

DOSSIÊ TÉCNICO

Cultivo de microalgas

Lucas Gomes Rocha

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais /
CETEC

Agosto
2012

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 3 |
| 2 APLICAÇÃO COMERCIAL DAS MICROALGAS..... | 4 |
| 2.1 APLICAÇÕES NA ÁREA AMBIENTAL | 5 |
| 2.2 APLICAÇÃO COMO BIOCOMBUSTÍVEL..... | 6 |
| 3 CULTIVO DAS MICROALGAS..... | 7 |
| 3.1 SISTEMAS ABERTOS | 8 |
| 3.2 SISTEMAS FECHADOS (FOTOBIOREACTORES) | 10 |
| 3.2.1 FOTOBIOREACTORES DE PLACAS..... | 10 |
| 3.2.2 FOTOBIOREACTORES TUBULARES..... | 10 |
| 3.2.3 FOTOBIOREACTORES DE TANQUES AGITADOS | 11 |
| 3.2.4 FOTOBIOREACTORES <i>AIRLIFT</i> | 12 |
| 4 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA O CULTIVO DE MICROALGAS..... | 12 |
| 4.1 LUZ..... | 13 |
| 4.2 TEMPERATURA | 13 |
| 4.3 PH | 13 |
| 4.4 AGITAÇÃO E AERAÇÃO DA CULTURA..... | 14 |
| 4.5 ÁGUA..... | 14 |
| 5 FATORES NUTRICIONAIS DAS MICROALGAS..... | 14 |
| 5.1 CARBONO | 15 |
| 5.2 NITROGÊNIO..... | 15 |
| 5.3 FÓSFORO | 15 |
| 5.4 OUTROS MACRONUTRIENTES | 15 |
| 5.5 MICRONUTRIENTES..... | 16 |
| 5.6 VITAMINAS | 16 |
| 5.7 QUELANTES | 16 |
| 6 MÉTODOS DE COLHEITA DE MICROALGAS E DE EXTRAÇÃO DE ÓLEO | 16 |
| 6.1 CENTRIFUGAÇÃO..... | 17 |
| 6.2 SEDIMENTAÇÃO POR GRAVIDADE | 17 |
| 6.3 FLOCULAÇÃO | 18 |
| 6.4 PENEIRAMENTO..... | 18 |
| 6.5 FILTRAÇÃO..... | 18 |
| 6.6 PROCESSO ELETROLÍTICO | 19 |
| 6.7 COLHEITA POR FLOTAÇÃO | 19 |
| 7 MEDIDAS DE CRESCIMENTO DAS MICROALGAS..... | 19 |
| CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 20 |
| REFERÊNCIAS | 20 |

Título

Cultivo de microalgas

Resumo

Neste dossiê são abordadas informações sobre as principais aplicações comerciais das microalgas, como é realizado o cultivo destes organismos em sistemas abertos e fechados, os principais fatores físicos, químicos e nutricionais envolvidos no cultivo e os métodos de colheita e extração do óleo.

Palavras-chave

Alga; alimentação complementar; biocombustível; microalga; nutrição animal

Assunto

Cultivo de algas em água doce

Conteúdo

1 INTRODUÇÃO

As microalgas são organismos microscópicos fotossintetizantes que crescem rapidamente e em diferentes condições ambientais devido a sua estrutura celular simples, unicelular ou multicelular (KOCHEM, 2010).

As microalgas pertencem a um grupo muito heterogêneo de organismos, predominantemente aquáticos e geralmente microscópicos unicelulares, que podem formar colônia, com pouca ou nenhuma diferenciação celular (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2001).

São caracterizadas pela presença de pigmentos, responsáveis por coloração variada e por mecanismo fotoautotrófico. Filogeneticamente, as microalgas são compostas de espécies procarióticas ou eucarióticas, antigas ou mais recentes, conforme o período em que surgiram no planeta (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2001).

A produção comercial de microalgas teve início na década de 60 com espécies do gênero *Chlorella* e *Arthrospira*, para utilização como suplementos dietéticos. Na mesma década, as pesquisas em biotecnologia de microalgas concentravam-se na reciclagem de águas residuais e na obtenção de fontes alimentares (OLIVEIRA, 2009).

Walter (2011) destaca que apesar das diferenças estruturais, a maioria das algas apresentam características fisiológicas semelhantes e análogas às plantas, sintetizando e acumulando diversas substâncias em comum, porém, com vantagens sobre as plantas terrestres, dentre elas:

- muitas espécies crescem mais rapidamente, proporcionando maior produtividade;
- apresentam estrutura unicelular, o que assegura a mesma composição bioquímica, diferentemente das plantas terrestres que apresentam compostos localizados em locais específicos (somente nos frutos, nas folhas, raízes, etc.);

- a possibilidade de induzir à maior síntese ou acúmulo de compostos de interesse por meio da manipulação das condições de cultivo;
- crescem bem em regiões de extremos climáticos e até mesmo em águas residuárias (WALTER, 2011).

