
NOTA TÉCNICA:

AS MICROALGAS COMO ALTERNATIVA À PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Rafael de Araujo Lira¹, Marcio Arêdes Martins², Mariana Fonseca Machado³, Lucas de Paula Corrêdo⁴,
Antonio Teixeira de Matos⁵

RESUMO

As microalgas podem ser usadas para capturar e aproveitar o CO₂ emitido por usinas termoeletricas ou por outras fontes. A mitigação das emissões dos gases do efeito estufa (GEE) resulta da conversão da biomassa colhida das microalgas em biocombustíveis renováveis, tais como o biodiesel, bioetanol, biogás e outros produtos de substituição dos combustíveis fósseis. As microalgas são usualmente cultivadas em grandes tanques com agitação promovida por pás rotativas ou em equipamentos tecnicamente projetados, os fotobiorreatores. Seu crescimento ocorre em suspensão na água quando são fornecidos todos os nutrientes necessários e, numa velocidade maior, quando há o fornecimento adequado de CO₂. Comparadas a outras opções biológicas para a captura e a utilização do CO₂, as culturas de microalgas têm como principais vantagens: potencial para alta produtividade, habilidade para capturar nutrientes das águas residuárias, das fontes de água salgada, além de ter elevada eficiência no uso da água. As microalgas são uma atrativa alternativa às oleaginosas como soja, e palmáceas. Isso por causa da sua elevada densidade de lipídios, convertendo em maior produtividade de óleo por hectare. As microalgas podem ser cultivadas em uma instalação industrial, requerendo área muito menor, não exigindo fertilidade de solo. Diante do exposto, esta revisão tem por objetivo apresentar algumas atualizações sobre o potencial do cultivo de microalgas para a produção dos biocombustíveis.

Palavras-chave: biocombustíveis; cultivo de microalgas; biomassa; biodiesel.

ABSTRACT

MICROALGAE AS ALTERNATIVES FOR BIOFUEL PRODUCTION

The microalgae can be used to capture and utilize CO₂ emitted by thermoelectric power plants or other sources. Mitigation of emissions of greenhouse effect gases results from converting biomass harvested from microalgae into renewable energy source such as biodiesel, bioethanol, biogas and other substitutes for fossil fuels. The microalgae are usually cultivated in large tanks with agitation produced by rotating blades or technically projected photobioreactors. Algae multiply suspended in water when supplied with the necessary nutrients and the multiplication rate increases on supply of additional CO₂. Compared to other biological options to capture and use CO₂, microalgae cultivation has advantages of high productivity potential, ability to capture nutrients from wastewater, waste utilization, sources of salt water and high efficiency in water use. Microalgae are an attractive alternative to oilseeds such as soybeans and palms, because of high lipid content leading to higher oil output per hectare. The microalgae can be cultivated in industrial areas, require much less space and low soil fertility. This review aims to present some updates about the potential of cultivating microalgae for biofuel production.

Keywords: biofuels, cultivation of microalgae, biomass, biodiesel.

Recebido para publicação em 05/09/2011. Aprovado em 27/08/2012.

1- Engenheiro de Alimentos, Professor do IFMT/Confresa-MT, rafael.lira@cfs.ifmt.edu.br

2- Engenheiro Químico, Professor da UFV/Viçosa-MG

3- Bióloga, Doutoranda em Botânica da UFV/Viçosa-MG

4- Graduando em Engenharia Agrícola e Ambiental da UFV/Viçosa-MG

5- Engenheiro Agrícola, Professor da UFV/Viçosa-MG

INTRODUÇÃO

A primeira menção ao uso de algas para a produção de biocombustíveis ocorreu em 1950, no MIT (Massachusetts Institute of Technology). Entre 1980 a 1995, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (*United States Department of Energy*) e o Laboratório Nacional de Energias Renováveis (*National Renewable Energy Laboratory - NREL*) desenvolveram o Algae Species Program (ASP) (BENEMANN, 2008), considerado um marco referente ao assunto. A modalidade no cultivo de algas vem se diversificando afim de propiciar maior produtividade na obtenção de óleo. Um dos maiores desafios na inovação tecnológica é o cultivo com alta densidade de microalgas e elevado teor de óleo em larga escala. Pesquisadores (CHISTI, 2007; BENEMANN, 2008; MATA *et al.*, 2010) e instituições (International Energy Agency, 2007; European Environmental Agency, 2007; Renewable Fuel Agency, 2008) envolvidas nas áreas afins, ao considerarem as conquistas recentes da biotecnologia (engenharia metabólica, genômica, proteômica, nutrigenômica, bioinformática, desenho de bioreatores etc.), assinalam que o cultivo de alta densidade será viável em pouco tempo. Em vários experimentos foram verificados o potencial de produtividade em biomassa e teor de óleo, independentemente do uso energético das algas. Até fevereiro de 2008 foram identificadas e caracterizadas algumas espécies selvagens de algas que apresentam grande potencial nestes quesitos. Alguns destes genomas foram sequenciados, sendo obtidas cepas geneticamente modificadas (MAYFIELD, 2008) para serem cultivadas apenas em pequena escala. Para desenvolver o cultivo em larga escala torna-se importante isolar e caracterizar outras espécies, além de aprimorar características específicas que venham a proporcionar aumento no potencial da microalga, como matéria prima para a produção do biodiesel. Paralelamente, é necessário desenvolver novos métodos, processos para colheita, extração e conversão do óleo.

São muitos os desafios para a produção em larga escala e a escolha do processo de cultivo de algas, o que dependerá do fomento e do interesse de instituições públicas e privadas no tema.

O diferencial da aquíicultura de microalgas em

larga escala no Brasil está na localização geográfica (próxima ao Equador), que possibilita a irradiação solar em níveis excelentes, na mesma região dos aquíferos salinos, cuja outorga não se encontre conflitante com outros usos (MELO, 2010). Os recursos naturais e humanos, a experiência dos pesquisadores, o estado da arte das pesquisas com microalgas e a diversidade das espécies endógenas com potencial para produção de altos teores de lipídios são outros elementos importantes. A estes podem ser, ainda, associadas a capacidade de desenvolver sistemas de cultivo tecnologicamente avançados, com alto desempenho e baixo custo e a existência de uma infra-estrutura logística.

