

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**PÂMELLA CROCCO**

**CAPTURA DE CARBONO E MICROALGAS: UMA VISÃO APLICADA**

**PONTAL DO PARANÁ**

**2009**

PÂMELLA CROCCO

CAPTURA DE CARBONO E MICROALGAS: UMA VISÃO APLICADA

Monografia apresentada como requisito parcial à conclusão do Curso de Graduação em Oceanografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sônia Maria Flores Giancesella.

PONTAL DO PARANÁ

2009

À minha família, pelo apoio  
incondicional.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Mariane e Edson, a quem devo tudo o que conquistei até hoje, pelos ensinamentos, pelo amor, pelo apoio absoluto em todas as etapas de minha vida e, principalmente, pelo grande exemplo que são.

À minha avó Odila, que sempre acreditou em mim, sempre se preocupou e foi companheira em inúmeras situações. Obrigada pelo carinho e por saber que sempre posso contar com ele.

Ao meu irmão Adriano pela amizade e pelos incontáveis momentos de descontração, com ele não tem “tempo ruim”!

A Mônica e ao Carlos, que já fazem parte da família. Vocês têm uma participação mais do que especial em minha vida.

Ao Marama, com quem divido cada detalhe de minha vida há quase cinco anos, pela paciência, pelo amor, pelo carinho, enfim, por tê-lo ao meu lado em todos os momentos. Amo você!

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sônia Maria Flores Giancesella, pela orientação na realização deste trabalho.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Hedda Elisabeth Kolm e à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Maria Pereira Neto pela participação em minha banca.

Ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

A todos os professores e funcionários do Centro de Estudos do Mar/UFPR.

À minha família de Pontal, Lizi e Magrão, com quem dei muitas risadas e sempre pude contar, ajudando-me sempre com assuntos acadêmicos e me recebendo com enorme carinho quando vou pra Pontal.

À Nati, a primeira pessoa que conheci na graduação, antes mesmo de chegar a Pontal, e com quem morei por vários anos. Uma amiga muito querida

e especial, com quem dividi grande parte das histórias que tenho pra contar de Pontal.

Ao Felipe, meu veterano querido, que me ajudou sempre que precisei, em vários momentos do desenvolvimento deste trabalho. Obrigada pela amizade.

Aos meus amigos e companheiros de graduação. Foi muito bom passar esse tempo com vocês!

E a todos que, de alguma forma, participaram de minha trajetória até aqui.

Obrigada!

## RESUMO

Com o aumento dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera, faz-se necessário o desenvolvimento de processos que reduzam os níveis do gás no ambiente. Devido ao fato das microalgas apresentarem, entre outras vantagens, altas taxas de fixação de carbono, o cultivo destes organismos, voltado para a produção de compostos de interesse e biocombustíveis, constitui alternativa importante na captura do CO<sub>2</sub>, principalmente pelo fato dos biocombustíveis serem renováveis, ao contrário dos combustíveis fósseis. No entanto, os cultivos de microalgas em larga escala ainda são caros e precisam ter ampliada sua eficiência de produção, apesar de já existirem empresas que estão iniciando a produção de biocombustíveis a partir de microalgas. Desta forma, é importante investir em pesquisas para produzir um produto de valor comercial agregado à espécie cultivada, tornando a produção de microalgas mais rentável e elevando a absorção de carbono. O custo do CO<sub>2</sub> desempenha um papel fundamental na economia do cultivo de microalgas, assim sendo, o desenvolvimento de modelos econômicos para a captura de gases de combustão é fator importante na obtenção de custos viáveis para a produção de lipídios, voltados para a indústria de biodiesel. Neste contexto, o aproveitamento do CO<sub>2</sub> pelas microalgas, aliado à produção de biocombustíveis e compostos de interesse, constitui uma importante alternativa de geração de energia “limpa” para os dias atuais. O presente estudo tem como objetivo geral realizar levantamento bibliográfico sobre metodologias de seqüestro de carbono com foco em microalgas. São relatados diferentes métodos que podem tornar mais eficiente o aproveitamento do CO<sub>2</sub> pelas microalgas. Distintos métodos de cultivo são apresentados, bem como modelos de fotobiorreatores otimizados, com diferentes configurações e modos operacionais, para facilitar e viabilizar o cultivo de microalgas em larga escala. Além disso, meios de cultura alternativos e a sugestão de uma metodologia integrada também foram descritos, a fim de, entre outros fatores, reduzir os custos de produção e remediar ambientes degradados. Através dessa metodologia integrada de produção de microalgas, são destacadas as amplas possibilidades de aplicações destes organismos, aplicações estas que, do ponto de vista biotecnológico, não são muito estudadas, representando grande oportunidade para novas descobertas.

Palavras-chave: microalgas, captura de CO<sub>2</sub>, biocombustíveis, fotobiorreatores.

## ABSTRACT

With increasing levels of carbon dioxide in the atmosphere it is necessary to develop procedures that reduce the levels of gas in the environment. Because of algae present among other advantages, high rates of carbon capture, the cultivation of these organisms focusing on the production of compounds of interest and biofuels, is an alternative role in the capture of CO<sub>2</sub>, mainly because biofuels are biocombustíveis serem renewable, unlike fossil fuels. However, the cultivation of microalgae on a large scale are still expensive and need to have expanded their production efficiency, although there are already companies that are starting production of biofuels from microalgae. Thus, it is important to invest in research to produce a value-added to the cultivated species, making the microalgae production more profitable and increasing the absorption of carbon. The CO<sub>2</sub> cost plays a key role in the economy of cultivation of microalgae, thus the development of economic models for the capture of flue gas is an important factor in obtaining feasible cost for the production of lipids, facing the biodiesel industry. In this context, the use of CO<sub>2</sub> by the algae, together with the production of biofuels and compound interest, is an important alternative source of clean energy for today. This study aims to carry out general literature on methodologies for carbon capture with a focus on microalgae. They reported different methods that can make more efficient use of CO<sub>2</sub> for microalgae. Different methods of cultivation are presented, and models photobioreactor optimized with different configurations and operating modes, to facilitate and enable the cultivation of microalgae on a large scale. In addition, culture media and the alternative suggestion of an integrated approach were also described in order to, among other things, reduce costs of production and overcome degraded environments. Through this integrated approach to production of microalgae, it is highlighted the wide possibilities of applications of these organisms these applications that in terms of biotechnology are not widely studied, representing great opportunity for new discoveries.

Key-words: microalgae, CO<sub>2</sub> capture, biofuels, photobioreactor.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1. BIOMASSA MICROALGAL EXTRAÍDA DA CULTURA LÍQUIDA POR FILTRAÇÃO MOVENDO-SE AO LONGO DE UMA ESTEIRA NA “CYANOTECH CORPORATION”, HAWAÍ, EUA. ....  | 19 |
| FIGURA 2. SISTEMA ABERTO DE CULTIVO DE MICROALGAS.....   | 25 |
| FIGURA 3. FOTOBIORREATOR TUBULAR. ....   | 28 |
| FIGURA 4. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TAXA DE CRESCIMENTO ALGAL EM CULTIVO ESTANQUE (LINHA SÓLIDA) E CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES (LINHA TRACEJADA). ....   | 31 |
| FIGURA 5. FOTOGRAFIA TRANSVERSAL DO FOTOBIORREATOR INOVADOR DE ESCALA PILOTO. ....   | 38 |
| FIGURA 6. APARATO EXPERIMENTAL (A E B): (1) REATOR; (2) AMOSTRA DE ENTRADA DO GÁS; (3) AMOSTRA DE SAÍDA DO GÁS; (4) AMOSTRA DE LÍQUIDO. (C E D): (1) REATOR; (2) AMOSTRA DE ENTRADA DO GÁS; (3) AMOSTRA DE SAÍDA DO GÁS; (4) “DESUMIDIFICADOR” DE AR; (5) TANQUE DE EQUILÍBRIO; (6) BOMBA. (E E F): (1) REATOR; (2) AMOSTRA DE ENTRADA DO GÁS; (3) AMOSTRA DE SAÍDA DO GÁS; (4) “DESUMIDIFICADOR” DE AR; (5) REATOR; (6) AMOSTRA DE ENTRADA DO GÁS; (7) AMOSTRA DE SAÍDA DO GÁS. ....  | 40 |
| FIGURA 7. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA EXPERIMENTAL DE CULTURA COM <i>Chlorella vulgaris</i> . ....   | 42 |
| FIGURA 8. PROCESSOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA ALGAL.....  | 47 |
| FIGURA 9. VIAS METABÓLICAS COMERCIALMENTE IMPORTANTES EM MICROALGAS. ESSA REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA SIMPLIFICADA MOSTRA CAMINHOS CELULARES ENVOLVIDOS NA BIOSÍNTESE DE VÁRIOS PRODUTOS DERIVADOS DE MICROALGAS. EMBORA O CLOROPLASTO POSSA FUNCIONAR COMO UMA FÁBRICA DE PROTEÍNAS E PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO (LINHA SÓLIDA AZUL), O NÚCLEO TEM UM PAPEL FUNDAMENTAL NO CONTROLE METABÓLICO (LINHA PONTILHADA VERMELHA). AMBAS AS ORGANELAS CONTÊM GENOMAS INDIVIDUAIS, QUE OFERECEM A POSSIBILIDADE DE INCORPORAÇÃO DE TRANSGENES INDEPENDENTES (LINHAS TRACEJADAS AZUL E VERMELHA). .... | 49 |
| FIGURA 10. ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO INTEGRADO E MULTIDISCIPLINAR DE CAPTURA DE CO <sub>2</sub> E CONVERSÃO EM PRODUTOS INDUSTRIAIS ÚTEIS, QUE CRIEM RECEITAS ECONÔMICAS E AGREGUEM VALOR AO PROCESSO DE CAPTURA. ....  | 54 |
| FIGURA 11. APRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MECANISMO DE PRODUÇÃO DE H <sub>2</sub> POR BIOFOTÓLISE DE ALGAS VERDES. ELÉTRONS DA SEPARAÇÃO DA   |    |

ÁGUA NO FOTOSSISTEMA II SÃO TRANSPORTADOS ATRAVÉS DA CADEIA DE TRANSPORTE DE ELÉTRONS NAS MEMBRANAS TILACÓIDES UTILIZANDO A ENERGIA SOLAR. OS ELÉTRONS SÃO ENTÃO UTILIZADOS PELA ENZIMA HIDROGENASE PARA REDUZIR PRÓTONS A H<sub>2</sub>, QUE É LIBERADO DA CÉLULA. ESTA VÁLVULA DE SEGURANÇA EVITA DANO OXIDATIVO DA CÉLULA DURANTE CONDIÇÕES DE ESTRESSE, E PODE SER EXPLORADA COMO UMA FORMA DE CONVERTER ENERGIA SOLAR EM H<sub>2</sub>..... 56

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1. COMPARAÇÃO DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS ENTRE SISTEMAS ABERTOS E FECHADOS EM CULTIVOS DE MICROALGAS EM LARGA ESCALA. .... | 32 |
| TABELA 2. CONTEÚDO LIPÍDICO E PRODUTIVIDADE LIPÍDICA, DE BIOMASSA E DE BIOMASSA POR ÁREA EM DIFERENTES ESPÉCIES DE MICROALGAS. .... | 59 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....  | 12 |
| 1.1. PANORAMA DA UTILIZAÇÃO DE MICROALGAS .....   | 12 |
| 1.2. A IMPORTÂNCIA DO CARBONO.....  | 14 |
| 1.3. PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS A PARTIR DE MICROALGAS.....  | 16 |
| 2. JUSTIFICATIVA.....   | 21 |
| 3. OBJETIVOS.....   | 22 |
| 3.1. OBJETIVO GERAL.....  | 22 |
| 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....   | 22 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS.....  | 23 |
| 5. REVISÃO DA LITERATURA.....   | 24 |
| 5.1. SISTEMAS DE CULTIVOS DE MICROALGAS.....  | 24 |
| 5.1.1. Lagoas abertas .....   | 24 |
| 5.1.2. Fotobiorreatores fechados .....  | 27 |
| 5.1.3. Operação em modo estanque <i>versus</i> operação contínua .....  | 29 |
| 5.1.4. Sistema de cultivo integrado entre lagoas abertas e fotobiorreatores<br>fechados.....                                | 32 |
| 5.2. FOTOBIORREADORES.....  | 34 |
| 5.2.1. Escalas de cultivo e fotobiorreatores.....   | 35 |
| 5.2.2. Fotobiorreatores seqüenciais .....   | 38 |
| 5.2.3. Fotobiorreator de membrana.....  | 41 |
| 5.2.4. Estimativa imediata de cultivos de microalgas em fotobiorreatores, baseada<br>na medida de oxigênio dissolvido ..... | 43 |
| 5.3. MEIOS DE CULTURAS ALTERNATIVOS .....   | 45 |
| 5.4. LIQUEFAÇÃO TERMOQUÍMICA.....   | 46 |
| 5.5. DESENVOLVIMENTO DA BIOTECNOLOGIA PARA MANIPULAR OS<br>MICRORGANISMOS FOTOSSINTETIZANTES .....                          | 48 |
| 5.5.1. Proteína HLA3 .....  | 50 |
| 5.6. URÉIA.....   | 51 |

|   |    |
|---|----|
| 5.7. METODOLOGIA INTEGRADA.....   | 52 |
| 5.8. CONTEÚDO LIPÍDICO E PRODUTIVIDADE EM DIFERENTES ESPÉCIES DE<br>MICROALGAS..... | 57 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....   | 60 |
| 7. REFERÊNCIAS .....  | 62 |

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. PANORAMA DA UTILIZAÇÃO DE MICROALGAS

As microalgas são organismos microscópicos fotossintetizantes que compõem um extenso e diverso grupo, com grande variação metabólica. Segundo Packer (2009), são em sua maioria unicelulares e podem ser móveis ou sésseis, dependendo da presença ou não de flagelo. As microalgas podem também ser encontradas vivendo em colônias de grandes dimensões, onde há muito pouca especialização de tipos de células.

Estes organismos, responsáveis por cerca de 50% da produção primária do planeta, ocupam praticamente todos os tipos de habitats da biosfera, água doce, salgada, gelo, solos, entre outros, e podem ser classificados quanto aos tipos de pigmentos, natureza química dos produtos de reserva e constituintes da parede celular.

Filogeneticamente, as microalgas podem ser procarióticas ou eucarióticas e, em termos evolutivos, recentes ou muito antigas. Esta diversidade faz das microalgas uma fonte potencialmente rica de uma vasta gama de produtos químicos, com aplicações nutricionais, cosméticas e farmacêuticas, bem como de interesse para a indústria de combustíveis (OLAIZOLA, 2003) e no tratamento de águas residuais.

Segundo Morais & Costa (2008), muitas microalgas são utilizadas na produção de alimentos por produzirem diversas substâncias, tais como vitaminas, sais minerais, pigmentos, lipídios e ácidos graxos. Entre as principais aplicações dos ácidos graxos de microalgas estão: enriquecimento de rações para peixes, possibilidade de uso para produção de biodiesel e fonte de ácidos graxos essenciais na dieta. Segundo Pribadi (2009), as microalgas também podem servir de matéria-prima na produção de bio-polímeros/plásticos, que apresentam a vantagem de serem biodegradáveis.

O conteúdo e a composição dos lipídios e ácidos graxos em microalgas podem ser influenciados por fatores como intensidade luminosa, temperatura, concentração da fonte de nitrogênio e concentração de dióxido de carbono (MORAIS & COSTA, 2008). Para o seu cultivo podem ser utilizados resíduos industriais, como o CO<sub>2</sub>, e efluentes orgânicos. No caso do aproveitamento do CO<sub>2</sub> industrial nos cultivos e uso da biomassa de microalgas na produção de biocombustíveis, é possível o pleito de créditos de carbono (TEIXEIRA & TEIXEIRA, 2006). A fim de melhorar o desempenho das culturas de microalgas, é necessária uma boa compreensão do metabolismo do carbono e da energia em células microalgais (YANG *et al.*, 2000).

A história da utilização de microalgas por populações naturais data de séculos (*Nostoc* na Ásia e *Spirulina* na África e no México). No entanto, seu cultivo data apenas de algumas décadas (OLAIZOLA, 2003), e, desta forma, pouco se sabe sobre o metabolismo de células microalgais cultivadas (YANG *et al.*, 2000).