No Brasil, o cultivo de microalgas poderá vir a ser uma prática socioeconômica muito promissora devido as suas condições climáticas adequadas, com temperaturas amenas em grande parte do ano e fontes hídricas abundantes.

2 APLICAÇÃO COMERCIAL DAS MICROALGAS

Atualmente são conhecidas numerosas aplicações comerciais de microalgas e o avanço de sua produção comercial nos últimos 60 anos é notável, porém ainda existem obstáculos relativos aos sistemas de produção (KOCHEM, 2010).

Segundo Lourenço (2006) apud Kochem (2010), três categorias básicas de aplicações comerciais já são bem conhecidas:

- Uso de microalgas para aumentar o valor nutricional de alguns alimentos para animais e para o homem.
- Uso de microalgas como ração para aquicultura in natura ou parcialmente processadas.
- Utilização de moléculas de alto valor agregado provinda das microalgas, como vitaminas, pigmentos e ácidos graxos, em alimentos industrializados, produtos farmacêuticos e cosméticos (LOURENÇO, 2006 apud KOCHEM, 2010).

Excetuando-se as produtoras de toxinas, as microalgas são capazes de incrementar o conteúdo nutricional da alimentação e influenciar positivamente a saúde de humanos e animais, graças à sua composição química (exemplificada na figura 1), que é rica em proteínas, grande variedade de aminoácidos, carboidratos, ácidos graxos saturados e insaturados, vitaminas (WALTER, 2011).

| Alimento | Proteínas | Carboidratos | Lipídios |
|----------------------------------|------------------|---------------------|-----------------|
| Carne | 39 | 38 | 1 |
| Leite | 43 | 1 | 34 |
| Arroz | 26 | 38 | 28 |
| Soja | 8 | 77 | 2 |
| <i>Anabaena cylindrica</i> | 43 – 56 | 25 – 30 | 4 – 7 |
| <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> | 48 | 17 | 21 |
| <i>Chlorella vulgaris</i> | 51 – 58 | 12 – 17 | 14 – 22 |
| <i>Dunaliella salina</i> | 57 | 32 | 6 |
| <i>Porphyridium cruentum</i> | 28 – 39 | 40 – 57 | 9 – 14 |
| <i>Scenedesmus obliquus</i> | 50 – 56 | 10 – 17 | 12 – 14 |
| <i>Spirulina máxima</i> | 60 – 71 | 13 – 16 | 6 – 7 |
| <i>Synechococcus sp.</i> | 63 | 15 | 11 |

Figura 1 – Composição genérica de diferentes alimentos humanos e algas (base % de matéria seca)
Fonte: (WALTER, 2011)

Algumas espécies de microalgas, como a *Spirulina*, destacam-se, principalmente por apresentarem biomassa com composição bioquímica diversificada: compostos nutricionais e pigmentos naturais com propriedades funcionais, como as ficobilinas, carotenóides e clorofilas (WALTER, 2011).

Dentre as ficobilinas obtidas a partir da *Spirulina*, uma das mais abundantes é a ficocianina, um pigmento que apresenta coloração azul brilhante que, dependendo do seu grau de pureza, encontra diferentes e importantes aplicações (WALTER, 2011).

Além de características altamente favoráveis como a possibilidade de cultivo contínuo e a rápida multiplicação dessas microalgas sob condições de baixo custo, o mercado encontra-se em expansão, uma vez que a cor representa aspecto fundamental na aceitação de determinados produtos e a tendência é de substituição dos corantes sintéticos por pigmentos naturais, especialmente de fontes não vegetais (WALTER, 2011).

No Quadro 1 são apresentados os principais produtos extraídos das microalgas e suas aplicações (DERNER et al., 2006):

Quadro 1 – Principais produtos extraídos das microalgas e suas aplicações

| | Produto | Aplicações |
|--------------------------|--|--|
| Biomassa | Biomassa | Alimentos naturais "health food" Alimentos funcionais Aditivos alimentares Aqüicultura Condicionador do solo |
| | Xantofilas (astaxantina e cantaxantina) | Aditivos alimentares |
| Corantes e antioxidantes | Luteína | Aditivos alimentares |
| | Beta-caroteno Vitamina C e E | Cosméticos |
| Ácidos graxos | Ácido araquidônico - ARA | Aditivos alimentares |
| | Ácido cicosapentaenóico - EPA | |
| | Ácido docosahexaenóico - DHA | |
| | Ácido gama-linolênico - GCA | |
| Enzimas | Ácido linoléico - LA | Alimentos naturais Pesquisa Medicina |
| | Superóxido dismutase – SOD | |
| | Fosfoglicerato quinase – PGK | |
| | Luciferase e Luciferina | |
| | Enzimas de restrição | |
| Polímeros | Polissacarídeos | Aditivos alimentares |
| | Amido | Cosméticos |
| | Ácido poli-beta-hidroxibutirico - PHB | Medicina |
| | Peptídeos | |
| Produtos especiais | Toxinas | |
| | Isótopos | Pesquisa |
| | Aminoácidos (prolina, arginina, ácido aspártico) Esteróis | Medicina |