Neste contexto, faz-se necessário o desenvolvimento de rotas tecnológicas de conversão do óleo extraído para os biocombustíveis. Contudo, nesta revisão apresenta-se como objetivo, uma atualização sobre a produção de microalgas e considerações sobre o potencial de aplicação do óleo de microalgas na fabricação dos biocombustíveis.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As algas usam a energia do sol para converter água e CO₂ em biomassa. São organismos fotossintetizantes que utilizam o ambiente aquático para se desenvolverem. Atualmente, mais de 150 espécies são usadas comercialmente para prover alimentos aos seres humanos e animais, servir como agentes espessantes em sorvetes e auxiliar na cura de doenças sob a forma de remédios. As microalgas geralmente não chegam a 2 mm de diâmetro e é, atualmente, o organismo fotossintético mais promissor para os biocombustíveis, pois, comparado com as macroalgas, apresentam estrutura menos complexa, maior taxa de crescimento e, em algumas espécies, alto teor de óleo (MATA *et al.*, 2009).

No entanto, existem algumas desvantagens. Possuem elevado custo de produção da matéria-prima, se forem usados fotobiorreatores fechados, os custos de implantação são extremamente altos, os sistemas de reservatórios abertos podem ser usados com queda drástica de rendimento e com significativa redução de produtividade de biomassa e as algas geneticamente modificadas podem ser mais

estáveis, mas os riscos ambientais são extremamente altos (poluição e destruição da biodiversidade nas águas e rios) (AMIN *et al.*, 2009).

Muitos estudos já foram realizados para a produção de biodiesel a partir de microalgas, mas não conseguiram superar as dificuldades e não evoluíram. Entretanto, pesquisas recentes já começam a dar resultados, embora ainda esteja distante qualquer iniciativa para a produção em larga escala. A empresa Valcent Products Inc. desenvolveu biorreatores verticais de alta densidade para produção de microalgas. Esse sistema é planejado para trabalhar em circuito fechado e usar pouca energia e água (NOGUEIRA, 2010).

Nos estudos de operação contínua realizados, os rendimentos foram de 150.000 galões/acre/ano (cerca de 1,5 milhões de litros ha⁻¹ ano⁻¹). O custo de produção do biodiesel foi de 13 centavos de dólar/L. As microalgas são potencialmente adequadas para a produção de combustíveis; entretanto, os dados de laboratório sobre essa produção são limitados (TEIXEIRA & MORALES, 2007). O crescimento fotossintético requer luz, CO₂, água e sais inorgânicos. A temperatura deve permanecer em torno de 20 a 30 °C. Para minimizar os custos da produção de biodiesel, o cultivo de microalgas apresenta várias características:

Custo relativamente baixo para a colheita e transporte (FAO, 1997) e menor consumo de água (SHEEHAN *et al.*, 1998), comparados aos de cultivo de plantas, pode ser realizado em condições não adequadas para a produção de culturas convencionais (FAO, 1997), as microalgas apresentam maior eficiência fotossintética que os vegetais superiores e podem ser cultivadas em meio salino simples (PIRT, 1986); e, são excelentes fixadoras de CO₂ (BROWN & ZEILER, 1993).

O meio de crescimento das microalgas deve prover elementos inorgânicos que constituem a célula agual. Elementos essenciais incluem: nitrogênio, fósforo, potássio, ferro, magnésio e, em alguns casos, silício, além de elementos em pequenas concentrações (na condição de micronutrientes), tais como molibdênio, boro, dentre outros. Água do mar suplementada com nitrato comercial e fertilizantes com fosfato e alguns outros micronutrientes é comumente utilizada para o crescimento de microalgas marinhas (MOLINA

GRIMA *et al.*, 1999). Segundo Molina-Grima (2003), no seu trabalho sobre análise econômica da produção de biodiesel de microalgas, os meios de cultivo correspondem a 30% do custo de produção

A biomassa microalgal contém aproximadamente 50% de carbono em peso seco (SANCHEZ MIRÓN *et al.*, 2003), em que a principal fonte provém do CO₂. A produção de 100 t de biomassa algal fixa em torno de 183 t de CO₂. A taxa de dióxido de carbono fixado na biomassa é determinada por meio da relação entre o conteúdo de carbono presente nas células e a taxa de crescimento do microrganismo, conforme descrito por Kajiwara *et al.*, (1997). A produção de biodiesel pode potencialmente usar parte do CO₂ que é liberado pelas plantas superiores ou por combustão de óleos fósseis (YUN *et al.*, 1997). Este CO₂ está muitas vezes disponível com pequeno ou nenhum custo.

Unidades de produção de biomassa algal em grande escala geralmente utilizam culturas contínuas, usando o sol com fonte de energia. Neste método de operação, um novo meio de cultura é oferecido numa taxa constante e a uma mesma quantidade de cultura algal (MOLINA GRIMA *et al.*, 1999). Estudos recentes mostraram que, no caso das microalgas com 50% de sua massa seca em óleo, somente 0,3% da área cultivada nos Estados Unidos poderiam ser utilizadas para produzir biodiesel suficiente para repor todo o combustível usado em transporte (BENEMANN, 2008). Além disso, a terra utilizada para o cultivo de microalgas pode ser desértica, com baixo valor econômico para outros usos e com alta irradiação solar e que, neste cultivo, podem ser utilizados resíduos de outras produções, como o CO₂ de processos industriais, além de resíduos orgânicos (VICHEZ *et al.*, 1997).

Em relação ao rendimento em óleo, o de microalgas é pelo menos quinze vezes maior que o da palma, que é a planta que proporciona a maior produtividade por meios convencionais (SCHENK, 2008). Existem estimativas de produção de óleo de microalgas entre 15000 e 30000 L km⁻² (BENEMANN, 2008). Os teores de lipídios e triglicerídeos (TG) dependem das condições das culturas, sendo que, na década de 1940, foram relatados percentuais bastante elevados, de 70 a 85% (FAO, 1997).

Na Tabela 1 é possível observar algumas microalgas promissoras como matéria-prima para a produção de biodiesel, graças ao seu potencial na produção de lipídios. Em relação à *Dunaliella*, dos lipídios produzidos pelas células, obteve-se até 57% como TG - molécula de partida para a produção do biodiesel (TAKAGI *et al.*, 2006). No caso de algumas microalgas ali inseridas, o percentual de lipídio é baixo, porém estudos mostram que este valor pode ser aumentado (TEIXEIRA & MORALES, 2007; ILLMAN *et al.*, 2000). Com base em diversos relatórios disponíveis, Singh e Gu (2010), relataram que, atualmente, os custos de produção do biodiesel de algas encontram-se entre 9 a 25 Reais por galão (2,38 a 6,60 Reais por litro), em tanques agitados, e de 15 a 40 Reais (3,96 a 10,57 Reais por litro) em fotobiorreatores. Esses valores incluem todo o sistema de produção que é complexo nos dias atuais, composto por vários subconjuntos de sistemas, isto é, produção, separação, extração, secagem e montagem dos sistemas, sendo que uma redução nas etapas de produção reduziria também os custos (SINGH & GU, 2010).