As microalgas marinhas podem ser cultivadas em lagoas abertas e tanques flutuantes no mar (cultivo extensivo) ou em biorreatores de sistemas fechado e *indoor* de cultivos (sistemas intensivos), sem gerar conflitos agrários, e com a utilização de nutrientes de fontes oceânicas. Para seu cultivo no mar, faz-se necessário o bombeamento de águas profundas ricas em nutrientes até a superfície (BRANDINI, 2007) ou a adição artificial de nutrientes.

A produção de algas nas proximidades de uma usina termo-elétrica, por exemplo, apresenta múltiplos benefícios, tais como a absorção de óxidos de nitrogênio e de enxofre (NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>) (PRIBADI, 2009), os dois maiores poluentes da atmosfera, precursores do fenômeno denominado chuva ácida e promotores da neblina fotoquímica (COSTA *et al.*, 2006).

Em seu estudo, Bertoldi *et al.* (2008) concluem que a biotecnologia de microalgas apresenta amplas aplicações, no entanto, sob o ponto de vista biotecnológico, não constituem grupo de microrganismos muito estudados, representando rica oportunidade para novas descobertas.

## 1.2. A IMPORTÂNCIA DO CARBONO

O dióxido de carbono é o produto da respiração, o substrato na fotossíntese, e um importante fator controlador do pH na água do mar. Cerca de 99% do  $\text{CO}_2$  absorvido do ar é convertido a bicarbonato ou carbonato no oceano e permanece nestas formas. Em decorrência destas reservas, 50 a 60 vezes mais  $\text{CO}_2$  está presente na água do mar do que no ar. Na fotossíntese, o  $\text{CO}_2$  é removido e o íon  $\text{HCO}_3^-$  é convertido em  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , e por último em  $\text{CO}_2$ . O íon  $\text{H}^+$  é também utilizado e substituído, sendo que a fotossíntese provoca uma ligeira redução do  $\text{CO}_2$ , uma redução maior dos íons bicarbonato, uma pequena redução do  $\text{H}^+$  e um ligeiro aumento dos íons carbonato. A respiração produz o inverso dessas mudanças (DAWES, 1998).

Embora a concentração do íon de hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) influencie a acidez da água do mar, o pH da água do mar permanece básico, entre 7,4 e 8,4 (média de 7,8) devido à transferência de carbonato. Entretanto, o pH da água do mar aumenta quando o  $\text{CO}_2$  é retirado pela fotossíntese e diminui quando o  $\text{CO}_2$  é adicionado pela respiração. Desta forma, alterações no pH podem ser utilizadas para medir taxas de fotossíntese, embora seja mais comum medir alterações nos níveis de oxigênio (DAWES, 1998).

Assim como as células vegetais, as microalgas podem realizar fotossíntese oxigênica e fixar o dióxido de carbono (YANG *et al.*, 2000). Pelo processo fotossintético, as microalgas captam a energia solar e a armazenam na forma de adenosina tri-fosfato – ATP e nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato – NADPH, compostos estes que servirão de fonte de energia para sintetizar carboidratos e outros compostos orgânicos celulares a partir da água e da redução do  $\text{CO}_2$ .

Do carbono fixado, uma parte é usada para a manutenção celular e para o crescimento, enquanto outra é estocada de diversas formas, variando de acordo com as diferentes classes de microalgas. Além disso, a quantidade de carbono estocada é dependente das condições ambientais (FALKOWSKI & RAVEN, 1997).

A maioria do carbono existente na Terra está numa forma oxidada (inorgânica) e combinada com oxigênio molecular, formando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) ou carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (FALKOWSKI & RAVEN, 1997). Destes, o  $\text{CO}_2$  é a fonte de carbono preferida pelas microalgas, uma vez que se difunde rapidamente (difusão passiva) da água para o interior das células e é usado diretamente nos processos de fixação, enquanto o bicarbonato é incorporado ativamente, gerando um gasto energético para suportar o processo (RAVEN, 1988).

Segundo Neenan *et al.* (1986), devido ao fato do dióxido de carbono estar presente na atmosfera em concentrações muito baixas (0,032% por volume de ar seco), o fluxo passivo de  $\text{CO}_2$  na atmosfera através da superfície de cultivos de algas em massa é insuficiente para suprir a quantidade de dióxido de carbono necessária para dar suporte à produtividade intensiva.

Se essa quantidade de ar fosse borbulhada através das culturas, a eficiência da transferência de  $\text{CO}_2$  do ar para a água seria extremamente baixa, refletindo a baixa concentração de  $\text{CO}_2$  no ar. Seria necessário, então, borbulhar centenas de metros cúbicos de ar por metro quadrado de cultura por dia para suprir o  $\text{CO}_2$  necessário. Além disso, seria necessário fazê-lo durante as poucas horas iluminadas do dia, quando a demanda de carbono da cultura for mais alta. Consequentemente, os custos e a logística deste sistema seriam inviáveis (NEENAN *et al.*, 1986).

Desta forma, sistemas ao ar livre para a cultura fotossintética de microalgas requerem suprimento de  $\text{CO}_2$  para atingir alta produtividade (NEENAN *et al.*, 1986). Uma alternativa seria a utilização do dióxido de carbono proveniente da queima de combustíveis fósseis como matéria-prima para as microalgas, que são os usuários mais produtivos do  $\text{CO}_2$ , constituindo, assim, um grande sumidouro do gás (ZEILER, *et al.*, 1995).

### 1.3. PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS A PARTIR DE MICROALGAS

Devido aos custos atuais e às incertezas futuras do suprimento de combustíveis fósseis, principalmente os baseados em petróleo, e à elevação dos níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera, faz-se necessária a procura de novos combustíveis, que causem menor impacto ambiental. Pode ser observado hoje um rápido desenvolvimento de refinarias de bioetanol em escala comercial, que utilizam cana-de-açúcar (Brasil) e milho (EUA) como matérias-primas, bem como um crescente uso de óleos à base de vegetais na produção do biodiesel, no lugar do óleo diesel obtido de petróleo (SEIBER, 2007).

Segundo Seiber (2007), o amido do milho, o açúcar da cana e o óleo de sementes de origem agrícola podem contribuir para as demandas atuais e futuras, contudo, seus biocombustíveis não vão afetar significativamente a dependência do petróleo no mundo.

No Brasil, a produção do álcool resultou em graves problemas ambientais, como a perda de grande parte da Mata Atlântica ciliar, central e nordestina, com erosão de margens e transporte de excesso de sedimentos para os oceanos, e reduzindo drasticamente a extensão dos recifes de coral. Outros problemas podem ser apontados, tais como: o uso do solo do Cerrado para a agroindústria da soja, a fim de atender a demanda interna e de exportação de biocombustíveis, e o consumo de água doce, que já começa a preocupar, tendo em vista o desequilíbrio do ciclo hidrológico. Para cada quilo de grãos de culturas oleaginosas (Ex.: soja, mamona, dendê e girassol), utilizadas na produção de biocombustível, são consumidas centenas de litros de água (BRANDINI, 2007).

De acordo com Lourenço (2009), se forem feitos investimentos em microalgas, o Brasil terá contribuições relevantes para as ações nacionais de abatimento de CO<sub>2</sub> e criação de mecanismos de desenvolvimento limpo. Grandes empreendimentos neste campo contribuirão para a redução da pressão por desmatamento em ecossistemas de alta produtividade biológica,

como o Cerrado e a Amazônia, utilizados no cultivo de vegetais destinados à produção de biocombustíveis.

As vantagens do uso de microalgas como matéria-prima para a produção de biodiesel são cada vez mais evidenciados através de amplos estudos desenvolvidos em várias partes do mundo. Segundo Brandini (2007), estão entre essas vantagens: economia de água; facilidade de cultivo em massa; grande aproveitamento do espaço de cultivo; rápido crescimento e acúmulo de biomassa vegetal pelas microalgas e eficiência na fixação de carbono atmosférico por esses organismos.

Comparadas aos vegetais superiores, as microalgas apresentam maior eficiência fotossintética, e, em relação à produção de lipídios, podem produzir, pelo menos, quinze vezes mais que a palma (*Elaeis guineensis*), um dos vegetais de maior rendimento e produtividade. A estimativa de produção de lipídios por estes organismos varia de 15.000 a 30.000 L.km<sup>-2</sup> e a extração é simples, podendo ser aplicados os métodos tradicionais usados na indústria química, incluindo a extração por solventes (em especial, hexano) (RADMANN & COSTA, 2008).

O óleo das algas pode ser extraído através de uma ampla variedade de métodos ou combinações destes. O processo de gaseificação produz gás combustível, como H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e amônia, enquanto o produto da pirólise é o biodiesel. Os biocombustíveis podem ser utilizados em motores e turbinas e como matéria-prima para as refinarias. O produto da fermentação de microalgas é o etanol, que pode ser utilizado como combustível (100% álcool) ou como “gasohol” (mistura de óleo e álcool) (AMIN, 2009).

Ao utilizar um processo de transesterificação, o óleo da alga pode ser convertido a biodiesel (AMIN, 2009). Segundo Biolatina (2009), a transesterificação é o método mais comum para converter triglicerídeos em biodiesel. O processo consiste na conversão de óleo vegetal ou gordura animal em biocombustível por meio de uma reação química que utiliza metanol ou etanol, com o hidróxido de potássio fazendo o papel de catalisador.

De uma forma geral, este processo quebra as moléculas de triglicerídeos, tornando suas cadeias em estruturas mais simples, os mono-álcalis ésteres, com baixas viscosidades, gerando menor teor de resíduos de carbono após a combustão (BIOLATINA, 2009).

O biodiesel tem suas principais características bastante semelhantes às do diesel convencional ou compatíveis com o diesel do petróleo, e pode também ser misturado a este em qualquer proporção (AMIN, 2009).

Para minimizar os custos, a produção de biomassa microalgal (Figura 1) deve contar com a luz solar disponível. O meio de crescimento deve fornecer os elementos inorgânicos que constituem as células das algas. Os elementos essenciais incluem, além do carbono, nitrogênio, fósforo, ferro e, em alguns casos, silício (CHISTI, 2007).

Segundo Carioca (2009), o Brasil, pode ser considerado “um dos melhores lugares do planeta para o cultivo de microalgas”, onde o sol é abundante na maior parte do ano, devido ao fato de estarmos próximos à linha do Equador, tendo até dez horas de sol por dia.



FIGURA 1. BIOMASSA MICROALGAL EXTRAÍDA DA CULTURA LÍQUIDA POR FILTRAÇÃO MOVENDO-SE AO LONGO DE UMA ESTEIRA NA “CYANOTECH CORPORATION”, HAWAÍ, EUA. FOTO: TERRY LUCAS. FONTE: CHISTI (2007).

Segundo Teixeira & Teixeira (2006), é de extrema importância a criação de uma rede de estudos de microalgas para a produção de biocombustíveis, dada a imensa gama de pesquisas a serem desenvolvidas e a grande diversidade de espécies de microalgas que podem ser testadas para este fim. Além disso, os cultivos de microalgas em larga escala necessitam de um método mais barato e eficiente, visto que o principal problema dos cultivos é o custo de produção. Neste sentido, segundo Borges (2005), investir em pesquisas para produzir um produto de valor comercial agregado à espécie cultivada tornaria a produção de microalgas mais rentável.

O custo de CO<sub>2</sub> desempenha um papel fundamental na economia do cultivo de microalgas. Desta forma, o desenvolvimento de modelos econômicos para a captura de gases de combustão é importante na obtenção de custos viáveis para a produção de lipídios, contribuindo, assim, com a mitigação do CO<sub>2</sub> e com o processo geral de produção de microalgas (KADAM, 1997).

Segundo Lourenço (2009), o Brasil reúne condições extraordinárias para ser o maior produtor de biomassa de microalgas do mundo. Empresas dos

Estados Unidos e da Europa consideram a possibilidade de instalarem-se no país para produzir microalgas. Desta forma, o tempo deveria ser aproveitado pelos brasileiros para deter o domínio total da tecnologia, mantendo equipes permanentes de pesquisa.

## 2. JUSTIFICATIVA

Com o aumento dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas que reduzam os níveis do gás no ambiente. Devido ao fato das microalgas apresentarem, entre outras vantagens, altas taxas de fixação de carbono, o cultivo destes organismos, voltado para a produção de compostos de interesse e biocombustíveis, constitui alternativa importante na captura do CO<sub>2</sub>.

No entanto, dado que os cultivos de microalgas em larga escala ainda apresentam custos elevados, é necessário investir em pesquisas para produzir um produto de valor comercial agregado à espécie cultivada, tornando a produção de microalgas mais rentável e elevando a absorção de carbono.

Como supracitado, o custo de CO<sub>2</sub> desempenha um papel fundamental na economia do cultivo de microalgas. Assim sendo, o desenvolvimento de modelos econômicos para a captura de gases de combustão é fator importante na obtenção de custos viáveis para a produção de lipídios, voltados para a indústria de biodiesel.

Neste contexto, o estudo do aproveitamento do CO<sub>2</sub> pelas microalgas, aliado ao estudo destes organismos para a produção de biocombustíveis e compostos de interesse comercial, constitui uma importante alternativa de geração de energia “limpa” para os dias atuais.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVO GERAL

O presente estudo teve como objetivo geral realizar levantamento bibliográfico sobre metodologias de captura de carbono com foco em microalgas.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Colaborar com a disseminação de informações sobre captura de CO<sub>2</sub> da atmosfera utilizando microalgas;
- Contribuir para o desenvolvimento de estudos de captura de CO<sub>2</sub> da atmosfera;
- Contribuir para o estudo de produção de biodiesel a partir de microalgas, apresentando uma síntese da literatura atual sobre condições de cultivos mais eficientes, bem como espécies mais ou menos adequadas para tal.

#### **4. MATERIAL E MÉTODOS**

Levantamento e análise da bibliografia pertinente e atualizada, abrangendo artigos científicos, livros e *web sites*.

## 5. REVISÃO DA LITERATURA

### 5.1. SISTEMAS DE CULTIVOS DE MICROALGAS

Há uma variedade de sistemas fotoautotróficos de cultivo de microalgas, cada um com suas vantagens e desvantagens. Atualmente, sistemas em suspensão de lagoas abertas e fotobiorreatores fechados são comumente utilizados na produção do biocombustível algal. Em geral, uma lagoa aberta é simplesmente uma série de "pistas" abertas, enquanto um fotobiorreator é um reator de *design* sofisticado que pode ser mantido em locais abertos ou fechados (WEN & JOHNSON, 2009).

#### 5.1.1. Lagoas abertas

Lagoas abertas (Figura 2) são os sistemas mais antigos e mais simples para cultivo em massa de microalgas. Neste sistema, a lagoa é rasa, com cerca de 30 cm de profundidade, e as algas são cultivadas sob condições idênticas ao ambiente natural. A lagoa é projetada em uma configuração de pista, em que uma roda de pás circula e mistura as células das algas e nutrientes. As pistas são normalmente feitas de concreto, ou são simplesmente escavadas na terra e revestidas com um forro de plástico para impedir a terra de absorver o líquido. Condutores no canal guiam o fluxo nas curvas (WEN & JOHNSON, 2009).



