X. & WU Q.; Yang, C. Fast pyrolysis of microalgae to produce renewable fuels. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 71 (2), p. 855–863, 2004.

MOHANTY, S. M.; Behera, S.; Swain, M.R.; Ray, R.C. Bioethanol production from mahula (*Madhuca latifolia* L.) flowers by solid-state fermentation. *Appl Energy*, vol. 86, p. 640–644, 2009.

NAGLE, NICK & LEMKE, P. Production of methyl ester fuel from microalgae. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 24–25, p. 355–361, 1990.

NORSKER, N.; BARBOSA, M. J.; VERMUE, M. H.; WIJFFELS, R. H. Microalgal production — a close look at the economics. *Biotechnol. Adv.*, vol. 29, p. 24–27, 2011.

PEREIRA, C. M. P. et al . Biodiesel renovável derivado de microalgas: avanços e perspectivas tecnológicas. *Quím. Nova*, v. 35, n. 10, p. 2013-2018, 2012.

POSTEN, CLEMENS & SCHAUB, G. Microalgae and terrestrial biomass as source for fuels – A process view. *Journal of Biotechnology*, vol. 142, p. 64–69, 2009.

PRAGYA, N. et al. A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, p. 159-171, 2013.

QUEIROZ, M. I.; LOPES, E. J.; ZEPKA, L. Q.; BASTOS, R. G. & GOLDBECK, R. The kinetics of the removal of nitrogen and organic matter from parboiled rice effluent by cyanobacteria in a stirred batch reactor. *Bioresour. Technol.*, vol. 98, p. 2163-2169, 2007.

QUINN, J. C.; YATES, T.; DOUGLAS, N.; WEYER, K.; BUTLER, J.; BRADLEY, T. H.; LAMMERS, P. J.. Nannochloropsis production metrics in a scalable outdoor photobioreactor for commercial applications. *Bioresour. Technol.*, vol. 117 p. 164–171, 2012.

RASHID, N. et al. Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, p. 760–778, 2014.

RICHARDSON, J. W.; JOHNSON, M. D.; OUTLAW, J. L. Economic comparison of open pond raceways to photo bio-reactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest. *Algal Res.*, vol. 1, p. 93–100, 2012.

RODOLFI, L.; CHINI ZITTELLI, G.; BASSI, N.; PADOVANI, G.; BIONDI, N.; BONINI, G. & TREDICI, M. R. Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. *Biotechnology Bioengineering*, 102, p. 100–112, 2009.

SCHENK, P. M.; THOMAS-HALL, S. R.; STEPHENS, E.; MARX, U. C.; MUSSGNUG, J. H.; POSTEN, C.; KRUSE, O.; HANKAMER, B. Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *Bioenergy Resource*, 1, 20-43, 2008.

SCOTT, S. A.; DAVEY, M. P.; DENNIS, J. S.; HORST, I.; HOWE, C. J.; LEA-SMITH, D. J. & SMITH, A. G.; Biodiesel from Algae: challenges and Prospects. *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 21, p. 277-286, 2010.

SLADE, RAPHAEL & BAUEN, A. Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and Bioenergy*, vol. 53, p. 29-38, 2013.

SMITH, A. M. Prospects for increasing starch and sucrose yields for bioethanol production. *Plant Journal*, vol. 54, p. 546-558, 2008.

SUALI, E. & SARBATLY, R. Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 4316-4342, 2012.

USP, Universidade de São Paulo. Portal Biossistemas do Brasil. Disponível em: <http://www.usp.br/portalsbiossistemas/?p=1787> Acessado em 06 de fevereiro de 2018.

ZHAO, G. et al. The effect of different trophic modes on lipid accumulation of *Scenedesmus quadricauda*. *Bioresource Technology*, vol. 114, p. 466-471, 2012.