A produção da biomassa das microalgas não segue regime de safras. Desta forma, esta pode

ser realizada diariamente, pois tem um tempo de geração de poucas horas, o que permite processos de produção contínua. Não são necessárias áreas aráveis ou água potável, não competindo, portanto, com a agricultura, animais ou pessoas pela sua outorga.

A biofixação de CO₂ é outra característica deste cultivo, tornando neutro em carbono o biocombustível de óleo das microalgas. Após a produção da biomassa e posterior extração do óleo, os meios de cultura remanescente do processo de produção da biomassa são diretamente reaproveitados ou reciclados. Os resíduos são usados na produção de biogás por digestão anaeróbica, com posterior co-geração de energia elétrica para uso no próprio processo de cultivo. O CO₂ gerado é utilizado pela combustão do biogás na aquicultura das próprias microalgas, de forma a incrementar seu crescimento. Este potencial de reaproveitamento pode ser incorporado às outras receitas, como comercialização dos biocombustíveis, dos subprodutos da biomassa e da biodigestão.

O modelo da cadeia produtiva proposta por Azevedo *et al.* (2008), baseia-se no encadeamento dos setores responsáveis por cada etapa do processo (Figura 1). Esta configuração pressupõe eficácia do

Tabela 1. Espécies de microalgas promissoras à produção de biodiesel (TAKAGI *et al.*, 2006).

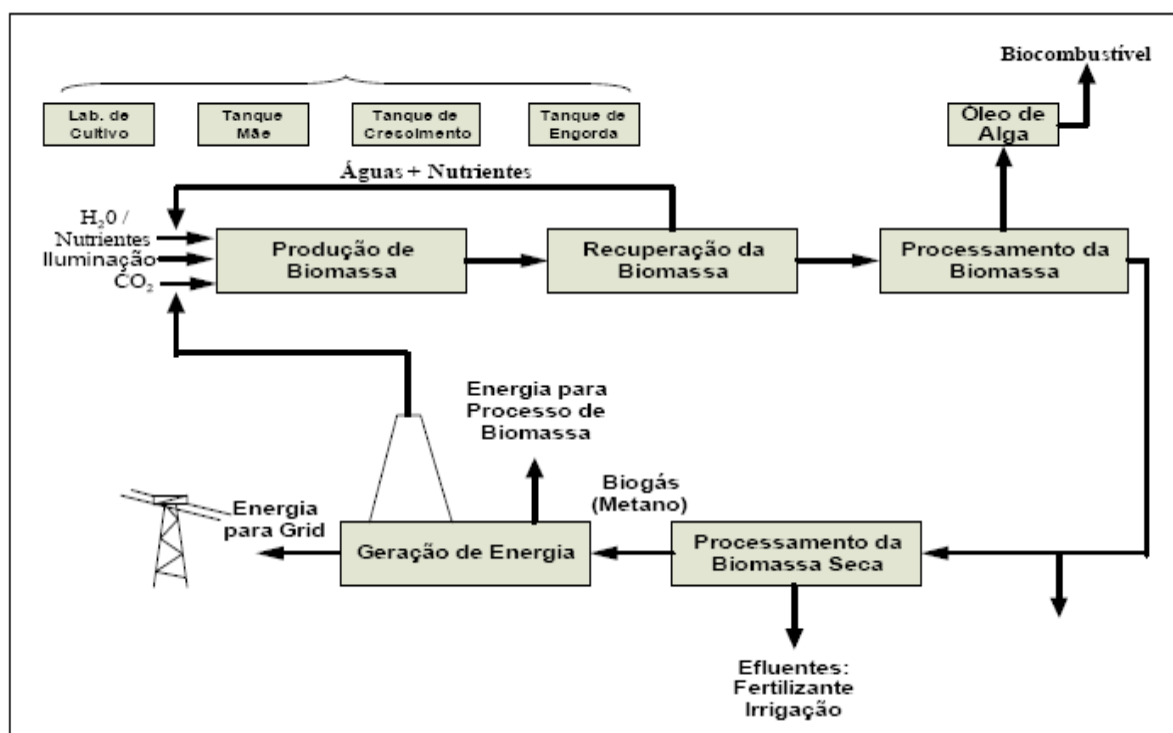
Teor de óleo de espécies selecionadas	
Espécies	Volume de óleo % massa seca
<i>Ankistrodesmus</i> TR-87	28 – 40
<i>Botryococcus Braunii</i>	29 – 75
<i>Chlorella</i> sp.	29
<i>Chlorella protothecoides</i> (autotrófica / heterotrófica)	15 -55
<i>Cyclotella</i> DI-35	42
<i>Dunallella tertholecta</i>	36 – 42
<i>Hantzschia</i> DI-160	66
<i>Isochrysis</i> sp.	7 – 33
<i>Nannociors</i>	31 (6 -63)
<i>Nannochicropsis</i>	46 (31 – 68)
<i>Nitzschia</i> TR-114	28 – 50
<i>Phaeodactylum tricomutum</i>	45
<i>Scenedesmus</i> TR-84	33 (9 – 59)
<i>Sticnococcus</i>	31
<i>Tetraseimis suecica</i>	15 – 32
<i>Thaiassiosira pseudonana</i>	21 – 31

balanço energético, reciclagem contínua dos meios de cultura, escoamento da produção e aproveitamento do metano como fonte para produção de energia elétrica juntamente com os resíduos de biomassa.

A eficiência de conversão da energia solar em energia química na maioria das espécies vegetais é baixa, sendo a cana-de-açúcar a que apresenta maior eficiência de conversão (CANTRELL, 2008). É relevante a diferença da produção de biodiesel a partir das microalgas em relação às

outras plantas, tal como está mostrado na Tabela 2.

O óleo das microalgas deve, no entanto, passar por um processo específico de conversão para cada tipo de biocombustível pretendido. Para a produção comercial é preciso viabilizar o cultivo em larga escala de espécies de microalgas que acumulem o máximo de lipídios. Por meio do manejo das condições de cultivo (nutrientes, por exemplo), diversas espécies podem ser induzidas a sintetizar e acumular altas concentrações das biomoléculas



Fonte: AZEVEDO *et al.*, (2008).

Figura 1. Esquema simplificado do cultivo de microalga e a reciclagem e uso de subprodutos.

Tabela 2. Exemplos de produção de biodiesel utilizando-se biomassas diversas (MAYFIELD, 2008)

Comparação entre eficiências de colheitas			
Fonte de Planta	Biodiesel (L ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Área requerida para equiparar atual demanda global de óleo (milhões hectares)	Área requerida como percentagem de grandeza de terra global
Soja	446	10932	72,9
Colza	1190	4097	27,3
Mostarda	1300	3750	25
<i>Jatropha curcas</i>	1892	2577	17,2
Óleo de palma	5950	819	5,5
Alga	45000	108	0,7

de interesse para a produção de cada combustível pretendido. Para a produção de biocombustíveis, o lipídio de interesse corresponde ao triacilglicerol ou triacilglicerídeo, um tri-éster oriundo da combinação do glicerol com ácidos graxos (ácidos carboxílicos de longa cadeia alquílica), tais como palmítico, oleico e alfa-linolênico (OHSE *et al.*, 2007).