Lagoas abertas

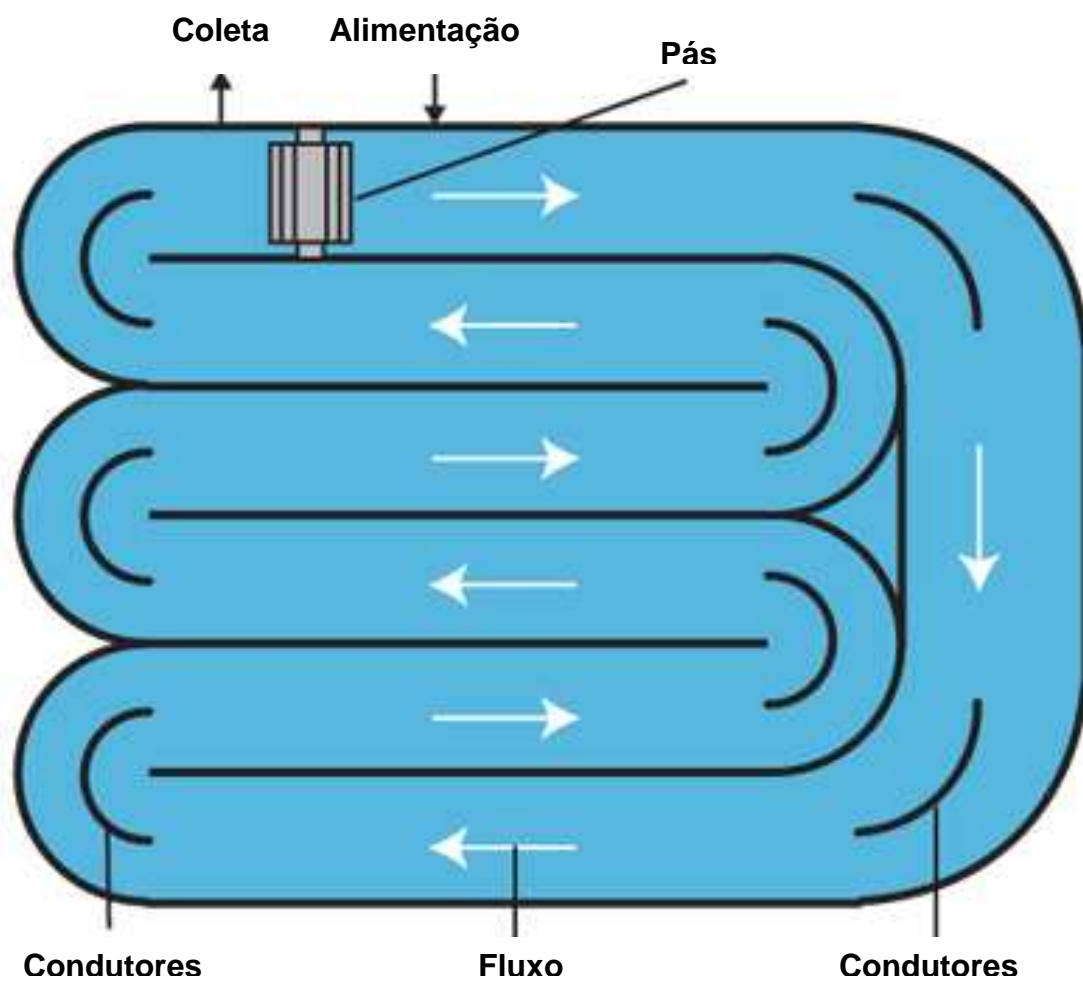


FIGURA 2. SISTEMA ABERTO DE CULTIVO DE MICROALGAS. FONTE: WEN & JOHNSON (2009).

O sistema é geralmente operado em um modo contínuo, ou seja, os alimentos frescos (que contêm nutrientes, como nitrogênio, fósforo e sais inorgânicos) são adicionados à frente das pás, e o líquido algal é colhido por trás das pás, após ter circulado através do “giro”. Dependendo dos nutrientes necessários por espécie algal, várias fontes de águas residuais podem ser utilizadas para o cultivo das algas. Para algumas espécies de microalgas, pode ser usada água do mar ou com alta salinidade (WEN & JOHNSON, 2009).

Embora lagoas abertas custem menos para serem construídas e operadas se comparadas aos fotobiorreatores fechados, este sistema de cultura tem suas desvantagens, ou seja, por serem realizados ao ar livre, muitas vezes ocorre grande perda de água devido à evaporação (WEN & JOHNSON, 2009). Assim, lagoas abertas não permitem à microalga a utilização de dióxido de carbono da forma mais eficiente, e a produção de biomassa é limitada (CHISTI, 2007). A produtividade em biomassa também é limitada pela contaminação por espécies de algas indesejáveis, fungos e bactérias, bem como por organismos que se alimentam de algas (WEN & JOHNSON, 2009; MATA *et al.*, 2009).

#### 5.1.1.1. Adição de CO<sub>2</sub> em sistemas abertos

Em sistemas abertos, dois fatores determinam a eficiência com que o dióxido de carbono fornecido do exterior é convertido em carbono orgânico fixado em sistemas de microalgas. O primeiro fator é a perda de dióxido de carbono da superfície da cultura para a atmosfera. Isso ocorre quando a adição de CO<sub>2</sub> para a cultura atinge concentrações acima da concentração de equilíbrio com a atmosfera, neste caso, grandes quantidades de CO<sub>2</sub> são perdidas (degaseificação). Desta forma, faz-se necessário um controle rigorosamente automatizado das adições de CO<sub>2</sub> a fim de minimizar essas perdas (NEENAN *et al.*, 1986).

O segundo fator é a eficiência com que o dióxido de carbono pode ser dissolvido no meio de cultura antes de escapar para a atmosfera. Se o dióxido

de carbono é adicionado em forma de bolhas, grande quantidade pode ser perdida se as bolhas atingirem a superfície e estourarem. Alternativamente, o dióxido de carbono pode ser adicionado em forma de pequenas bolhas em colunas contracorrente, onde o baixo movimento da água compensa o movimento ascendente das bolhas até que sejam consumidas (NEENAN *et al.*, 1986).

### 5.1.2. Fotobiorreatores fechados

Os fotobiorreatores fechados têm sido empregados para superar os problemas de contaminação e evaporação encontrados nas lagoas abertas. Estes sistemas são feitos de material transparente, geralmente plástico ou vidro, e são comumente colocados ao ar livre para aproveitar a iluminação natural do sol. Os vasos de cultivo têm uma grande área superficial em relação ao seu raio (CHISTI, 2007; WEN & JOHNSON, 2009).

O fotobiorreator mais utilizado apresenta formato tubular (Figura 3), com inúmeros tubos transparentes, geralmente alinhados com os raios solares (com suas extremidades voltadas para Norte-Sul). Os tubos geralmente apresentam diâmetros inferiores a 10 cm para maximizar a penetração da luz solar. O meio de cultivo é distribuído através de uma bomba para os tubos, onde é exposto à luz durante a fotossíntese, retornando então para um reservatório. Uma parte das algas é geralmente colhida depois de passar através dos tubos de coleta de energia solar, possibilitando o cultivo contínuo das algas (CHISTI, 2007).



FIGURA 3. FOTOBIORREATOR TUBULAR. FONTE: AWI (2009).

O processo de fotossíntese gera oxigênio. Em um sistema aberto, isto não é um problema, visto que o oxigênio é facilmente devolvido à atmosfera. No entanto, em um fotobiorreator fechado, os níveis de oxigênio serão elevados e podem chegar a inibir e envenenar as algas. As culturas devem ser periodicamente devolvidas para uma zona de degaseificação, onde o excesso de oxigênio será removido. Além disso, o consumo do dióxido de carbono pelas algas pode causar limitação e aumento do pH. Portanto, o dióxido de carbono deve ser adicionado ao sistema para assegurar o sucesso do cultivo em grande escala (WEN & JOHNSON, 2009).

Chisti (2007) compara os métodos de produção de biomassa entre fotobiorreatores e sistemas abertos, para um nível de produção anual de 100 t de biomassa em ambos os casos, concluindo que, se as perdas para a atmosfera forem desconsideradas, pode-se dizer que os métodos de produção consomem uma quantidade idêntica de dióxido de carbono. No entanto, as vantagens dos fotobiorreatores fechados são óbvias, pois superam os

problemas de contaminação e evaporação encontradas nas lagoas abertas (WEN & JOHNSON, 2009). A produtividade de biomassa nos fotobiorreatores pode apresentar uma média 13 vezes maior do que a de um sistema aberto. A coleta de biomassa é mais barata do que em sistemas abertos, porque a biomassa algal chega a ser 30 vezes mais concentrada que a biomassa encontrada nas pistas (CHISTI, 2007).

No entanto, os fotobiorreatores fechados também têm algumas desvantagens. Por exemplo, os reatores apresentam dificuldades para serem reproduzidos em escalas maiores. Além disso, a limitação da luz pode não ser inteiramente superada, pois a penetração da luz é inversamente proporcional à concentração de células. As células que aderem nas paredes dos tubos também podem impedir a penetração da luz. Embora os sistemas fechados possam aumentar a concentração de biomassa, o crescimento de microalgas está ainda abaixo do esperado, em decorrência das variações na temperatura e na intensidade luminosa (WEN & JOHNSON, 2009).

### 5.1.3. Operação em modo estanque *versus* operação contínua

Em um cultivo de microalgas, além de decidir se as unidades de produção serão abertas ou fechadas, é necessário determinar se estas unidades serão operadas em modo estanque ou contínuo. Isso depende das espécies de microalgas selecionadas, das condições ambientais previstas, da disponibilidade de nutrientes, e até mesmo da possibilidade de combinar o crescimento microalgal com uma estratégia de controle da poluição por outras indústrias, por exemplo, para a remoção de CO<sub>2</sub> a partir das emissões de gases de combustão ou a remoção de nitrogênio e fósforo de um efluente (MATA *et al.*, 2009).

De acordo com Muliterno *et al.* (2005), o modo de cultivo estanque (ou “fed-batch”) consiste na adição intermitente de um substrato limitante ao longo do crescimento, permitindo um aumento no período produtivo do processo e evitando os efeitos tóxicos das elevadas concentrações iniciais de substrato.

Segundo Mata *et al.* (2009), há diversas vantagens no uso de biorreatores contínuos em relação ao modo estanque:

- Biorreatores contínuos proporcionam um maior grau de controle que o modo estanque;
- As taxas de crescimento podem ser reguladas e mantidas por períodos de tempo prolongados, e a concentração de biomassa pode ser controlada através da variação da taxa de diluição;
- Devido ao estado estacionário de biorreatores contínuos, os resultados são mais confiáveis e fáceis de reproduzir, e a qualidade do produto desejado pode ser mais facilmente obtida;
- Reações contínuas oferecem maiores possibilidades para o sistema de investigação e análise.

Há ainda as desvantagens inerentes que podem tornar este processo inadequado para alguns tipos de bio-reação. Por exemplo, um desafio está em controlar a produção de alguns produtos não-relacionados com o crescimento. Por esta razão o processo contínuo muitas vezes requer cultivo estanque, e um suprimento contínuo de nutrientes (MATA *et al.*, 2009).

A viscosidade da mistura e sua natureza heterogênea pode dificultar a manutenção de organismos filamentosos. Longos períodos de crescimento não só aumentam o risco de contaminação como também ditam que o biorreator deve ser extremamente confiável e consistente, incorrendo uma despesa inicial potencialmente maior em equipamentos de qualidade superior (MATA *et al.*, 2009).

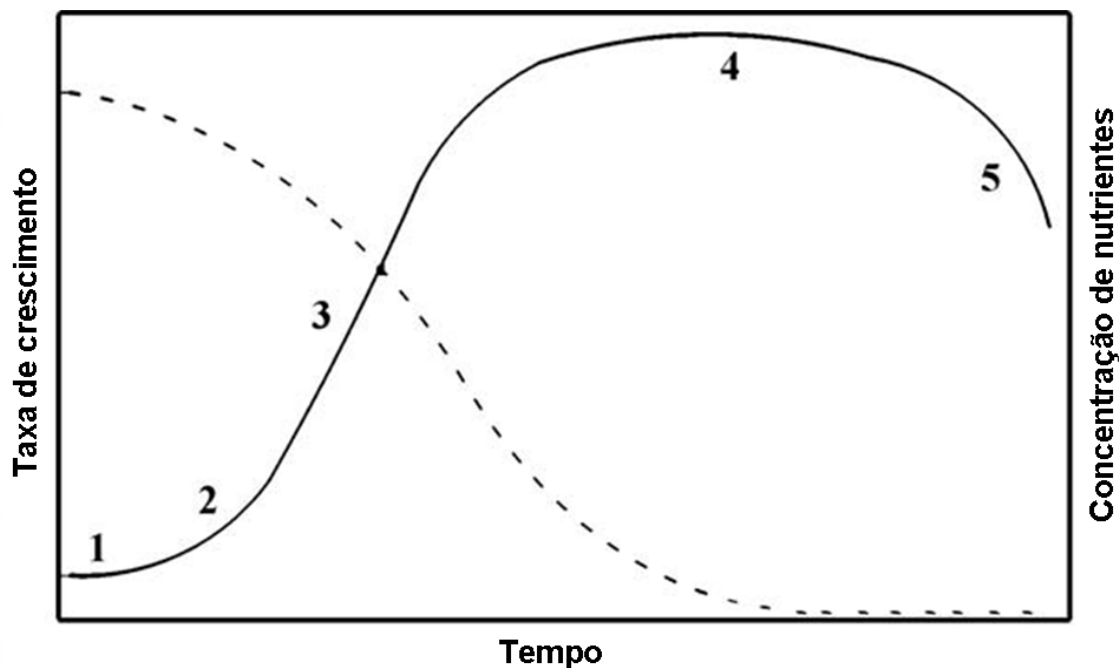


FIGURA 4. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TAXA DE CRESCIMENTO ALGAL EM CULTIVO ESTANQUE (LINHA SÓLIDA) E CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES (LINHA TRACEJADA). FONTE: MATA *et al.* (2009).

A Figura 4 representa a curva de crescimento de algas em uma cultura estanque (linha sólida) e de concentração de nutrientes (linha tracejada), onde cinco fases de crescimento, razoavelmente bem definidas, podem ser reconhecidas: (1) fase lenta ou de adaptação; (2) fase de crescimento exponencial, representando a taxa de crescimento máxima sob condições específicas; (3) fase do crescimento linear; (4) fase de crescimento estacionário; (5) fase de declínio ou morte. O padrão oposto da curva tracejada indica a depleção de nutrientes que ocorre no processo (MATA *et al.*, 2009). Na Tabela 1 é feita uma comparação das vantagens e desvantagens entre sistemas abertos e fechados em cultivos de microalgas em larga escala.

TABELA 1. COMPARAÇÃO DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS ENTRE SISTEMAS ABERTOS E FECHADOS EM CULTIVOS DE MICROALGAS EM LARGA ESCALA.

| <b>Sistema de cultivo para microalgas</b> | <b>Sistemas fechados (SF)</b>      | <b>Sistemas abertos (SA)</b>  |
|---|------------------------------------|-------------------------------|
| Controle de contaminação                  | Fácil                              | Difícil                       |
| Risco de contaminação                     | Reduzido                           | Alto                          |
| Esterilidade                              | Possível                           | Nenhuma                       |
| Controle dos processos                    | Fácil                              | Difícil                       |
| Controle das espécies                     | Fácil                              | Difícil                       |
| Mistura                                   | Uniforme                           | Muito pobre                   |
| Regime de operação                        | Estanque ou semi-contínuo          | Estanque ou semi-contínuo     |
| Espaço necessário                         | Uma questão de produtividade       | SF~SA                         |
| Razão área/ volume                        | Alta (20-200 m <sup>-1</sup> )     | Baixa (5-10 m <sup>-1</sup> ) |
| Densidade populacional (células algais)   | Alta                               | Baixa                         |
| Investimento                              | Alta                               | Baixo                         |
| Custo de operação                         | Alta                               | Baixo                         |
| Custos de capital/ operacionais em lagoas | Lagoas, custo 3-10 vezes inferior  | SF>SA                         |
| Eficiência de utilização da luz           | Alta                               | Pobre                         |
| Controle de temperatura                   | Temperatura mais uniforme          | Difícil                       |
| Produtividade                             | 3-5 vezes mais produtivo           | Baixa                         |
| Perda de água                             | Depende de projeto de resfriamento | SF~SA                         |
| Estresse hidrodinâmico na alga            | Baixo-alto                         | Muito baixo                   |
| Evaporação do meio de cultura             | Baixa                              | Alta                          |
| Controle de transferência de gás          | Alto                               | Baixo                         |
| Perdas de CO <sub>2</sub>                 | Depende do pH, alcalinidade, etc.  | SF~SA                         |
| Inibição do O <sub>2</sub>                | Grande problema em SF              | SF>SA                         |
| Concentração de biomassa                  | 3-5 vezes maior em SF              | SF>SA                         |
| Reprodução em escalas maiores             | Difícil                            | Difícil                       |

FONTE: MATA *et al.* (2009).

#### 5.1.4. Sistema de cultivo integrado entre lagoas abertas e fotobiorreatores fechados

Huntley & Redalje (2006) desenvolveram um sistema de cultivo integrado, que, segundo os autores, tira proveito dos benefícios tanto dos fotobiorreatores como das lagoas abertas, evitando suas desvantagens. O sucesso com a produção em escala comercial de *Haematococcus pluvialis* demonstra que os fotobiorreatores são essenciais para a produção sustentável

de microrganismos fotossintetizantes que não podem ser cultivados em tanques abertos de forma produtiva. O sistema de fotobiorreator prevê um fornecimento contínuo de inóculos de alta qualidade às lagoas abertas. As altas taxas de crescimento nos sistemas abertos permitem um tempo de residência extremamente breve, evitando, assim, o potencial de contaminação.

Huntley & Redalje (2006) operaram o sistema de cultivo integrado continuamente por mais de um ano, em escala de cultivo de 2 ha alcançado uma produção média de energia de biomassa de 763 GJ ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e uma produção de óleo à taxa de 422 GJ ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> para *H. pluvialis*. O valor máximo de produção de energia de biomassa alcançado poderia fornecer uma taxa anual de 1.836 GJ ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. Estes valores são substancialmente maiores do que qualquer taxa de produção de bio-energia projetada para plantas terrestres (a maioria destas fica no intervalo de 50 a 400 GJ ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>).

Pode-se concluir então que taxas de produção de bio-energia maiores que 4.100 GJ ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> poderiam ser alcançadas através do sistema de cultivo integrado com microalgas que apresentem maior teor de óleo que *H. pluvialis* e comprovada eficiência fotossintética (HUNTLEY & REDALJE, 2006).

Com o desenvolvimento deste sistema de produção integrado, a HR Biopetroleum tem conseguido avanços significativos para a comercialização da produção de algas. Segundo a empresa, o sistema combina o baixo custo e a alta produtividade das lagoas abertas com a proteção da cultura nos fotobiorreatores fechados, evitando a contaminação das culturas e minimizando o investimento do capital (HR BIOPETROLEUM, 2008).

Em uma planta piloto, a empresa utiliza um fotobiorreator na primeira fase da produção das algas para manter constantes as condições que favorecem a divisão celular contínua e evitar a contaminação da cultura por outros organismos. Nesta fase, a temperatura e o pH são controlados, e as algas são expostas à luz solar, enquanto são mantidas em suspensão para maximizar o crescimento (HR BIOPETROLEUM, 2008).

Na segunda fase, as algas são transferidas dos fotobiorreatores para um sistema de lagoas abertas. Nesta etapa, o objetivo é privar as células de

nutrientes e expô-las a outros estresses ambientais, levando, o mais rápido possível, à síntese do produto de interesse para o biodiesel, o óleo. Estresses ambientais que estimulam a produção de óleo podem ser aplicados rapidamente através da transferência de culturas do fotobiorreator para lagoas abertas. Assim como os fotobiorreatores, as lagoas são expostas à luz solar (HR BIOPETROLEUM, 2008).

Posteriormente, as células das algas são concentradas por gravidade em uma pasta, o excesso de água é removido e a biomassa é concentrada por centrifugação. A biomassa úmida é então seca. Após, as algas são processadas, e o óleo e outros subprodutos são extraídos (HR BIOPETROLEUM, 2008).

## 5.2. FOTOBIORREACTORES

Soyama (2006) alega não haver nenhuma novidade em afirmar que o “pulmão do mundo” não é Amazônia, e sim as microalgas, que respondem por quase metade da produção do oxigênio do planeta. E, para aumentar a taxa de consumo do gás carbônico pelas microalgas, pesquisadores vêm investindo no estudo de métodos que otimizem esse processo de fixação. A utilização de fotobiorreatores no cultivo de microalgas, por exemplo, é uma alternativa para tornar mais eficiente a conversão do CO<sub>2</sub> para o oxigênio por estes organismos (SOYAMA, 2006).

Os dados apontam que a captura de gás carbônico pelas microalgas no fotobiorreator é 44 mil vezes maior se comparado aos processos de seqüestro de carbono das árvores de reflorestamento (Pinus e Eucalipto). Ou seja, em escala laboratorial, a remoção do carbono pelas microalgas fica em torno de 100 gramas do gás por hora a cada grama de microalga (denominada matéria seca). Já as plantas terrestres apresentam taxa de consumo de 0,0023 gramas de gás carbônico por hora (SOYAMA, 2006).

Assim sendo, o CO<sub>2</sub> produzido em indústrias como a petrolífera - uma das principais fontes de gás carbônico - pode ser transformado em biomassa.

Quando armazenado, ele é injetado em um líquido contendo sais minerais e microalgas, que crescem de forma significativa. Em quatro dias, a massa de microalgas pode aumentar 30 vezes (SOYAMA, 2006).

Em uma primeira etapa do processo de fixação, utilizando-se o fotobiorreator, o dióxido de carbono, quando dissolvido na fase aquosa do sistema, pode ser seqüestrado por precipitação química através da reação dos íons bicarbonato e carbonato com elementos presentes no meio de cultivo, como cálcio e magnésio. Estas reações são catalisadas pelo crescimento e fisiologia destes microrganismos. Uma outra rota de fixação de carbono está relacionada com o ciclo de Calvin, onde enzimas especializadas presentes nestes organismos catalisam reações que incorporam átomos de carbono, oriundos do CO<sub>2</sub> envolvido na fotossíntese. A conversão biológica do dióxido de carbono resulta em produtos do metabolismo fotossintético como células, oxigênio e biopolímeros solúveis no meio de cultivo, que podem ser utilizados para fins comerciais (JACOB-LOPES *et al.*, 2007).

#### 5.2.1. Escalas de cultivo e fotobiorreatores

Segundo Sastre *et al.* (2007), o desenho racional de biorreatores de larga escala continua sofrendo por falta de escala de parâmetros técnicos na passagem do laboratório para escalas maiores e por falta de informação sobre a cinética das reações fisiológicas da espécie a ser cultivada. Desta forma, as simulações dos processos esperados em larga escala têm de ser realizadas sempre que possível, e as experiências devem ser realizadas em reatores de pequena escala, simulando a situação em larga escala. Este procedimento é referido como “down scale”. Em seu trabalho, Sastre *et al.* (2007) propõem um conceito para realizar esta tarefa. Em primeiro lugar, as interações entre transferência de luz, dinâmica de fluidos e metabolismo microbiano são descritos. Em segundo lugar, é fornecido um procedimento para se decompor as interações através da simulação e pela busca de parâmetros fisiológicos em modelos de reatores. A transferência de luz pode ser calculada por métodos de

Monte Carlo, que, segundo Silva Filho & Lima (2008), são simulações estatísticas que utilizam sequências de números aleatórios. A dinâmica de fluido pode ser manipulada por dinâmica de fluidos computacional (DFC). Modelos de fotobiorreatores idealmente iluminados são propostos para medir os parâmetros fisiológicos especialmente induzidos por ciclos claros/ escuros, gerados pela interação de turbulências e atenuação da luz (SASTRE *et al.*, 2007).

Portanto, ao final do estudo, Sastre *et al.* (2007) concluem que fotobiorreatores otimizados e seguros serão necessários para uma maior exploração do potencial das microalgas para produção de compostos de interesse. E, embora a maioria das aplicações em larga escala existentes tenham sofrido significativas melhorias tecnológicas, ainda é necessária a realização de avanços em relação à cinética. Foi demonstrado também que o desenho racional pode ser realizado através de um procedimento “down scaling”, fornecendo uma imagem clara da luz e da distribuição do fluxo no reator. Além disso, as expectativas do ambiente intracelular podem ser calculadas previamente. Conseqüentemente, as experiências são propostas para medir as reações fisiológicas das células sob a situação específica em grande escala do reator (SASTRE *et al.*, 2007).

#### 5.2.1.1. Um fotobiorreator inovador de escala piloto

Várias microalgas têm recebido destaque devido à questão da fixação biológica através da fotossíntese microalgal, a fim de reduzir o CO<sub>2</sub> atmosférico. Além disso, o cultivo da biomassa algal pode ser voltado para diversas aplicações, tais como: biofertilizantes, condicionadores de solo e ração para animais aquáticos ou terrestres (CHAE *et al.*, 2005).

Neste contexto, Chae *et al.* (2005) testaram em seu estudo os efeitos da intensidade luminosa e tempo de retenção hidráulica (TRH) sobre o rendimento da microalga *Euglena gracilis*, que apresenta boa digestibilidade, tornando-a um potencial alimento para animais. O teste foi realizado em um reator de

escala laboratorial de volume de trabalho (VT) 100 L, seguido de cultivos semi-contínuos e contínuos. Posteriormente, um fotobiorreator inovador de escala piloto (VT=1.000 L) foi fabricado para aumentar a produção dos recursos biológicos (CHAE *et al.*, 2005).

O fotobiorreator de escala piloto foi baseado nos resultados experimentais de escala laboratorial e desenvolvido utilizando-se luz solar como fonte de energia e gases de combustão emitidos de um forno industrial utilizando querosene como combustível. O fotobiorreator (Figura 5) foi separado em uma região escura e uma região iluminada com uma cobertura (CHAE *et al.*, 2005).

A partir dos resultados obtidos pôde-se concluir que o fotobiorreator de escala piloto proposto mostrou ter melhorado o rendimento se comparado ao reator de escala laboratorial (CHAE *et al.*, 2005).



FIGURA 5. FOTOGRAFIA TRANSVERSAL DO FOTOBIORREATOR INOVADOR DE ESCALA PILOTO. FONTE: CHAE *et al.* (2005).

### 5.2.2. Fotobiorreatores seqüenciais

Segundo Jacob-Lopes *et al.* (2009), em estudos anteriores, correntes de entrada com 15% de CO<sub>2</sub> foram consideradas as melhores condições para o crescimento de biomassa e remoção de dióxido de carbono, no entanto, esta condição leva a perdas significativas de CO<sub>2</sub> subutilizado. Assim, estratégias operacionais devem ser desenvolvidas para melhorar o desempenho da utilização de CO<sub>2</sub> em fotobiorreatores.

*Designs* e metodologias de reprodução em grande escala para fotobiorreatores não têm sido extensivamente descritos. Independentemente da configuração específica do reator e modos operacionais empregados, várias questões essenciais devem ser abordadas: (i) eficácia e eficiência do fornecimento de luz, (ii) fornecimento de CO<sub>2</sub> enquanto a diluição é minimizada,

(iii) seleção de cepas com elevada taxa de crescimento, com tolerância ao CO<sub>2</sub> e temperatura; (iv) análise e definição das condições operacionais e (v) tecnologia de escalas em fotobiorreatores (JACOB-LOPES *et al.*, 2009).

Em seu estudo, Jacob-Lopes *et al.* (2009) avaliaram a capacidade da cianobactéria *Aphanothece microscopica Nägeli* em tratar ar com 15% de dióxido de carbono em dois tipos de fotobiorreatores, de coluna de bolha (BCR) e transporte aéreo (ALR), sob três diferentes condições operacionais: operação simples, re-circulação de ar e dois reatores seqüenciais (Figura 6).

Os resultados obtidos por Jacob-Lopes *et al.* (2009) mostraram que tanto a configuração do reator como o modo operacional foram critérios determinantes para o desempenho dos fotobiorreatores na conversão biológica do dióxido de carbono. As operações com recirculação de ar mostraram as possibilidades de utilização em operações de pequena escala, mas os fotobiorreatores seqüenciais de duas fases mostraram-se como os modos de funcionamento com maior potencial de aplicação em escala industrial, devido ao aumento da eficiência de remoção de CO<sub>2</sub>.

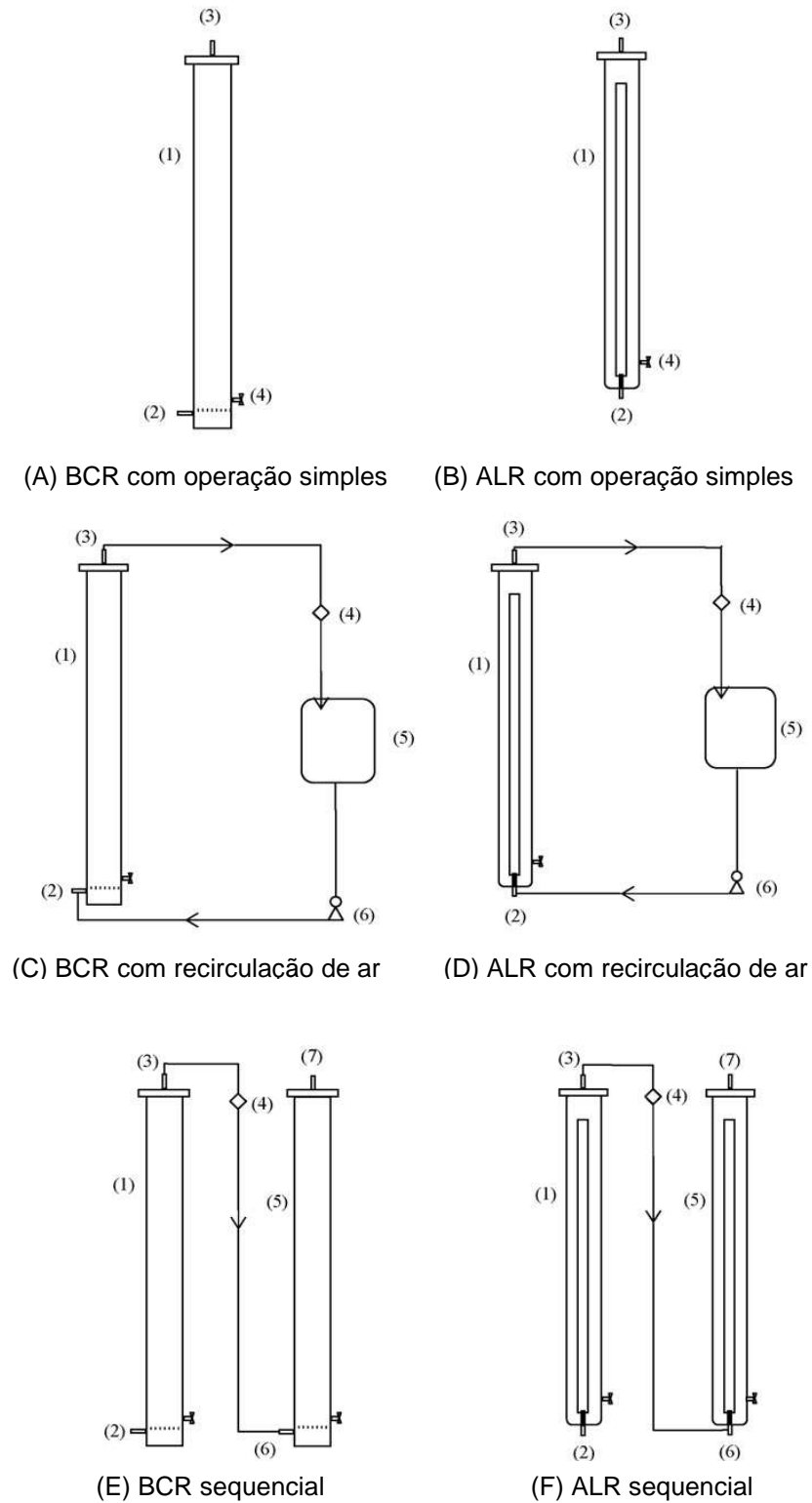


FIGURA 6. APARATO EXPERIMENTAL (A E B): (1) REATOR; (2) AMOSTRA DE ENTRADA DO GÁS; (3) AMOSTRA DE SAÍDA DO GÁS; (4) AMOSTRA DE LÍQUIDO. (C E D): (1) REATOR; (2) AMOSTRA DE ENTRADA DO GÁS; (3) AMOSTRA DE SAÍDA DO GÁS; (4) “DESUMIDIFICADOR” DE AR; (5) TANQUE DE EQUILÍBRIO; (6) BOMBA. (E E F): (1) REATOR; (2) AMOSTRA DE ENTRADA DO GÁS; (3) AMOSTRA DE SAÍDA DO GÁS; (4) “DESUMIDIFICADOR” DE AR; (5) REATOR; (6) AMOSTRA DE ENTRADA DO GÁS; (7) AMOSTRA DE SAÍDA DO GÁS. FONTE: JACOB-LOPES *et al.* (2009).