Assim como as plantas, as microalgas requerem três componentes para crescer: luz, CO₂ e água. A fotossíntese é um processo bioquímico por meio do qual as plantas, as microalgas e alguns tipos de bactérias convertem a energia fornecida pela luz solar em energia química. Esta energia é utilizada em reações que levam à formação dos açúcares ou à fixação do nitrogênio nos aminoácidos (os blocos fundamentais para a síntese das proteínas) (HOEK *et al.*, 1995; RAVEN *et al.*, 2001).

Estes organismos podem ser cultivados em diversos sistemas de produção, com seu volume variando desde poucos litros até bilhões deles. Os sistemas comumente empregados são pouco sofisticados, por ocorrerem a céu aberto, sob condições naturais de iluminação e temperatura, e com baixo ou nenhum controle sobre essas variáveis ambientais (MOLINA GRIMA, 2003). Encontrar espécies de microalgas aptas para crescerem não é tarefa muito difícil, entretanto, cultivar espécies específicas de microalgas para a produção de biodiesel não é algo fácil, já que elas possuem características igualmente específicas e exigem muitos cuidados especiais, como por exemplo, evitar a contaminação por espécies de microalgas indesejáveis que estejam presentes no meio de cultivo, já que as microalgas necessitam de luz, CO₂ e água para o seu crescimento e elas podem ser cultivadas em reservatórios abertos.

O principal problema no cultivo de microalgas em sistemas abertos é que as espécies com conteúdo mais elevado de óleo não são necessariamente as mais rápidas para se reproduzir. E exatamente por estes sistemas serem abertos, elas se tornam muito mais vulneráveis à contaminação por outras espécies de microalgas e bactérias, com a possível exceção da *spirulina* (que cresce em um meio agressivo e sob pH extremamente elevado, eliminando, desse modo, a possibilidade da contaminação por outras espécies) (VOLKMANN *et al.*, 2008; WELLINGER, 2009).

Por esta razão, o número de espécies que têm sido cultivadas com sucesso, para dada finalidade, em um sistema aberto, é relativamente pequeno. Além disso, em sistemas abertos, há menor controle sobre a temperatura da água, a concentração de CO₂ e as condições de iluminação. Isto faz com que a estação de crescimento seja muito dependente da localização geográfica e, com exceção das áreas tropicais, seja limitada apenas aos meses mais quentes. Se por um lado têm-se essas desvantagens com utilização de sistemas “abertos”, por outro lado, tem-se como vantagem o seu baixo custo de implantação (BRENNAN & OWENDE, 2009). No sistema mais básico, há somente a necessidade de escavar uma trincheira ou a formação de pequena lagoa.

A configuração e as características operacionais dos tanques variam de acordo com o espaço, volume, aplicação, custos e localização. Por exemplo, na Figura 2, é mostrado um cultivo de microalgas para alimentação de larvas de caranguejo (larvicultura). Os tanques para produção de microalgas para larvicultura são de material plástico, circulares, com capacidade de 500 L e mantidos em ambiente fechado com iluminação artificial. A agitação é feita por meio de borbulhamento de ar atmosférico, o que é realizado por um compressor de ar (GIA, 2011).



Fonte: Soares (2010)

Figura 2. Cultivo de microalgas em tanques; produção de *Nannochloropsis oculata* em ambiente fechado.

Nas Figuras 3A e 3B estão outros exemplos de reservatórios, com configuração diferente das dos tanques apresentados na Figura 3. Esses reservatórios são retangulares, conectados entre si, mantidas em ambiente aberto com iluminação natural, e a agitação é feita por meio de um misturador de pás. A Earthrise Nutritionals, localizada no deserto de Sonora, no sudeste da Califórnia (EUA), possuindo 30 lagoas de 5.000 m² cada, e é, atualmente, a maior produtora de *Spirulina* sp. do mundo. A biomassa de *Spirulina* produzida é vendida para suplementação alimentar. A Cyanotech, localizada no Hawaii (EUA), produz biomassa de *Spirulina* e *Astaxantina*, que é um poderoso antioxidante derivado da biomassa da microalga *Haematococcus pluvialis* (SPOLAORE *et al.*, 2006; CYANOTECH, 2008; EARTHRISE, 2008).

Os tanques onde as microalgas são cultivadas são usualmente denominados de “tanque tipo pista de corrida” (raceway ponds) (Figura 4). Nelas, as microalgas, a água e os nutrientes circulam constantemente. A circulação e a agitação são realizadas por meio de rodas de pás que garantem a mistura e a suspensão das microalgas na água. O nível da água dos tanques é mantido em, no máximo, 30 cm, uma vez que em profundidades

superiores a luz não incide nas células de forma adequada. A operação dos tanques é realizada de forma contínua, com o CO₂ e os nutrientes sendo constantemente fornecidos, enquanto a água rica em microalgas é removida no lado oposto da estrutura (BRENNAN & OWENDE, 2009).

Uma variação possível no sistema básico aberto é cobrir a superfície dos reservatórios com uma estufa (Figura 5). Isto minimiza parte dos problemas associados a esse tipo de sistema, permitindo maior número de espécies cultivadas. É possível ainda, maior controle sobre as espécies cultivadas, podendo ser utilizada a estação de crescimento com a estrutura aquecida (aquecendo-a, pode-se produzir durante todo o ano). Nestes sistemas semi-abertos é possível aumentar a produtividade de algas introduzindo CO₂ no ambiente da estufa, tornando maior a velocidade de crescimento das microalgas (WELLINGER, 2009).

Com o objetivo de alcançar produtividade em biomassa algal mono específica, alguns cultivos têm sido desenvolvidos em um equipamento específico chamado fotobiorreator. Estes cultivos são realizados em sistemas fechados construídos com tubos de plástico, vidro ou policarbonato (Figura 6A, 6B, 6C).