### 5.2.3. Fotobiorreator de membrana

Segundo Cheng *et al.* (2005), enquanto o efeito da concentração de CO<sub>2</sub> na passagem do fluxo de ar no crescimento algal e a fotossíntese têm sido amplamente estudados do ponto de vista da fisiologia das algas ao longo dos últimos 40 anos, sua influência na fixação do CO<sub>2</sub> não foi totalmente investigada do ponto de vista da engenharia. Além disso, os métodos de alimentação com CO<sub>2</sub> precisam ser aprimorados.

Atualmente, o transporte de ar direto por bolhas tem sido o método mais utilizado no fornecimento de gás em fotobiorreatores comuns. Todavia, a absorção de gases por uma membrana apresenta grande vantagem sobre os métodos convencionais de dispersão de gás, devido à área interfacial surpreendentemente elevada fornecida pela membrana (CHENG *et al.*, 2005).

Em seu estudo, Cheng *et al.* (2005) investigaram os efeitos da concentração de CO<sub>2</sub> e a introdução do módulo de membrana na fixação de CO<sub>2</sub> por microalgas. Para a pesquisa foi utilizado um fotobiorreator de 10 L integrado com um módulo de membrana de fibra oca (Figura 7) para remover o CO<sub>2</sub> do ar, e a microalga utilizada foi a *Chlorella vulgaris*.

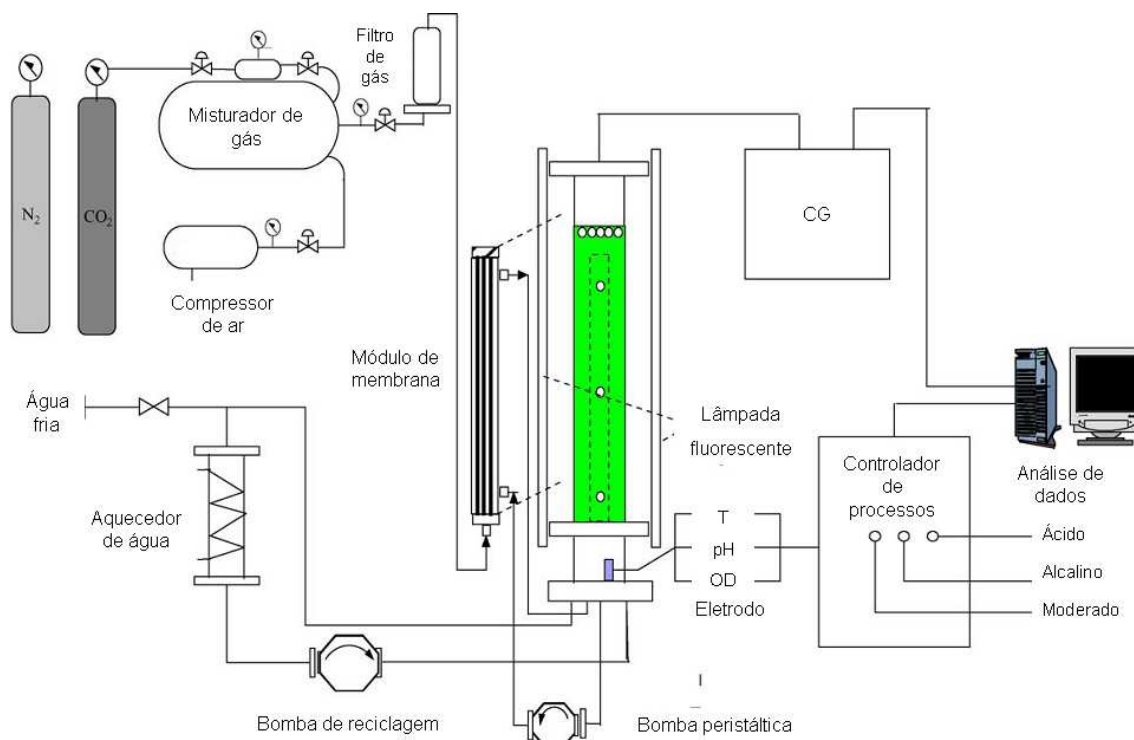


FIGURA 7. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA EXPERIMENTAL DE CULTURA COM *Chlorella vulgaris*. FONTE: CHENG *et al.* (2005).

Foi utilizada no experimento uma fibra oca microporosa de polipropileno. O módulo foi conectado ao fotobiorreator. A mistura da cultura de algas circulou com o auxílio de uma bomba peristáltica e do gás de aeração e, permeando através do tubo de membrana, foi redirecionado da saída de líquido do módulo de membrana para a entrada de gás original do fotobiorreator com um tubo concêntrico (CHENG *et al.*, 2005).

Cheng *et al.* (2005) mostraram que a fixação fotossintética de CO<sub>2</sub> é fortemente dependente da concentração de CO<sub>2</sub> continuamente fornecida durante o crescimento algal. Em um fotobiorreator comum, a taxa máxima de fixação de CO<sub>2</sub> pelas microalgas foi obtida a uma concentração de CO<sub>2</sub> a 1,0%.

Comparado ao fotobiorreator comum, a capacidade de fixação de CO<sub>2</sub> no fotobiorreator de membrana foi reforçada de 80 a 260 mg L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. A membrana de fibra oca, em relação à bolha de gás, mostrou ser uma maneira fácil e eficaz de fornecimento de CO<sub>2</sub> para uma cultura de microalgas e remoção de oxigênio dissolvido formado durante a fotossíntese (CHENG *et al.*, 2005).

Utilizando o ar normal de um ambiente fechado (0,04% de CO<sub>2</sub>) como fonte, a concentração de CO<sub>2</sub> na descarga de gás pode cair para o valor limite de 0,015%, indicando que o fotobiorreator de membrana, pela intensificação do processo de conversão de CO<sub>2</sub> e fixação durante a fotossíntese microalgal, pode ser uma solução promissora na remoção de CO<sub>2</sub> em ambientes fechados (CHENG *et al.*, 2005).

#### 5.2.4. Estimativa imediata de cultivos de microalgas em fotobiorreatores, baseada na medida de oxigênio dissolvido

Um processo de detecção é fundamental para otimizar a produtividade em fotobiorreatores. Através da capacidade de monitorar com precisão a dinâmica do processo, as ações de controle podem ser tomadas em tempo útil para garantir um ambiente ideal no fotobiorreator (XU & SU, 2003).

Em seu trabalho, Xu & Su (2003) tinham como objetivo desenvolver um sistema de detecção eficaz para estimar os parâmetros-chave no cultivo de microalgas em fotobiorreatores. O processo de detecção em fotobiorreatores apresenta desafios únicos, devido ao fato dos processos nos fotobiorreatores serem regidos pela fotossíntese. Além disso, esses processos são tipicamente associados com severas restrições de custo, sendo assim, o uso de equipamentos de sensoriamento complexos é inviável, necessitando abordagens inovadoras para lidar com os problemas na detecção em fotobiorreatores.

Em fotobiorreatores de microalgas, pH, oxigênio dissolvido, temperatura e intensidade de luz são constantemente monitorados. No entanto, a medida destes parâmetros isoladamente, embora seja útil, não fornece muitas informações detalhadas sobre o estado fisiológico do cultivo. Enquanto isso, sensores eletrônicos para medir uma variação de outros parâmetros (como turbidez, a concentração de açúcar e atividades metabólicas) estão disponíveis, mas são bastante onerosos. A fim de controlar múltiplos

parâmetros, uma diversidade de sensores deve ser instalada, tornando esta prática inviável (XU & SU, 2003).

Em seu estudo, Xu & Su (2003) fazem uma abordagem de estimativa de estado para detecção imediata de variáveis-chave em fotobiorreatores de microalgas. Segundo Stephanopoulos & Park (1991) *apud* Xu & Su (2003), a estimativa de estado implica na utilização de modelos de processos juntamente com as medidas dos processos limitados, para fornecer as medidas dos ruídos estatísticos filtrados, as estimativas dos estados do sistema que não são facilmente medidos, e a identificação dos sistemas dinâmicos incertos.

Especificamente, o Filtro de Kalman Estendido (EKF) foi utilizado para fornecer estimativas ideais de estados de cultivos relevantes no fotobiorreator, com base no modelo de processo dinâmico em conjunto com as medidas dos processos imediatamente avaliados (XU & SU, 2003). O Filtro de Kalman é um método recursivo para o problema de filtragem linear. Mesmo sendo restrito à filtragem linear, encontra grande aplicação em problemas não-lineares com o artifício da linearização do filtro em torno de suas estimativas, recebendo a denominação de Filtro de Kalman Estendido (EKF) (MENDONÇA, 2005).

Esta abordagem sensorial requer apenas instrumentação e custos mínimos. Além disso, é versátil o suficiente para que diferentes estados do cultivo possam ser estimados paralelamente, sem a necessidade de equipamentos de sensores complexos. No estudo, o regime de estimativa EKF desenvolvido é capaz de monitorar densidade de biomassa, taxa de crescimento específico, nível de oxigênio dissolvido, eficiência fotossintética (em termos de evolução fotossintética de oxigênio), e intensidade de luz média no reator, com base nas informações de luz incidente e medidas de oxigênio dissolvido imediatas. A microalga marinha *Dunaliella salina* foi utilizada como organismo modelo (XU & SU, 2003).

O estudo demonstra um simples modelo de processo estruturado, juntamente com um modelo de luz semi-empírico, para dar uma representação razoável do processo dinâmico de *D. salina*, embora com o modelo sozinho não seja possível definir com precisão todos os estados de cultivo, especialmente sob cultivos de longa duração e condições variáveis de tempo

de iluminação. Através da incorporação EKF ao modelo, e com base apenas na medida de concentração do oxigênio dissolvido, um estimador de estado foi desenvolvido com sucesso para controlar os principais estados de cultivo de *D. salina*, cultivada em um fotobiorreator de tanque agitado. O estimador foi analisado sob uma ampla série de condições de funcionamento, com períodos curtos (inferior a 15 h) e longos (mais de 100 h), em diferentes níveis de intensidade de luz constantemente incidentes, bem como sob diferentes tempos de intensidades de luz incidente. Este sistema de avaliação do estado oferece um melhor meio de custo-benefício para o monitoramento imediato da dinâmica do processo de cultivos de microalgas em fotobiorreatores, e poderia melhorar substancialmente a produtividade deste processo (XU & SU, 2003).

### 5.3. MEIOS DE CULTURAS ALTERNATIVOS

Os custos com reagentes químicos para elaboração do meio de cultura constituem um dos maiores problemas do cultivo de microalgas (SIPAÚBA-TAVARES, 1995 *apud* BERTOLDI *et al.*, 2008). Segundo Cozza (1999) *apud* Bertoldi *et al.* (2008), o custo do substrato para o cultivo de microrganismos para a produção de proteína unicelular e outros bio-produtos costuma representar de 40 a 60% do custo total.

Segundo Pipes & Gottas (1959), uma alternativa seria aproveitar os processos naturais de purificação que ocorrem em uma lagoa de estabilização de esgoto. O crescimento das algas nas águas residuais parece ser mais atraente do ponto de vista econômico do que o cultivo em massa em meios inorgânicos, já que os nutrientes fornecidos para as algas seriam essencialmente livres e a purificação do efluente pelo processo teria valor agregado.

Dentre os meios de culturas alternativos utilizados para a produção de biomassa de microalgas destacam-se também: efluentes de biodigestores, lodo digerido, despejos industriais purificados, vinhaça de cana-de-açúcar, águas

residuais da produção de azeite de oliva e resíduos da suinocultura (BERTOLDI *et al.*, 2008).

O carbono inorgânico, fundamental para o processo de fotossíntese, constitui fonte relacionada ao pH. Em pH abaixo de 5,0 apenas o CO<sub>2</sub> é consumido pela microalga, entre 7 e 9 o bicarbonato passa a ser importante e acima de 9,5 destaca-se o carbonato. O dióxido de carbono é a fonte de carbono normalmente utilizada, porém, quando empregado acima de 10%, ocorre inibição do crescimento algal (ROUND, 1983 *apud* BERTOLDI *et al.*, 2008).

#### 5.4. LIQUEFAÇÃO TERMOQUÍMICA

A biomassa microalgal pode ser convertida bioquimicamente em formas úteis de várias maneiras. As reações de conversão de energia de biomassa podem ser classificadas em bioquímicas e termoquímicas (Figura 8). As conversões termoquímicas, como a gaseificação, a pirólise e a liquefação, constituem a decomposição térmica de componentes orgânicos da biomassa em produtos combustíveis. A conversão bioquímica pode ser também subdividida em fermentação, digestão anaeróbica, células combustíveis bioeletroquímicas, e outros processos de produção de combustíveis que utilizem o metabolismo dos organismos (TSUKAHARA & SAWAYAMA, 2005).

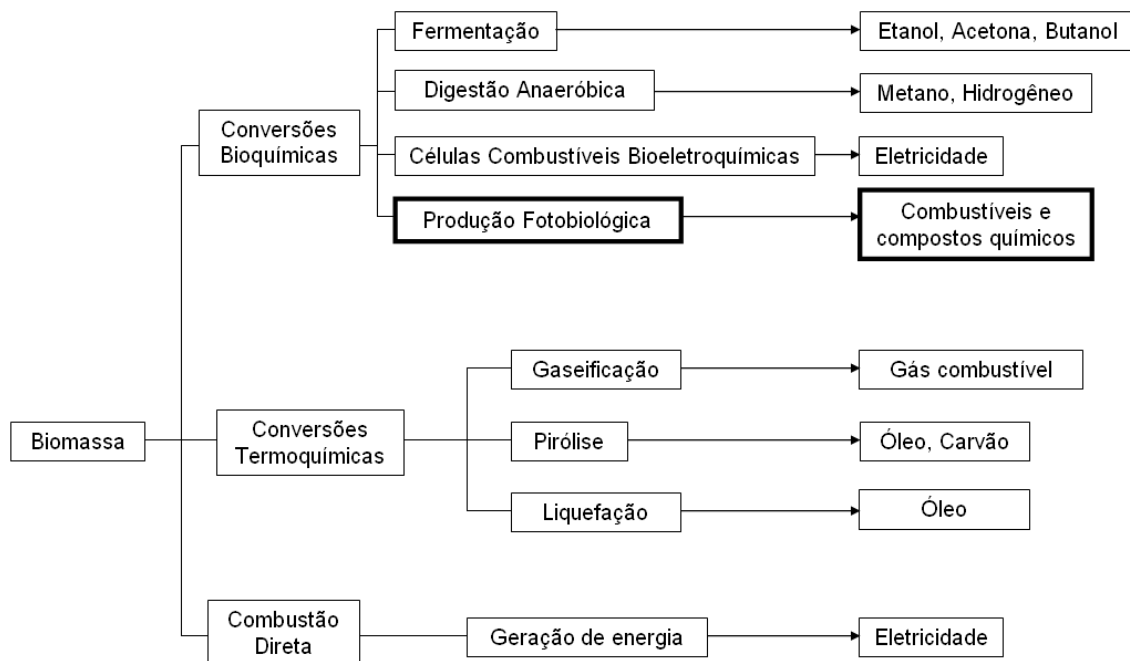


FIGURA 8. PROCESSOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA ALGAL. FONTE: TSUKAHARA & SAWAYAMA (2005).

O balanço energético em todo o processo de cultivo é importante para a produção de energia renovável e para a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> utilizando biomassa (SAWAYAMA *et al.*, 1999).

Em seu estudo sobre balanço energético, Sawayama *et al.* (1999) sugere que o estudo sobre microalgas que consomem baixas quantidades de nutrientes e acumulam materiais altamente calóricos, e de recursos de nutrientes que são produzidos sem desperdício de energia, incentivam a utilização do óleo (energia) a partir de microalgas e auxiliam na mitigação de CO<sub>2</sub>. Neste caso, a liquefação termoquímica tem a vantagem no tratamento de materiais úmidos (conteúdo de água acima de 60%) se comparada à combustão direta, gaseificação e pirólise, por não requerer um processo de secagem (SAWAYAMA *et al.*, 1999).

## 5.5. DESENVOLVIMENTO DA BIOTECNOLOGIA PARA MANIPULAR OS MICRORGANISMOS FOTOSSINTETIZANTES

Os progressos na biotecnologia molecular e celular nos permitem manipular os genes de microrganismos para modificar os caminhos metabólicos ou dar-lhes a capacidade de produzir produtos exógenos (MURAKAMI & IKENOUCI, 1997).

Segundo Murakami & Ikenouchi (1997), a potencialidade da biotecnologia para melhorar a capacidade de fixação de CO<sub>2</sub>, a produção de materiais úteis e a tolerância a fatores ambientais, fornecem um incentivo para promover a investigação sobre o desenvolvimento nesta área. Uma vez que as informações fisiológicas e bioquímicas dos microrganismos são essenciais para o desenvolvimento da biotecnologia, a pesquisa básica em fisiologia e bioquímica tem que ser conduzida juntamente com o desenvolvimento da biotecnologia aplicada.

A engenharia molecular pode, potencialmente, ser usada para: elevar a eficiência fotossintética, permitindo o aumento da produção de biomassa; aumentar a taxa de crescimento de biomassa; aumentar o conteúdo de óleo na biomassa; melhorar a tolerância à temperatura para reduzir a despesa de refrigeração; eliminar o fenômeno de saturação de luz para que o crescimento continue a aumentar em resposta à elevação do nível de luz; reduzir a foto-inibição, que reduz a taxa de crescimento ao meio-dia (fato característico de zonas temperadas e tropicais); reduzir a susceptibilidade à foto-oxidação, responsável por danos às células (CHISTI, 2007).

Segundo Rosenberg *et al.* (2008), em busca de melhores agentes nutracêuticos, de baixo custo de proteínas terapêuticas e biocombustíveis avançados, a inerente capacidade útil das microalgas só será reforçada pela engenharia genética e metabólica. Reconhecendo a importância dessas abordagens moleculares, o domínio da biotecnologia de microalgas merece um contínuo investimento de recursos, tanto na ciência básica como na aplicada.

Na Figura 9 são mostradas vias metabólicas comercialmente importantes em microalgas, através de uma representação esquemática simplificada.

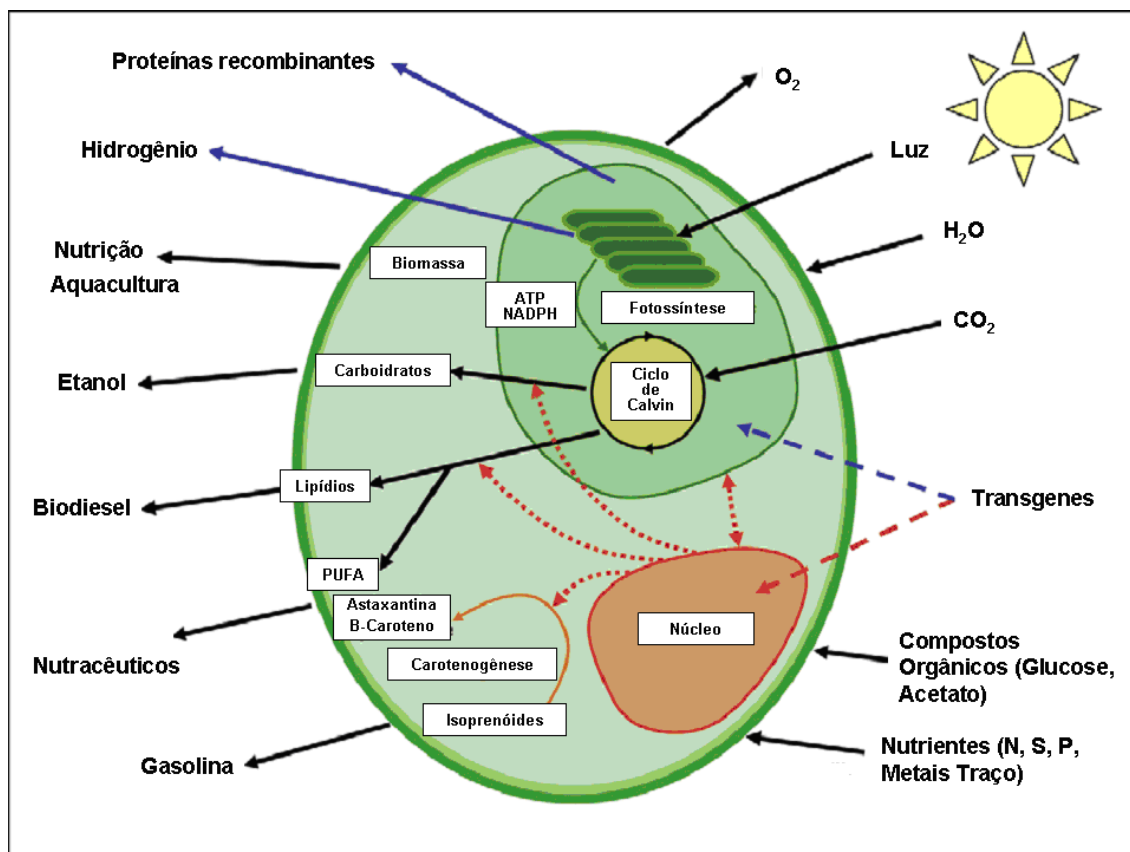


FIGURA 9. VIAS METABÓLICAS COMERCIALMENTE IMPORTANTES EM MICROALGAS. ESSA REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA SIMPLIFICADA MOSTRA CAMINHOS CELULARES ENVOLVIDOS NA BIOSÍNTESE DE VÁRIOS PRODUTOS DERIVADOS DE MICROALGAS. EMBORA O CLOROPLASTO POSSA FUNCIONAR COMO UMA FÁBRICA DE PROTEÍNAS E PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO (LINHA SÓLIDA AZUL), O NÚCLEO TEM UM PAPEL FUNDAMENTAL NO CONTROLE METABÓLICO (LINHA PONTILHADA VERMELHA). AMBAS AS ORGANELAS CONTÊM GENOMAS INDIVIDUAIS, QUE OFERECEM A POSSIBILIDADE DE INCORPORAÇÃO DE TRANSGENES INDEPENDENTES (LINHAS TRACEJADAS AZUL E VERMELHA). FONTE: ROSENBERG *et al.* (2008).

Avanços nas técnicas de transformação genética vão permitir cada vez mais formas sofisticadas de engenharia de rede metabólica a ser realizada. Em conjunto com o desenvolvimento de algas transgênicas, os métodos de proteção contra as indesejadas consequências ambientais serão necessários. Estes mecanismos podem incluir considerações de confinamento em projetos

de fotobiorreatores e incorporação de genes suicidas em organismos geneticamente modificados (ROSENBERG *et al.*, 2008)

### 5.5.1. Proteína HLA3

Devido ao fato da concentração do dióxido de carbono ser fator tão limitante para o desenvolvimento das microalgas, algumas espécies desenvolveram mecanismos para capturar e concentrar o CO<sub>2</sub>, melhorando a eficiência fotossintética e o crescimento (EUREKA! SCIENCE NEWS, 2009).

O pesquisador Martin Spalding – professor e chefe do Departamento de Genética, Desenvolvimento e Biologia Celular da Universidade Estadual de Iowa – e sua equipe já identificaram uma das proteínas-chave nas microalgas, responsáveis pela concentração e transporte do CO<sub>2</sub> dentro das células. A principal proteína identificada por eles, que é responsável pelo transporte do CO<sub>2</sub>, é chamada HLA3. Agora que a proteína HLA3 foi identificada, Spalding acredita que há várias possibilidades de utilização do gene que codifica esta proteína (EUREKA! SCIENCE NEWS, 2009).

Segundo Spalding (2009), a recente explosão de interesse na utilização de microalgas para a produção de biocombustíveis levanta a possibilidade de incremento da fotossíntese e da produtividade em microalgas, aumentando, assim, a expressão de componentes HLA3 e outros mecanismos de concentração de CO<sub>2</sub>.

Uma vez que as algas necessitam de CO<sub>2</sub> para prosperar, a introdução do gene HLA3 em algas que não possuem habilidade significativa de concentração deste gás poderia ajudá-las a crescer mais rapidamente e a capturar o CO<sub>2</sub> de forma mais eficiente (EUREKA! SCIENCE NEWS, 2009).

## 5.6. URÉIA

Uma grande variedade de fontes de nitrogênio, como amônia, nitrato, nitrito e uréia, pode ser utilizada como fonte de nitrogênio para o cultivo de microalgas (BECKER, 1994 *apud* HSIEH & WU, 2009). O uso de amônio como fonte de nitrogênio para *Ellipsoidion* sp. resultou em maior taxa de crescimento e conteúdo lipídico do que na utilização da uréia e nitrato (XU *et al.*, 2001 *apud* HSIEH & WU, 2009). E *Neochloris oleoabundans* cresceu mais rápido e acumulou maior quantidade de lipídios com o nitrato do que com a uréia (LI *et al.* 2008 *apud* HSIEH & WU, 2009), mas a célula cresceu menos em meio com amônio como fonte de nitrogênio. Além disso, muitos estudos indicaram que o nitrato, o amônio e a uréia podem ser utilizados como fontes de nitrogênio para o cultivo de *Spirulina platensis* (HSIEH & WU, 2009). Os resultados mostraram uma influência positiva da uréia no crescimento da *Spirulina*. Contudo, entre as fontes orgânicas de nitrogênio, a uréia ganhou importância geralmente em cultivos de algas de larga escala, devido ao menor custo da uréia em relação aos demais nutrientes nitrogenados (DANESI *et al.* 2002; MATSUDO *et al.* 2009 *apud* HSIEH & WU, 2009). Além disso, a uréia é a melhor fonte de nitrogênio no cultivo de *Chlorella* sp (BECKER, 1994 *apud* HSIEH & WU, 2009).

Neste contexto, Hsieh & Wu (2009) utilizaram a uréia para o cultivo de *Chlorella* sp. em seu estudo sobre cultivo de microalga para produção de óleo. No estudo, foi utilizada uma estratégia de cultivo de limitação de uréia.

Segundo Hsieh & Wu (2009), os modos de cultivo afetam a taxa de crescimento e composição bioquímica das microalgas. A regulação das taxas nutricionais para aumentar a produtividade pode ser realizada por cultivo “fed-batch”.

A fim de melhorar a produção de lipídios, o cultivo “fed-batch” foi testado utilizando-se estratégias como a alimentação intermitente da fonte de nitrogênio (TAKAGI *et al.*, 2000 *apud* HSIEH & WU, 2009). Além disso, em cultivos semi-contínuos, as concentrações de nutrientes têm sido utilizadas

para alterar a composição bioquímica (OTERO *et al.* 1997; FABREGAS *et al.*, 1998 *apud* HSIEH & WU, 2009). No entanto, nenhuma atenção especial tem sido dada à avaliação da estratégia de cultivo de processos semi-contínuos para aumentar a produção de lipídios de cultivo de microalgas (HSIEH & WU, 2009).

A estratégia de cultivo de processo semi-contínuo foi investigada no estudo de Hsieh & Wu (2009), a fim de elevar a produção lipídica de *Chlorella* sp. Primeiro, foi descoberto o efeito das concentrações de uréia no crescimento celular e acúmulo de lipídio no modo “fed-batch”, em seguida, foram investigados os efeitos do momento alimentar e concentração de uréia no crescimento celular e acúmulo de lipídio no cultivo “fed-batch”. Posteriormente, a estratégia de cultivo do processo semi-contínuo foi estabelecida para aumentar a produtividade de lipídios.

Hsieh & Wu (2009) concluíram ao fim de seu estudo que a taxa de crescimento e o acúmulo de lipídios das microalgas foram fortemente relacionados com a concentração de nitrogênio, bem como que as culturas com a quantidade e o momento do suprimento de uréia adequados podem efetivamente melhorar a produção de lipídios das microalgas. Pôde-se inferir também que a produção em massa de lipídios a partir de microalgas para a produção de biocombustível pode ser realizada com sucesso utilizando um processo semi-contínuo com a substituição das quantidades limitadas de uréia durante o cultivo.

## 5.7. METODOLOGIA INTEGRADA

Skjånes *et al.* (2007) propuseram um processo integrado e interdisciplinar, combinando diferentes áreas da tecnologia de algas, para capturar CO<sub>2</sub> e convertê-lo em produtos industriais úteis, que criem receitas econômicas e agreguem valor ao processo de captura. Além disso, é enfatizado um novo método de produção de “bio-hidrogênio”, produzido

diretamente da energia solar, minimizando a necessidade futura de captura de CO<sub>2</sub>.

O processo inovador multidisciplinar descrito combina a fixação de CO<sub>2</sub> utilizando a energia solar, com a produção de H<sub>2</sub> e biomassa composta de biomoléculas de alto valor como subproduto. Com o valor adicional gerado pela produção de H<sub>2</sub> e a utilização da biomassa/ extração de biomolécula espera-se reduzir o custo do processo de captura de CO<sub>2</sub> para um nível economicamente viável. Além disso, a tecnologia proposta pode ser uma alternativa prática em situações onde estratégias convencionais de seqüestro de CO<sub>2</sub> são praticamente impossíveis (SKJÅNES *et al.*, 2007).

A Figura 10 mostra o processo de captura de CO<sub>2</sub> em fotobiorreatores, utilizando-se microalgas para converter o CO<sub>2</sub> produzido industrialmente e a energia solar em biomassa algal através da fotossíntese. A alga é então transferida para um fotobiorreator separado para produção de H<sub>2</sub>, onde irá converter energia solar em H<sub>2</sub>, utilizando um processo biofotolítico sob privação de enxofre (SKJÅNES *et al.*, 2007).

Após a fase de produção de H<sub>2</sub>, a biomassa algal é coletada e direcionada a diferentes fins, tais como: utilização como alimentos para consumo humano e alimentação animal ou na aquicultura. Após a limitação de nutrientes, as algas podem conter grandes quantidades de biomoléculas valiosas, que podem ser extraídas para aplicação farmacêutica ou industrial. No entanto, estas substâncias geralmente representam apenas uma pequena porcentagem da biomassa, restando a maior parte do CO<sub>2</sub> fixado na biomassa remanescente. A biomassa residual das algas, em diferentes fases do processo, pode ser então utilizada como fertilizante para a agricultura, onde o carbono fixado será mantido por alguns anos, ou no armazenamento do CO<sub>2</sub> em aplicações industriais como a produção de plásticos e biopolímeros. A biomassa residual também pode ser utilizada como um potencial de energia por extração de lipídios ou por conversão direta da energia de biomassa através de métodos químicos, biológicos ou térmicos (SKJÅNES *et al.*, 2007).