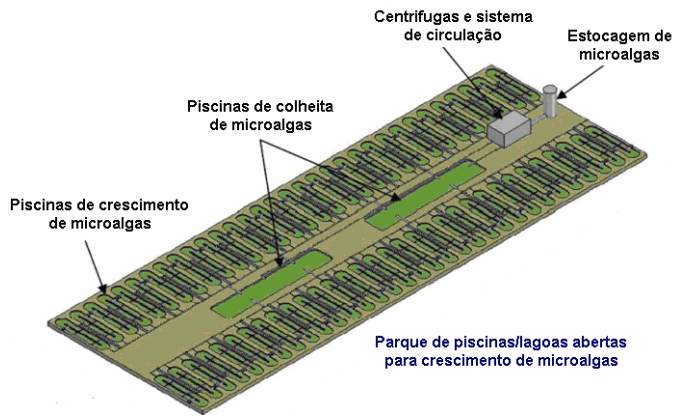


B

A

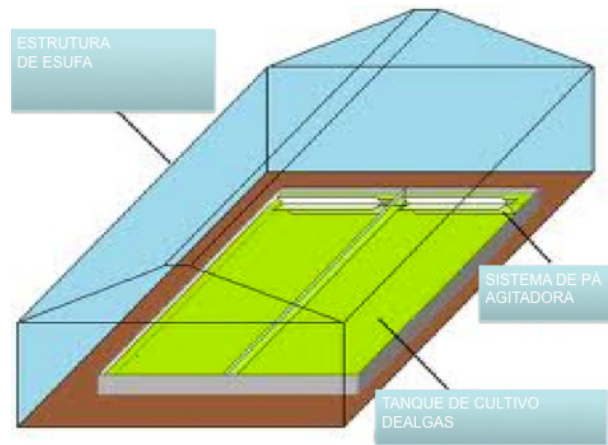
Fonte: (A) EARTHRISE; (B) CYANOTECH; (2008)

Figura 3. (A) Produção de *Spirulina* sp. na Califórnia (EUA); (B) Produção de *Spirulina* sp. e *Haematococcus pluvialis* no Hawaii (EUA).



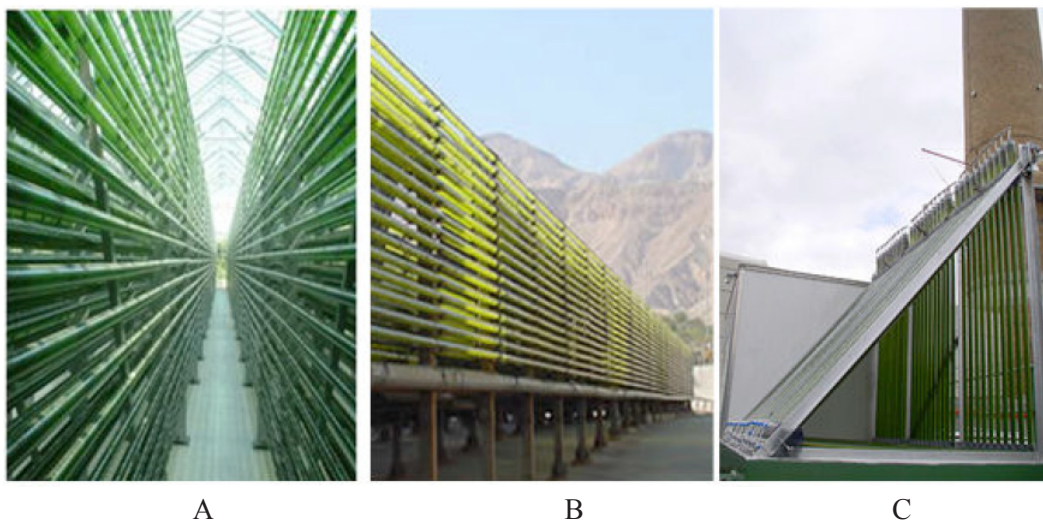
Fonte: PÉREZ (2007).

Figura 4. Parque de reservatórios abertas do tipo “pista de corrida” (raceway ponds).



Fonte: MELO (2010).

Figura 5. Esquema de produção em tanque coberto.



Fonte: (A) PULZ E GROSS (2004); (B) ALGATECH (2008); (C) TECHNOLOGY (2008).

Figura 6. Cultivo de microalgas em fotobiorreatores; (A) Produção de Chlorella em fotobiorreator em casa de vegetação na Alemanha; (B) Cultivo em fotobiorreator industrial ao ar livre em Israel; (C) Cultivo experimental em fotobiorreator no MIT.

Um fotobioreator consiste basicamente em um bioreator que incorpora algum tipo de fonte de luz. O fotobioreator é, geralmente, o termo mais empregado para definir um sistema fechado, ao contrário de um tanque aberto. Um tanque coberto com uma estufa também poderia ser considerado um fotobioreator. Dado que estes sistemas são fechados, é necessário introduzir as fontes necessárias para o crescimento que as microalgas necessitam: CO_2 , água, luz e nutrientes (WELLINGER, 2009).

Nos fotobioreatores, é possível controlar condições de cultivo como quantidade dos nutrientes, temperatura, iluminação, pH, dentre outros. Isto implica em elevada produtividade, viabilizando assim, a obtenção de produções comerciais (BRENNAN & OWENDE, 2009).

Os custos de ajuste e operação de um fotobioreator são mais elevados do que os de tanques abertos, mas a eficiência e os rendimentos em óleo são significativamente maiores. Assim, o impacto do custo inicial pode ser amortizado, em médio ou longo prazo, com o funcionamento do sistema (MOLINA GRIMA, 2003).

O fotobioreator pode ser operado para recolher as microalgas produzidas de forma contínua ou em batelada. Um fotobioreator operado, dessa segunda forma, é carregado, inicialmente, com nutrientes e com um pequeno volume concentrado de microalgas (inóculo), que geralmente corresponde a 10% do volume do fotobioreator. Após a adição do inóculo e dos nutrientes, o fotobiorreator opera até o fim da batelada, quando é realizada, então, a colheita

das microalgas (Figura 7). Operando de forma contínua, a colheita de microalgas é realizada com uma frequência elevada, determinada pelas variáveis de operação do fotobioreator (WELLINGER, 2009).

A empresa GreenFuel Technologies, localizada em Cambridge, nos Estados Unidos, realizou testes de campo utilizando um fotobioreator que usa 13% dos gases de exaustão emitidos pela usina termelétrica (co-geração) do MIT para alimentar as microalgas (Figura 8). Um primeiro resultado foi a redução significativa da concentração do monóxido de carbono (CO) na exaustão, sendo esta da ordem de 82,3% em dias ensolarados e de 50,1% em dias nublados. O processo removeu também 85,9% de óxidos de nitrogênio (GREENFUEL, 2009).

Com utilização de tecnologia licenciada a partir de um projeto da NASA, a GreenFuel construiu fotobioreatores de forma triangular, usando tubos de policarbonato de 2 a 3 m de comprimento e de 10 a 20 cm de diâmetro. A hipotenusa deste triângulo foi posicionada na direção do sol.

Os gases são introduzidos na base do triângulo e ascendem em direção ao topo enquanto a suspensão (água, microalgas e nutrientes) circulou no sentido oposto. O uso dos tubos em que as microalgas cresceram superou a limitação usual da área útil da superfície dos reservatórios. Neste caso, a mistura no tubo, sob regime turbulento da suspensão de microalgas com o CO_2 e a velocidade na qual o líquido circulou, determinaram a taxa de crescimento das microalgas.



Fonte: Pérez (2007).

Figura 7. Colheita de microalgas produzidas no fotobioreator.

Para o emprego na elaboração de alimentos, bem como para a extração de alguma substância de interesse, é necessário primeiramente separar a biomassa do meio de cultura. O processo envolve uma ou mais operações de separação sólido-líquido, como floculação, centrifugação e filtração, por exemplo (PÉREZ, 2007). Em seguida, a biomassa segue para a operação de secagem que é comumente utilizada para prolongar a vida útil das biomassas. Essa etapa pode constituir até 30% do custo total de produção (DUARTE, 2009). Para tanto, podem ser empregadas diversas técnicas como *spray dryer*, liofilização, secagem ao sol e secagem convectiva. Para a extração dos compostos, as células das microalgas são quebradas, podendo-se empregar métodos de homogeneização, ultra-som, choque osmótico, solventes, enzimas, dentre outros. A extração do óleo das microalgas é um tópico polêmico, atualmente debatido em virtude de seu alto custo e pode determinar a sustentabilidade do biodiesel de microalgas (PÉREZ, 2007). De acordo

com este autor, há 4 métodos bem conhecidos para extrair o óleo das sementes oleaginosas e estes métodos também podem ser aplicados às microalgas:

1. Extração por solventes: o óleo de microalgas pode ser extraído usando produtos químicos como benzeno e o éter etílico; entretanto, um produto químico popular para a extração por solvente é o n-hexano, que é relativamente barato, apesar de ser um produto não renovável e tóxico. A desvantagem do uso de solventes para a extração do óleo são os perigos envolvidos na manipulação dos produtos químicos desta classe. O benzeno é um produto químico cancerígeno, tendo sido banido pelo Ministério do Trabalho do Brasil. A extração com hexano pode ser usado isoladamente ou em conjunto com outros solventes como etanol que extrai ácidos graxos purificados. Deve-se conhecer a relação exata de etanol a ser utilizado, uma vez, que este solvente extrai alguns contaminantes celulares, tais como açúcares, aminoácidos, sais



Fonte: TECHNOLOGY (2008).

Figura 8. Cultivo experimental em fotobiorreator no MIT.

hidrofóbicos e pigmentos (RICHMOND, 2004). Depois que o óleo foi extraído, a polpa restante pode ser misturada com ciclohexano para extrair o óleo remanescente. O óleo dissolve-se em ciclohexano, e a polpa é filtrada da solução. O óleo e o ciclohexano são separados por destilação. Estes 2 estágios (prensagem e extração por solvente) podem extrair mais de 95%, em massa, do total de óleo contido nas microalgas (HOSSAIN, 2008).

2. Extração fluída supercrítica: este método pode extrair quase 100% de todo o óleo. Entretanto, necessita-se de equipamento especial para o confinamento e a aplicação de pressão. Neste processo, é utilizado CO₂ liquefeito sob pressão e aquecido na condição supercrítica. Neste ponto, o fluido apresenta propriedade de extração elevada para a extração do óleo (CRAVOTTO, 2008).

3. Extração enzimática: A extração enzimática de óleos vegetais, principalmente para aumentar o rendimento de obtenção de óleo, fornece resultados promissores quando aplicada simultaneamente com processos puramente mecânicos (GOMES, 2002). Trabalhos de utilização de enzimas no processamento de oleaginosas têm sido publicados (SHANKAR *et al.*, 1997; HANMOUNGJAI *et al.*, 2001). A partir das observações feitas sobre a acumulação do óleo nos espaços intracelulares em células vegetais, os pesquisadores têm estudado substâncias capazes de afetar a estrutura das células com objetivo de melhorar a extração de óleo, mas a aplicação de um tratamento enzimático requer uma estratégia específica para cada caso. Esse processo usa enzimas para degradar a parede celular da microalga, facilitando o fracionamento do óleo. O processo possui maior custo quando comparado com a extração com hexano (FUA *et al.*, 2010).

4. Choque osmótico: é uma redução repentina na pressão osmótica, que pode causar a ruptura das paredes das células das microalgas em solução. O choque osmótico é usado para liberar componentes celulares, tais como o óleo. No entanto, para obtenção de melhores resultados na extração de óleo, faz-se necessário incluir uma etapa posterior com uso de solvente (MOHEIMANI, 2005).

5. Extração Mecânica

A extração mecânica da biomassa de microalgas minimiza a contaminação a partir de fontes externas, enquanto mantém a integridade química

da substância originalmente contida dentro das células (GREENWELL *et al.*, 2010). A biomassa de microalgas (ou, mais comumente, sementes ou oleaginosas) é submetida à alta pressão, necessária para o rompimento da parede celular e conseqüente liberação do óleo intracelular. O desempenho do processo depende do grau de células desintegradas, dentre as variáveis mais importantes estão, a eficiência do contato entre a biomassa e os grânulos, o tamanho e a compacidade dos grânulos e da resistência das paredes celulares das microalgas dentre outros (DOUCHA & LIVANSKÝ, 2008). A operação mecânica é geralmente utilizada em conjunto com a extração com solventes, e pode ser mais eficaz e econômica quanto maior for a concentração da biomassa microalgal e quando o óleo extraído for facilmente separado. Normalmente, este tipo de rompimento celular se torna mais eficiente quando a concentração de biomassa está em torno de 100 a 200 g L⁻¹ (GREENWELL *et al.*, 2010).

O biodiesel das microalgas não é significativamente diferente do biodiesel produzido dos óleos de plantas oleaginosas. Todo biodiesel é produzido a partir dos triglicerídeos das oleaginosas ou microalgas. Entretanto, algumas diferenças podem existir (GOUVEIA, 2009):

- As microalgas produzem muitos ácidos graxos poli-insaturados, que podem apresentar problemas da estabilidade, já que níveis elevados desses ácidos graxos tendem a diminuir a estabilidade do biodiesel. Porém, os poli-insaturados também têm o ponto de congelamento mais baixo que os mono-insaturado ou saturados. Assim, o biodiesel de microalgas deverá ter propriedades mais adequadas ao frio do que o biodiesel de oleaginosas, que atualmente tem como uma das principais desvantagens.

- O biodiesel de microalgas é praticamente isento de conteúdo de enxofre, isso reduz o desgaste do sistema de combustível e aumenta a vida útil dos equipamentos de injeção de combustível em relação do diesel comum. O biodiesel de algas possui maiores propriedades solvente comparado o diesel (MATA *et al.*, 2010).