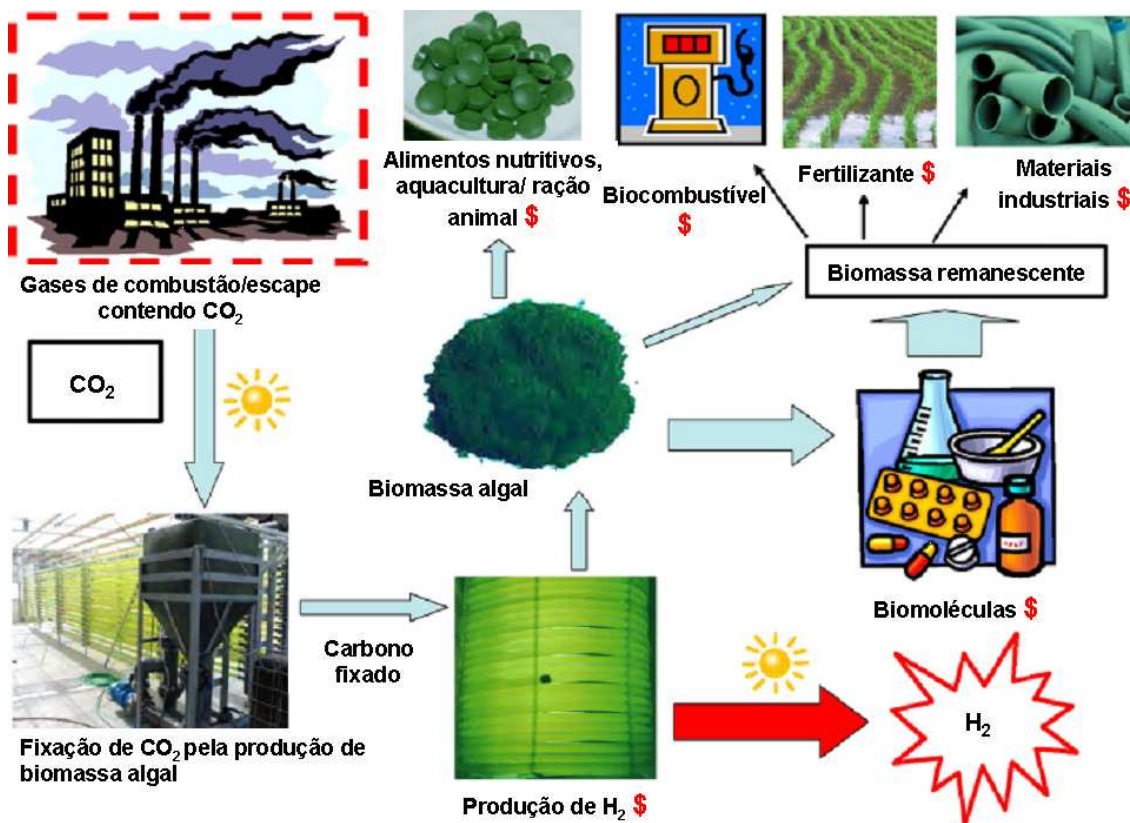


FIGURA 10. ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO INTEGRADO E MULTIDISCIPLINAR DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub> E CONVERSÃO EM PRODUTOS INDUSTRIAIS ÚTEIS, QUE CRIEM RECEITAS ECONÔMICAS E AGREGUEM VALOR AO PROCESSO DE CAPTURA. FONTE: SKJÅNES *et al.* (2007).

As vantagens dos processos descritos são: captura direta do CO<sub>2</sub> dos processos de pré-combustão e pós-combustão; utilização direta da energia solar; produção renovável de H<sub>2</sub>; produção de biomoléculas de alto valor; produção de biomassa de valor, com potencial para utilização como alimento para consumo humano, ração animal/ aquicultura, fertilizante e biocombustíveis; possibilidade de armazenamento de CO<sub>2</sub> fixado em materiais de construção; receitas dos processos que reduzem significativamente o custo da captura de CO<sub>2</sub>; facilidade no manuseio da biomassa residual em produto final; conversão de energia solar em H<sub>2</sub>, minimizando as necessidades de futuras capturas de CO<sub>2</sub> (SKJÅNES *et al.*, 2007).

Segundo Skjånes *et al.* (2007), o H<sub>2</sub> é considerado uma fonte de energia para o futuro, devido aos efeitos benéficos de seu consumo para o ambiente. Atualmente, no entanto, o H<sub>2</sub> é produzido principalmente a partir do gás natural, deixando CO<sub>2</sub> como um resíduo, o qual apresenta alto custo para ser

sequestrado. Neste contexto, deve-se destacar a existência de tecnologias emergentes promissoras que, em certos casos, podem fazer uso industrial do CO<sub>2</sub> capturado ou até mesmo a reutilização na fotossíntese das microalgas.

A radiação solar é a fonte de energia mais abundante disponível, sendo a produção de H<sub>2</sub> a partir da energia solar e da água uma opção amigável e atraente do ponto de vista ambiental, e que acabará sendo uma das únicas opções restantes à nossa sociedade quando as reservas de combustíveis fósseis se esgotarem (SKJÅNES *et al.*, 2007).

As algas verdes são conhecidas por produzirem grandes quantidades de gás H<sub>2</sub> sob limitação de enxofre em um processo chamado bio-fotólise, onde a energia solar é utilizada para fracionar a água e gerar H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> (SKJÅNES *et al.*, 2007). Privar a células de algas do enxofre leva à parcial inativação do fotossistema II nos cloroplastos, fazendo com que o cultivo se torne anaeróbico (ANTAL *et al.* 2003, *apud* SKJÅNES *et al.*, 2007), e o ciclo de Calvin, responsável pela produção de biomassa, é inativo (ZHANG *et al.*, 2002 *apud* SKJÅNES *et al.*, 2007). Wykoff *et al.* (1998), em seu estudo com a microalga *C. reinhardtii*, demonstram que os efeitos da privação de P são semelhantes aos da privação de S, causando alterações similares no transporte de elétrons na fotossíntese.

Estes passos forçam o organismo a produzir H<sub>2</sub> como um meio para diminuir o excesso de energia absorvida, que poderia danificar a célula. Em um processo de produção prática de H<sub>2</sub>, as algas verdes primeiro serão cultivadas sob radiação solar, fixando o CO<sub>2</sub> pela fotossíntese natural. Na próxima fase, as algas serão privadas de enxofre e a fotossíntese será então parcialmente inativa, redirecionando para que a energia solar possa ser utilizada na produção de H<sub>2</sub> em vez de construir biomassa (SKJÅNES *et al.*, 2007).

Skjånes *et al.* (2007) propõe uma posterior exploração da biomassa e das possibilidades de manutenção ou armazenamento do CO<sub>2</sub> fixado. Neste contexto, a limitação de nutrientes das algas é sugerida para aumentar o conteúdo celular de biomoléculas valiosas, bem como o seu poder calorífico (na forma de acúmulo de lipídio nas algas, sob limitação de N).

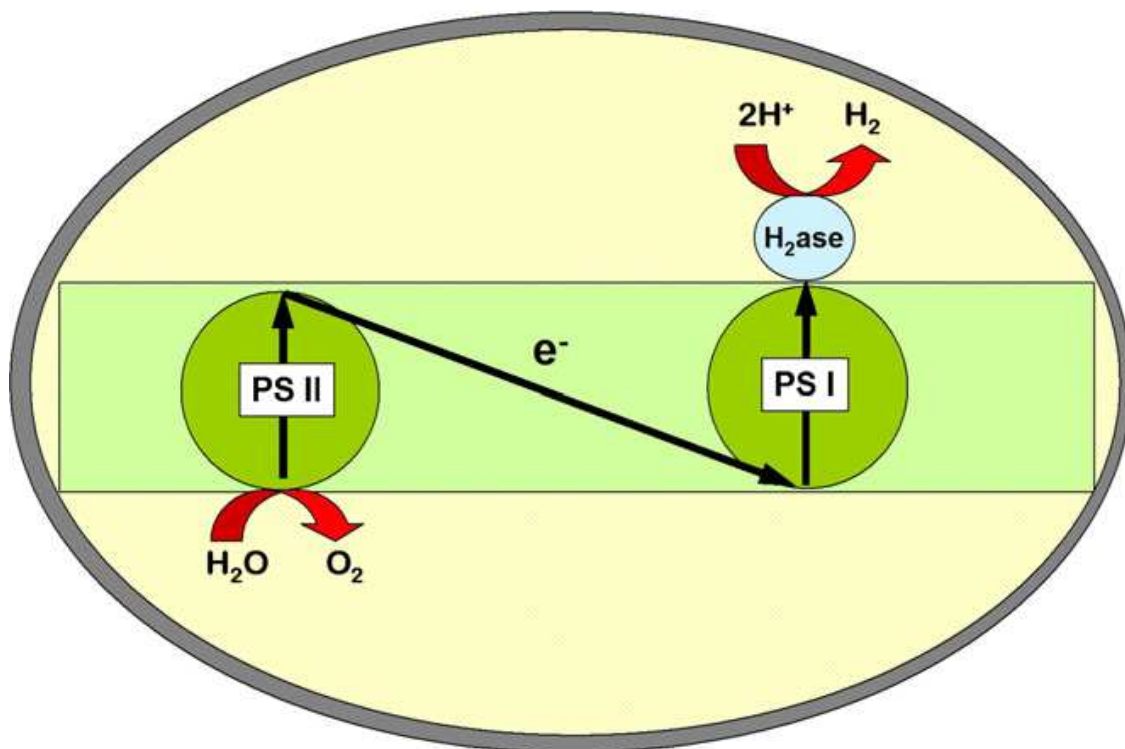


FIGURA 11. APRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MECANISMO DE PRODUÇÃO DE  $H_2$  POR BIOFOTÓLISE DE ALGAS VERDES. ELÉTRONS DA SEPARAÇÃO DA ÁGUA NO FOTOSSISTEMA II SÃO TRANSPORTADOS ATRAVÉS DA CADEIA DE TRANSPORTE DE ELÉTRONS NAS MEMBRANAS TILACÓIDES UTILIZANDO A ENERGIA SOLAR. OS ELÉTRONS SÃO ENTÃO UTILIZADOS PELA ENZIMA HIDROGENASE PARA REDUZIR PRÓTONS A  $H_2$ , QUE É LIBERADO DA CÉLULA. ESTA VÁLVULA DE SEGURANÇA EVITA DANO OXIDATIVO DA CÉLULA DURANTE CONDIÇÕES DE ESTRESSE, E PODE SER EXPLORADA COMO UMA FORMA DE CONVERTER ENERGIA SOLAR EM  $H_2$ . FONTE: SKJÅNES *et al.* (2007).

Segundo Skjånes *et al.* (2007), para maximizar a eficiência do processo econômico e energético, no contexto da metodologia integrada, será necessário o uso de espécies de algas com altos níveis de fixação de  $CO_2$  e eficiência de conversão de energia solar, e que sejam capazes de converter energia solar em  $H_2$  (Figura 11), além de ter a capacidade de produzir grande quantidade de biomoléculas valiosas. Isso pode ser obtido por identificação de linhagens selvagens com capacidade ideal ou pela construção de organismos metabolicamente alterados.

O processo integrado proposto pode complementar os atuais métodos físico-químicos em uso para captura e armazenamento de  $CO_2$ , que geralmente são caros e nem sempre práticos. Ao contrário, a biomassa algal é uma forma de fixação de  $CO_2$  que pode ser facilmente manipulada e transportada, sem riscos de liberação. Além disso, a metodologia proposta

utiliza energia solar para a produção de H<sub>2</sub>, que contribui para redução dos requisitos para captura de CO<sub>2</sub> e armazenamento futuro. Ao explorar todo o potencial dos produtos comerciais derivados da biomassa algal, este pode tornar-se um processo de receitas positivas, com múltiplas oportunidades para o desenvolvimento econômico (SKJÅNES *et al.*, 2007).

## 5.8. CONTEÚDO LIPÍDICO E PRODUTIVIDADE EM DIFERENTES ESPÉCIES DE MICROALGAS

O teor de lipídios das microalgas varia entre 1 e 70%, mas sob certas condições, algumas espécies podem chegar a 90% do peso seco. A Tabela 2 apresenta o conteúdo lipídico e o perfil lipídico e de produtividade de biomassa de diferentes espécies de microalgas marinhas e de água doce, mostrando diferenças significativas entre elas (MATA *et al.*, 2009).

Conforme demonstrado na Tabela 2, o teor de óleo nas microalgas pode chegar a 75% peso da biomassa seca, mas associado com baixa produtividade (por exemplo, para *Botryococcus braunii*). As algas mais comuns (*Chlorella*, *Cryptocodinium*, *Cylindrotheca*, *Dunaliella*, *Isochrysis*, *Nannochloris*, *Nannochloropsis*, *Neochloris*, *Nitzschia*, *Phaeodactylum*, *Porphyridium*, *Schizochytrium*, *Tetraselmis*) apresentam níveis de óleo entre 20 e 50%, mas produtividades mais elevadas podem ser alcançadas (MATA *et al.*, 2009).

Segundo Mata *et al.* (2009), a *Chlorella* parece ser uma boa opção para produção de biodiesel. No entanto, como outras espécies são tão eficientes e produtivas como esta, a seleção das espécies mais adequadas às necessidades deve levar em conta outros fatores, como, por exemplo, a capacidade das microalgas para se desenvolver utilizando os nutrientes disponíveis ou em condições de ambientes específicos. Desta forma, todos estes parâmetros devem ser considerados simultaneamente na seleção das espécies ou linhagens mais adequadas para a produção de biodiesel.

Também é importante a composição dos ácidos graxos das diferentes espécies de microalgas, já que eles podem ter um efeito significativo sobre as características do biodiesel produzido. Estes são compostos de ácidos graxos saturados e insaturados, com 12 a 22 átomos de carbono, alguns deles de famílias  $\omega 3$  e  $\omega 6$ . Diferentes fatores nutricionais e ambientais, condições de cultivo e fases de crescimento podem afetar a composição destes compostos (MATA *et al.*, 2009).

Segundo Lourenço (2008), se uma matriz tem baixa concentração de lipídios, é necessário acumular mais massa através de técnicas de manipulação das condições de cultivo, alterando a composição química nos meios de cultura, e aumentando a concentração de lipídios.

TABELA 2. CONTEÚDO LIPÍDICO E PRODUTIVIDADE LIPÍDICA, DE BIOMASSA E DE BIOMASSA POR ÁREA EM DIFERENTES ESPÉCIES DE MICROALGAS.

| <b>Espécies de microalgas marinhas e de água doce</b> | <b>Conteúdo lipídico (% biomassa peso seco)</b> | <b>Produtividade lipídica (mg/L/dia)</b> | <b>Produtividade volumétrica de biomassa (g/L/dia)</b> | <b>Produtividade de biomassa por área (g/m<sup>2</sup>/dia)</b> |
|---|---|--|--|---|
| <i>Ankistrodesmus</i> sp.                             | 24,0-31,0                                       | -  | -  | 11,5-17,4   |
| <i>Botryococcus braunii</i>                           | 25,0-75,0                                       | -  | 0,02   | 3,0   |
| <i>Chaetoceros muelleri</i>                           | 33,6  | 21,8                                     | 0,07   | -   |
| <i>Chaetoceros calcitrans</i>                         | 14,6-16,4/39,8                                  | 17,6                                     | 0,04   | -   |
| <i>Chlorella emersonii</i>                            | 25,0-63,0                                       | 10,3-50,0                                | 0,036-0,041  | 0,91-0,97   |
| <i>Chlorella protothecoides</i>                       | 14,6-57,8                                       | 1214                                     | 2,00-7,70  | -   |
| <i>Chlorella sorokiniana</i>                          | 19,0-22,0                                       | 44,7                                     | 0,23-1,47  | -   |
| <i>Chlorella vulgaris</i>                             | 5,0-58,0  | 11,2-40,0                                | 0,02-0,20  | 0,57-0,95   |
| <i>Chlorella</i> sp.                                  | 10,0-48,0                                       | 4201,0                                   | 0,02-2,50  | 1,61-16,47/25   |
| <i>Chlorella pyrenoidosa</i>                          | 2,0   | -  | 2,90-3,64  | 7205/130  |
| <i>Chlorella</i>                                      | 18,0-57,0                                       | 18,7                                     | -  | 3,5-13,9  |
| <i>Chlorococcum</i> sp.                               | 19,3  | 5307,0                                   | 0,28   | -   |
| <i>Cryptocodinium cohnii</i>                          | 20,0-51,1                                       | -  | 10,00  | -   |
| <i>Dunaliella salina</i>                              | 6,0-25,0  | 116,0                                    | 0,22-0,34  | 1,6-3,5/20-38   |
| <i>Dunaliella primolecta</i>                          | 23,1  | -  | 0,09   | 14,0  |
| <i>Dunaliella tertiolecta</i>                         | 16,7-71,0                                       | -  | 0,12   | -   |
| <i>Dunaliella</i> sp.                                 | 17,5-67,0                                       | 33,5                                     | -  | -   |
| <i>Ellipsoidion</i> sp.                               | 27,4  | 47,3                                     | 0,17   | -   |
| <i>Euglena gracilis</i>                               | 14,0-20,0                                       | -  | 7,70   | -   |
| <i>Haematococcus pluvialis</i>                        | 25,0  | -  | 0,05-0,06  | 10,2-36,4   |
| <i>Isochrysis galbana</i>                             | 7,0-40,0  | -  | 0,32-1,60  | -   |
| <i>Isochrysis</i> sp.                                 | 7,1-33,0  | 37,8                                     | 0,08-0,17  | -   |
| <i>Monodus subterraneus</i>                           | 16,0  | 30,4                                     | 0,19   | -   |
| <i>Monallanthus salina</i>                            | 20,0-22,0                                       | -  | 0,08   | 12,0  |
| <i>Nannochloris</i> sp.                               | 20,0-56,0                                       | 60,9-76,5                                | 0,17-0,51  | -   |
| <i>Nannochloropsis oculata</i>                        | 22,7-29,7                                       | 84,0-142,0                               | 0,37-0,48  | -   |
| <i>Nannochloropsis</i> sp.                            | 12,0-53,0                                       | 37,6-90,0                                | 0,17-1,43  | 1,9-5,3   |
| <i>Neochloris oleoabundans</i>                        | 29,0-65,0                                       | 90,0-134,0                               | -  | -   |
| <i>Nitzschia</i> sp.                                  | 16,0-47,0                                       | -  | -  | 8,8-21,6  |
| <i>Oocystis pusilla</i>                               | 10,5  | -  | -  | 40,6-45,8   |
| <i>Pavlova salina</i>                                 | 30,9  | 49,4                                     | 0,16   | -   |
| <i>Pavlova lutheri</i>                                | 35,5  | 40,2                                     | 0,14   | -   |
| <i>Phaeodactylum tricornutum</i>                      | 18,0-57,0                                       | 44,8                                     | 0,0003-1,90  | 2,4-21  |
| <i>Porphyridium cruentum</i>                          | 9-18,8/60,7                                     | 34,8                                     | 0,36-1,5   | 25,0  |
| <i>Scenedesmus obliquus</i>                           | 11,0-55,0                                       | -  | 0,004-0,74   | -   |
| <i>Scenedesmus quadricauda</i>                        | 1,9-18,4  | 35,1                                     | 0,19   | -   |
| <i>Scenedesmus</i> sp.                                | 19,6-21,1                                       | 40,8-53,9                                | 0,03-0,26  | 2,43-13,52  |
| <i>Skeletonema</i> sp.                                | 13,3-31,8                                       | 27,3                                     | 0,09   | -   |
| <i>Skeletonema costatum</i>                           | 13,5-51,3                                       | 17,4                                     | 0,08   | -   |
| <i>Spirulina platensis</i>                            | 4,0-16,6  | -  | 0,06-4,30  | 1,5-14,5/24-51  |
| <i>Spirulina maxima</i>                               | 4,0-9,0   | -  | 0,21-0,25  | 25,0  |
| <i>Thalassiosira pseudonana</i>                       | 20,6  | 17,4                                     | 0,08   | -   |
| <i>Tetraselmis suecica</i>                            | 8,5-23,0  | 27,0-36,4                                | 0,12-0,32  | 19,0  |
| <i>Tetraselmis</i> sp.                                | 12,6-14,7                                       | 43,4                                     | 0,30   | -   |