- O biodiesel de microalgas possui densidade entre 5 a 8% inferior ao diesel, porém, sua maior eficiência de combustão e melhor capacidade de

lubrificação pode ser parcialmente compensada. A eficiência global do combustível torna-se apenas cerca de 2% menor comparada ao diesel comum (MIAO & WU, 2006).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cultivo de microalgas voltado para a produção de biocombustíveis é um assunto inovador e sua evolução está à disposição de grandes empresas produtoras de combustíveis, além de órgãos de pesquisa, universidades e demais entidades. Apesar de ser uma atividade consideravelmente nova, ela vem ganhando espaço com estudos, pesquisas e investimentos.

As microalgas são utilizadas em diversos setores industriais, como matéria prima para uma vasta gama de produtos e co-produtos. Porém, sua viabilidade para combustível precisa de investimentos. O aprimoramento nos moldes de cultivo e redução nos custos de produção são algumas alternativas. O biodiesel de microalgas exige cultivos em grande escala e sistemas de captação, desafios que podem reduzir o custo de produção por unidade de área.

As condições de crescimento das microalgas em escalas maiores precisam de ambiente cuidadosamente controlado o que onera o custo de produção. O processo pode se tornar mais econômico se combinados com o seqüestro de CO₂, com utilização de águas residuárias como meio de cultivo ou com processos de biorremediação e, ainda, com a geração de co-produtos com alto valor agregado. Como pigmentos e proteínas, que podem ser purificados a partir da torta gerada na extração do óleo.

O biodiesel produzido a partir das microalgas não possui diferenças significativas em relação ao produto obtido por meio de plantas oleaginosas, pois é produzido a partir dos triglicerídeos, presentes no óleo extraído, seja de plantas ou microalgas. Para a produção do biodiesel, realiza-se o processo de transesterificação, a exemplo do que é realizada com as oleaginosas.

As microalgas produzem uma grande quantidade de ácidos graxos poliinsaturados, que podem apresentar um problema de estabilidade do biodiesel de microalgas. Todavia, os poli-

insaturados também têm pontos de fusão muito mais baixos do que mono-insaturado ou saturados. Assim, o biodiesel de microalgas deve apresentar melhor propriedades de combustão no frio do que muitas outras matérias-primas vegetais potencialmente estudadas para produção de biodiesel, uma vez que uma das desvantagens que biodiesel tem apresentado é o seu desempenho menor em temperaturas baixas comparadas com diesel comum.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGATECH. Disponível em: <<http://www.algotech.com/>>. Acesso em 20/11/2010.

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

AZEVEDO, M.A.; D'AVIGNON, A.; ARAÚJO, M.A.V.; GODOY, S.C. MICROALGAS: Fonte de Energia para o Brasil? - XIICBE - Congresso Brasileiro de Energia, 12. **Anais... PPE - Programa de Planejamento Energético – COPPE**. 2008.

BRENNAN L., OWENDE, P. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n.805, p.01–20. 2009.

BENEMANN, J.R., **Overview: Algae Oil to Biofuels**, National Renewable Energy Laboratory - Air Force Office of Scientific Research Workshop on Algal Oil for Jet Fuel Production - February, 2008.

BROWN, L.M. & ZEILER, K.G. Aquatic biomass and carbon dioxide trapping. **Energy Conversion and Management**, n.34, p.1005-10013, 1993.

CANTRELL K.B., Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. **Bioresource Technology**, n.99, v.17, p.7941–53, 2008.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, n.25, p.294-306, 2007.
CRAVOTTO G, BOFFA L, MANTEGNA S,

- PEREGOP, AVOGADROM, CINTAS P. Improved extraction of vegetable oils under high-intensity ultrasound and/or microwaves. **Ultrasonics Sonochemistry**, n.15, v.5, p.898–902, 2008.
- CYANOTECH. Disponível em: < <http://www.cyanotech.com/company.html>>. Acesso em 20/12/2010.
- DOUCHA, J., LIVANSKÝ, K., Influence of processing parameters on disintegration of *Chlorella* cells in various types of homogenizers. **Applied Microbiology and Biotechnology**, n.81, p.431–440, 2008.
- DUARTE, J.H.; ÁVILA, A.L.; OLIVEIRA, E.G., PINTO, L.A.A. Avaliação da cinética de secagem e reidratação da microalga *Spirulina platensis*. In: CONGRESSO COBEQIC, 2009, Uberlândia. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, Uberlândia-MG, 2009. Disponível em: <<http://www.cobeqic2009.feq.ufu.br/uploads/media/82621341.pdf>>. Acesso em: 26/10/2012.
- EARTHRISE. Disponível em: <<http://www.earthrise.com/home.asp>>. Acesso em: 20/12/2010.
- EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (EEA). **Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2007**: tracking progress towards Kyoto targets. European Environmental Agency (EEA) Report N85. Copenhagen, Denmark; 2007.
- FAO. Renewable biological system for alternative sustainable energy production. Serie Title: **FAO Agricultural Services Bulletins** 128, 1997.
- FUA, C.C.; HUNGB, T.C.; CHENA, J.Y.; SUC, C.H.; WU, W.T.; Hydrolysis of microalgae cell walls for production of reducing sugar and lipid extraction, **Bioresource Technology**, n.101, p.22–29, 2010.
- GIA. **Aqüicultura no brasil**: o desafio é crescer. Disponível em: <<http://www.gia.org.br>>. Acesso em 26/10/2012.
- GOMES, C. **Extração aquosa enzimática de óleo de soja**. Embrapa. Disponível em: <www.cnpso.embrapa.br/imprcon.htm> Acesso em: 26/10/2012.
- GOUVEIA L, OLIVEIRA A.C. Microalgae as a raw material for biofuels production. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, n.36. p.269–74, 2009.
- Greenfuel Technologies Corp. Disp. em: <http://www.greenfuelonline.com/index.html>. Acesso em 03/09/2009.
- GREENWELL, H.C., LAURENS, L.M.L., SHIELDS, R.J., LOVITT, R.W., FLYNN, K.J., Placing microalgae on the biofuels priority list: A review of the technological challenges. **Journal of the Royal Society Interface**. n.7, p.703–726, 2010.
- HANMOUNGJAI, PYLE, D.L.; NIRAJAN, K. Enzymatic process for extracting oil and protein from rice bran. **Journal of AOCS**, v.78, n.8, p.817–821, 2001.
- HOEK, V.D.; MANN, D.G.; JAHNS, H.M. **Algae: an introduction to phycology**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 623p. 1995.
- HOSSAIN, S.; SALLEH, A.; BOYCE, A. N., Partha chowdhury and Mohd Naquiuddin Biodiesel Fuel Production from Algae as Renewable Energy, American. **Journal of Biochemistry and Biotechnology**, n.4, v.3, p.250–254, 2008.
- ILLMAN, A.M.; SCRAGG, A.H.; SHALES, S.W. Increase in *Chlorella* strains calorific values when grow in low nitrogen medium. **Enzyme and Microbial Technology**, v.27, p.631–635, 2000.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2007**. China and India Insights, Paris, France; 2007.
- KAJIWARA S., YAMADA H., NARUMASA O., Design of the bioreactor for carbon dioxide fixation by *Synechococcus* PCC7942, **Energy Conversion and Management**, n.38, p.529–532, 1997.

- MATA, T.M.; MARTINS, A.A. CAETANO, N.S., Microalgae for biodiesel production and other applications: **A review - Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, p.217–232, 2009.
- MAYFIELD, S., **Algal Model, National Renewable Energy Laboratory** - Air Force Office of Scientific Research Workshop on Algal Oil for Jet Fuel Production - February, 2008.
- MATA, T.M., MARTINS, A.A., CAETANO, N.S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, n.14, p.217-232, 2010.
- MELO, M.A.V. de, **Perspectivas sobre o uso de microalgas como fonte de energia renovável e mitigação do dióxido de Carbono**. 2010. 77p. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Produção. Universidade Hanhembí Morumbi, São Paulo, SP. 2010;
- MIAO, X; WU, Q. Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. **Bioresource Technology** , n.97, v.6, p. 841–846, 2006.
- MOHEIMANI, N.R. **The culture of Coccolithophorid Algae for carbon dioxide bioremediation**. 2005. 252f. PhD thesis (Doctor of Philosophy) - Murdoch University, Perth, Australia, 2005.
- MOLINA-GRIMA, E. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. **Biotechnology Advances**, v.20, p.491-515, 2003.
- MOLINA-GRIMA, E.; ACIÉN, F.F.G.; GARCIA CAMACHO, F.; CHRISTI, Y. PhotobioreactorsÇ light regime, mass transfer and scaleup. **Journal of Biotechnology**, n.70, p.231-247, 1999.
- NOGUEIRA, N.S. **Análise Delphi e SWOT das Matérias-primas de Produção de Biodiesel: Soja, Mamona e Microalgas**. 2010. 177p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2010.
- OOHSE, S.; DERNER, R.B.; OZERIO, R.A.; CUNHA, P.C.R.; CLAUDIA, P.L. SANTOS, M.E.; MENDES, L.B.B. Revisão: seqüestro de carbono realizado por microalgas e florestas e a capacidade de produção de lipídios pelas microalgas. **INSULA**, Florianópolis, n.36, p.39-74, 2007.
- PÉREZ, H.E.B. **Biodiesel de Microalgas**. Disponível em: <www.energiaverde.com.br>; Acesso em: 10/01 2011.
- PIRT, S.J. The thermodynamic efficiency (quantum demand) and dynamics of photosynthetic growth. **New Phytologist**, n.102, p.3-37, 1986.
- PULZ, O.; GROSS, W. Valuable products from biotechnology of microalgae. **Applied Microbiology Biotechnology**, v.65, p.635-648, 2004.
- RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. **Biologia vegetal**. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 906 p.2001.
- RENEWABLE FUEL AGENCY (RFA). The Gallagher review of the indirect effects of biofuels production; 2008.
- RICHMOND A. **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. Blackwell Science Ltd; 2004.
- SOARES, D. **Avaliação do crescimento celular e da produtividade de lipídeos de microalgas marinhas em diferentes regimes de cultivo**. 2010. 107p.. Dissertação (Mestrado Ciências - Bioquímica). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 2010.
- SANCHES MIRÓN, A.; CERÓN GARCIA, M-C; CONTRERAS GÓMEZ, A.; GARCIA CAMACHO, F.; MOLINA GRIMA, E.; CHRISTI, Y. Shear stress tolerante and biochemical characterization of *Phaeodactylum tricoratum* in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors. **Biochemical Engineering Journal**, n.16, p.287-297, 2003.
- SCHENK P., Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. **Bio**

Energy Research, n.1, v.1, p.20–43, 2008.

SHANKAR, D.; AGRAWAL, Y.C.; SARKAR, B.C.; SINEH, B . P . N . Enzymatic hydrolysis in conjunction with conventional pretreatments to soybean for enhanced oil availability and recovery. **Journal of AOCS**, v.74, n.12, p.1543-1547, 1997.

SHEEHAN, J.; DUNAHAY, T.; BNEMANN, J.; ROESSLER, P.A. **A look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program - Biodiesel from Algae**, Colorado, 1998;

SINGH, J.; GU, S. Commercialization potential of microalgae for biofuels production, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n.14, p.2596–2610, 2010.

SPOLAORE, P. ; JOANNIS-CASSAN, C. ; DURAN, E. ; ISAMBERT, A. Commercial applications of microalgae. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, n.101, p.87-96, 2006.

TAKAGI, M.; KARSENKO, YOSHIDA, T. Effect of salt concentration on intracellular accumulation of lipids and triacylglycerid in marine microalgae. *Dunaliella* cells. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v.101, n.3, p.223-226, 2006.

TECHNOLOGY. **A Glimpse of The MIT's Algae Photo Bioreactor**. Disponível em: <[http://www.technology.am/mit-algae-](http://www.technology.am/mit-algae-photobioreactor-112420.html)

[photobioreactor-112420.html](http://www.technology.am/mit-algae-photobioreactor-112420.html)>. Acesso em 20/11/2010.

TEIXEIRA C.M.; MORALES M.E. Microalga como matéria-prima para a produção de biodiesel. **Biodiesel o Novo combustível do Brasil**, n.6, p.91–6, 2007.

VICHEZ, C.; GARBAYO, I.; LOBATO M. V.; VEGA, J. M. – Microalgae-mediated chemicals production and waste removal. **Enzyme Microbial Technology**, n.20, p.562-72, 1997.

VOLKMANN, H.; IMIANOVSKY, U.; OLIVEIRA, J.L.B.; SANT'ANNA, E.S. Cultivation Of *Arthrospira* (*Spirulina*) *Platensis* In Desalinator Wastewater And Salinated Synthetic Medium: Protein Content And Amino-Acid Profile - **Brazilian Journal of Microbiology**, v.39, p.98-101, 2008.

WELLINGER, A. Algal Biomass Does it save the world? Short reflections - IEA Bioenergy: **An international Collaboration in Bioenergy**. Abril, 2009. Disponível em: <http://www.iea-biogas.net/_download/publi-task37/algaebiomass8-09.pdf> Acesso em: 26/10/2012.

YUN, Y.S.; LEE, S.B.; PARK, J.M.; LEE, C.I.; YANG, J.W. Carbon dioxide fixation by algal cultivation using wastewater nutrients. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, n. 69, p.451-455, 1997.