FONTE: MATA *et al.* (2009).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando grande parte do mundo está caminhando no sentido de preservar o meio ambiente, as microalgas tendem a ser uma alternativa promissora para atingir o desenvolvimento sustentável, aliando formas de captura de CO<sub>2</sub>, recuperação de ambientes degradados, produção de inúmeros compostos de interesse e geração de energia “limpa”. Além disso, as microalgas apresentam vantagens como: economia de água; facilidade de cultivo em massa; grande aproveitamento do espaço de cultivo e rápido crescimento e acúmulo de biomassa vegetal.

No presente estudo, através de um levantamento bibliográfico, foram identificados diferentes métodos que tornam mais eficiente o aproveitamento do CO<sub>2</sub> pelas microalgas. Distintos métodos de cultivo foram apresentados, bem como modelos de fotobiorreatores otimizados, com diferentes configurações e modos operacionais, para facilitar e viabilizar o cultivo de microalgas em larga escala. Além disso, meios de cultura alternativos e a sugestão de uma metodologia integrada foram apresentados, a fim de, entre outros fatores, reduzir os custos de produção e remediar ambientes degradados. A metodologia integrada de produção de microalgas destaca as amplas possibilidades de aplicações destes organismos, aplicações estas que, do ponto de vista biotecnológico, não são muito estudadas, representando grande oportunidade para novas descobertas.

Em relação ao desenvolvimento da biotecnologia para manipular os microrganismos fotossintetizantes, esta proposta é citada como mais uma alternativa na busca de microalgas mais eficientes à produção em larga escala, não cabendo ao presente estudo discutir sobre as possíveis consequências desta prática. Para tal, seria necessário realizar estudos à parte, tratando deste tema em particular.

Quanto à produção do biodiesel, pode-se dizer que o levantamento do conteúdo de óleo a partir de microalgas não é fator determinante na escolha das espécies-alvo. Atualmente, este tipo de estudo, se considerado isoladamente, é insuficiente na determinação de espécies ou linhagens

adequadas para este fim. Faz-se necessário então, considerar, de forma simultânea, parâmetros como a capacidade das microalgas para se desenvolver utilizando os nutrientes disponíveis ou em condições de ambientes específicos, bem como conhecer a composição dos ácidos graxos de determinadas espécies. Além disso, para viabilizar a produção do biocombustível, é indispensável a aplicação de técnicas que melhorem o desenvolvimento desses organismos e reduzam os custos do processo de produção.

Finalmente, para a produção de microalgas se tornar economicamente viável em larga escala, é necessário um estudo contínuo nesta área, através da ampliação do conhecimento acerca desses organismos, adaptação dos métodos existentes e desenvolvimento de tecnologia pertinente.

## 7. REFERÊNCIAS

AWI - Alfred-Wegener-Institut. **Fotobiorreator tubular**. 1 fotografia, color. Disponível em: <[http://www.awi.de/de/forschung/neue\\_technologien/marine\\_aquaculture\\_maritime\\_technologies\\_and\\_iczm/education\\_and\\_qualification/bachelor\\_thesis/bachelor\\_viii/](http://www.awi.de/de/forschung/neue_technologien/marine_aquaculture_maritime_technologies_and_iczm/education_and_qualification/bachelor_thesis/bachelor_viii/)>. Acesso em: 26 jun. 2009.

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

BERTOLDI, F. C.; SANT'ANNA, E.; OLIVEIRA, J. L. B. Revisão: Biotecnologia de microalgas. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos (CEPPA)**, Curitiba, v. 26, n. 1, p. 9-20, jan-jun, 2008.

BIOLATINA. **Transesterificação**. 2009. Disponível em: <[http://www.biodieselatina.com.br/default.asp?site\\_Acao=mostraPagina&paginaId=1953](http://www.biodieselatina.com.br/default.asp?site_Acao=mostraPagina&paginaId=1953)>. Acesso em: 20 out. 2009.

BORGES, L. V. **Caracterização do potencial de absorção do dióxido de carbono atmosférico por microalgas utilizadas na aquicultura para a geração de um mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL)**. 57p. Dissertação (Mestrado em Aquicultura) – Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2005.

BRANDINI, F. P. Biodiesel, a bola da vez. **O Eco**, 11 out. 2007. Disponível em <<http://arruda.rits.org.br/oeco/servlet/newstorm.ns.presentation.NavigationServlet?publicationCode=6&pageCode=104&textCode=24021>>. Acesso em: 21 mai. 2008.

CARIOCA, J. O. Investigadores criam biodiesel a partir de microalgas. **Ciência Hoje**, 29 out. 2009. Disponível em: <<http://www.cienciahoje.pt/index.php?oid=33748&op=all>>. Acesso em: 18 set. 2009.

CHAE, S. R.; HWANG, E. J.; SHIN, H. S. Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 322-329, 2005.

CHENG, L.; ZHANG, L.; CHEN, H.; GAO, C. Carbon dioxide removal from air by microalgae cultured in a membrane-photobioreactor. **Separation and Purification Technology**, v. 50, p. 324-329, 2005.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, v. 25, p. 294-306, 2007.

COSTA, T. P. M.; PACÍFICO, J. A.; SILVA, A. M. Redução catalítica de compostos poluentes (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S e VOCs) produzidos por indústrias petrolíferas em unidades de FCC. In: XI CONGRESSO REGIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA QUÍMICA (COREEQ), 2006, Natal. **Anais do XI Congresso Regional de Estudantes de Engenharia Química**. Natal: UFRN, v. 1, 2006.

DAWES, C. J. **Marine botany**. 2<sup>nd</sup> edition. Florida: John Wiley & Sons, 1998.

EUREKA! SCIENCE NEWS. **ISU researcher identifies protein that concentrates carbon dioxide in algae**. 2009. Disponível em: <<http://esciencenews.com/articles/2009/04/09/isu.researcher.identifies.protein.concentrates.carbon.dioxide.algae>>. Acesso em: 14 out. 2009.

FALKOWSKI, P. G., RAVEN, J. A. **Aquatic Photosynthesis**. USA: Blackwell Science, 1997.

HR BIOPETROLEUM. **Core technology**. 2008. Disponível em: <<http://www.hrbp.com/Technology/CoreTech.html>>. Acesso em: 19 set. 2009.

HSIEH, C. H.; WU, W. T. Cultivation of microalgae for oil production with a cultivation strategy of urea limitation. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 3921-3926, 2009.

HUNTLEY, M. E.; REDALJE, D. G. CO<sub>2</sub> mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, 36 p., 2006.

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

JACOB-LOPES, E.; SILVA, L. M. C. F. L.; SCOPARO, C. H.; FRANCO, T. T. Análise cinética de remoção de dióxido de carbono em fotobiorreatores pelo método das velocidades iniciais. In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2007, Belo Horizonte. **24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 2007.

KADAM, K. L. Power plant flue gas as a source of CO<sub>2</sub> for microalgae cultivation: economic impact of different process options. **Energy Conversion and Management**, v. 38, p. 505-510, 1997.

LOURENÇO, S. O. In: BARBOSA, L. Biodiesel de microalgas. **Federação Nacional dos Engenheiros (FNE)**, ed. 82, 2009. Disponível em: <[http://www.fne.org.br/fne/index.php/fne/jornal/edicao\\_82\\_mar\\_09/biodiesel\\_de\\_microalgas](http://www.fne.org.br/fne/index.php/fne/jornal/edicao_82_mar_09/biodiesel_de_microalgas)>. Acesso em: 29 out. 2009.

LOURENÇO, S. O. In: CASTILHOS, W. Brasil investe no biodiesel de microalgas. **Mercado Ético**, 11 dez. 2008. Disponível em: <<http://mercadoetico.terra.com.br/arquivo/brasil-investe-no-desenvolvimento-do-biodiesel-de-microalgas/>>. Acesso em: 29 out. 2009.

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.

MENDONÇA, C. B. **Análise de Compatibilidade de Dados de Ensaio em Vôo e Calibração dos Dados do Ar em Tempo Real com Filtragem Estocástica Adaptativa**. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

MORAIS, M. G.; COSTA, J. A. V. Perfil de Ácidos Graxos de Microalgas Cultivadas com Dióxido de Carbono. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1245-1251, jul./ ago., 2008.

MULITERNO, A.; MOSELE, P. C.; COSTA, J. A. V.; HEMKEMEIER, M.; BERTOLIN, T. E.; COLLA, L. M. Cultivo mixotrófico da microalga *Spirulina platensis* em batelada alimentada. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, vol. 29, n. 6, 2005.

MURAKAMI, M.; IKENOUCI, M. The biological CO<sub>2</sub> fixation and utilization project by RITE (2) – Screening and Breeding of Microalgae with High Capability in Fixing CO<sub>2</sub>. **Energy Conversion and Management**, v. 38, 1997.

NEENAN, B.; FEINBERG, D.; HILL, A.; McINTOSH, R.; TERRY, K. Fuels from microalgae: technology status, potential, and research requirements. **Solar Energy Research Institute**, Colorado, 172 p., 1986.

OLAIZOLA, M. Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace. **Biomolecular Engineering**, v. 20, p. 459-466, 2003.

PACKER, M. Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy. **Energy Policy**, v. 37, p. 3428-3437, 2009.

PIPES, W. O.; GOTTAS, H. B. Utilization of Organic Matter by Chlorella Grown in Sewage. **Northwestern Technological Institute**, Evanston, Illinois, 1959.

PRIBADI, K. S. Development of Scaleable Algae Production System for Biological CO<sub>2</sub> Sequestering and Production of Bio-Fuel. **PT Medco Downstream Indonesia**, Indonésia, 2009.

RADMANN, E. M.; COSTA, J. A. V. Conteúdo lipídico e composição de ácidos graxos de microalgas expostas aos gases CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e NO. **Química Nova**, v. 31, n. 7, p. 1609-1612, 2008.

RAVEN, J. A. In: BOROWITZKA, M. A.; BOROWITZKA, L. J. Limits to growth. **Microalgae Biotechnology**, Cambridge University, p. 331-356, 1988.

ROSENBERG, J. N.; OYLER, G. A.; WILKINSON, L.; BETENBAUGH, M. J. A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 19, p. 430-436, 2008.

SASTRE, R. R.; CSÖGÖR, Z.; PERNER-NOCHTA, I.; FLECK-SCHNEIDER, P.; POSTEN, C. Scale-down of microalgae cultivations in tubular photo-bioreactors - A conceptual approach. **Journal of Biotechnology**, v. 132, p. 127-133, 2007.

SAWAYAMA, S.; MINOWA, T.; YOKOYAMA, S-Y. Possibility of renewable energy production and CO<sub>2</sub> mitigation by thermochemical liquefaction of microalgae. **Biomass and Bioenergy**, v. 17, p. 33-39, 1999.

SEIBER, J. N. Química agrícola e bioenergia. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, 2007.

SILVA FILHO, A. C.; LIMA, F. G. Usando o método de Monte Carlo para encontrar raízes de equações. In: IX ENCONTRO DE PESQUISADORES DO UNI-FACEF, 2008, Franca. **IX Encontro de pesquisadores do Uni-FACEF**. Franca: Centro Universitário de Franca, 7 p., 2008.

SKJÅNES, K.; LINDBLAD, P.; MULLER, J. BioCO<sub>2</sub> – A multidisciplinary, biological approach using solar energy to capture CO<sub>2</sub> while producing H<sub>2</sub> and high value products. **Biomolecular Engineering**, v. 24, p. 405-413, 2007.

SOYAMA, P. Sequestro de carbono torna-se mais eficiente com biorreator. **Com Ciência**, 17 abr. 2006. Disponível em: <<http://www.gaia-movement.org/Article.asp?TxtID=417&SubMenuItemID=136&MenuItemID=55>>. Acesso em: 26 jun. 2009.

SPALDING, M. ISU researcher identifies protein that concentrates carbon dioxide in algae. **Eureka! Science News**, 2009. Disponível em: <<http://esciencenews.com/articles/2009/04/09/isu.researcher.identifies.protein.concentrates.carbon.dioxide.algae>>. Acesso em: 14 out. 2009.

TEIXEIRA, P. C. N.; TEIXEIRA, C. M. L. L. Potencial de Geração de Biocombustíveis a Partir de Microalgas. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE AGROENERGIA (CONAE), dez. 2006, Londrina. **Conferência Nacional de Agroenergia**. Londrina: 4 p., dez. 2006.

TSUKAHARA, K. SAWYAMA, S. Liquid fuel production using microalgae. **Journal of the Japan Petroleum Institute**, v. 48, p. 251-259, 2005.

WEN, Z.; JOHNSON, M. B. Microalgae as a Feedstock for Biofuel Production. **Virginia Cooperative Extension**, 7 p., 2009.

WYKOFF, D. D.; DAVIES, J. P.; MELIS, A.; GROSSMAN, A. R. The Regulation of Photosynthetic Electron Transport during Nutrient Deprivation in *Chlamydomonas reinhardtii*. **Plant Physiology**, v. 117, p. 129–139, 1998.

XU, J. L.; SU, W. W. Online estimation of stirred-tank microalgal photobioreactor cultures based on dissolved oxygen measurement. **Biochemical Engineering Journal**, v. 14, p. 51–65, 2003.

YANG, C.; HUA, Q.; SHIMIZU, K. Energetics and carbon metabolism during growth of microalgal cells under photoautotrophic, mixotrophic and cyclic light-autotrophic/dark-heterotrophic conditions. **Biochemical Engineering Journal**, v. 6, p. 87-102, 2000.

ZEILER, K. G.; HEACOX, D. A.; TOON, H. S.; KADAM, K. L.; BROWN, L. M. The use of microalgae for assimilation and utilization of carbon dioxide from fossil fuel-fired power plant flue gas. **Energy Convers**, v. 36, p. 707-712, 1995.