Fonte: (DERNER et al., 2006)

2.1 Aplicações na área ambiental

Aliado ao aspecto comercial, outro fator desencadeador de novas oportunidades relaciona-se com a temática ambiental, visto que algumas espécies de microalgas também apresentam ótimos resultados no contexto da mitigação das emissões de gases do efeito estufa e na complementação de sistemas de tratamento de efluentes já existentes. (WALTER, 2011).

As microalgas podem sequestrar CO₂ emitidos por indústrias indústrias como as de cimento e termelétricas. Ao conectar as chaminés destes setores “carbono-intensivos” a tanques ou fotobioreatores de cultivo de microalgas, é possível proporcionar a biofixação deste CO₂ em biomassa de microalgas, que posteriormente será utilizada para transformação em biocombustível (EKOS, 2010).

O cultivo de microalgas integrado às Estações de Tratamento de Efluentes é uma solução de baixo custo para fornecimento de nutrientes às microalgas e também de despoluição do efluente (EKOS, 2010).

As algas desempenham um papel fundamental no funcionamento do sistema de lagoas de estabilização no tratamento de esgotos, limitando a proliferação de coliformes e bactérias patogênicas e removem nutrientes da água através de seu metabolismo e crescimento celular, ocorrendo também a precipitação de sais de fósforo como estruvita e apatita (SILVA, 2011).

Entre as diversas formas de microrganismos existentes nas lagoas de estabilização, as algas verdes (Chlorophyta), são componentes significativos, especialmente as microalgas do gênero *Chlorella sp.*, que são microrganismos unicelulares, clorofilados e sem flagelos (SILVA, 2011).

Através de seu metabolismo, as algas atuam no funcionamento da lagoa de estabilização: aumentando a concentração de oxigênio dissolvido (OD) através da fotossíntese, o qual é necessário à fisiologia das bactérias aeróbias heterotróficas; consumindo o dióxido de carbono (CO₂) produzido pela oxidação bacteriana da matéria orgânica; elevando o pH do meio e removendo nutrientes da água através de seu crescimento celular (SILVA, 2011).

2.2 Aplicação como biocombustível

Diferentes estudos realizados mostram que as microalgas possuem o mais elevado teor de matéria graxa, tornando-se uma excelente alternativa para a produção de biocombustíveis – devido à sua elevada densidade de lipídios comparando com as oleaginosas tais como canola, soja, palma, girassol etc. (PEQUENO, 2010).

Dessa forma, a produção de microalgas pode, promover um aumento na produção de óleo por hectare e reduzir o custo de produção de biodiesel, conforme mostra o Quadro 2 (PEQUENO, 2010).

Quadro 2. Rendimento de extração de óleos

| Rendimento de óleo t/ha ano | |
|------------------------------------|-----------|
| Mamoma | 0,5 – 1,0 |
| Soja | 0,2 – 0,6 |
| Girassol | 0,5 – 1,5 |
| Canola | 0,5 – 0,9 |
| Pinhão manso | 2,0 – 3,0 |
| Óleo de palma(dendê) | 3,0 – 6,0 |
| Microalgas | 50 – 150 |

Fonte: (PEQUENO, 2010).

Segundo Pequeno (2010), dentre as novas matérias-primas usadas na obtenção de óleo destinado à produção de biodiesel, as microalgas emergiram como uma das fontes mais promissoras, por duas razões principais.

Primeiro porque o rendimento em óleo das microalgas é muito mais alto do que o melhor rendimento obtido com as oleaginosas tradicionais; e também pelo fato das microalgas poderem crescer em outros lugares que não sejam terras agrícolas e florestas, minimizando assim os danos causados aos ecossistemas e à produção de alimentos (PEQUENO, 2010).

Na figura 2 pode observar-se as várias etapas inerentes à produção de biodiesel, iniciando-se com a seleção de espécies de microalgas e o design e implementação do sistema de cultivo para o crescimento microalgal (CAROLINO, 2011).

Posteriormente, a biomassa é colhida e processada para extração do óleo, que consiste na sua maioria em triglicéridos (90- 98%) podendo conter pequenas quantidades de mono e diglicéridos (CAROLINO, 2011).

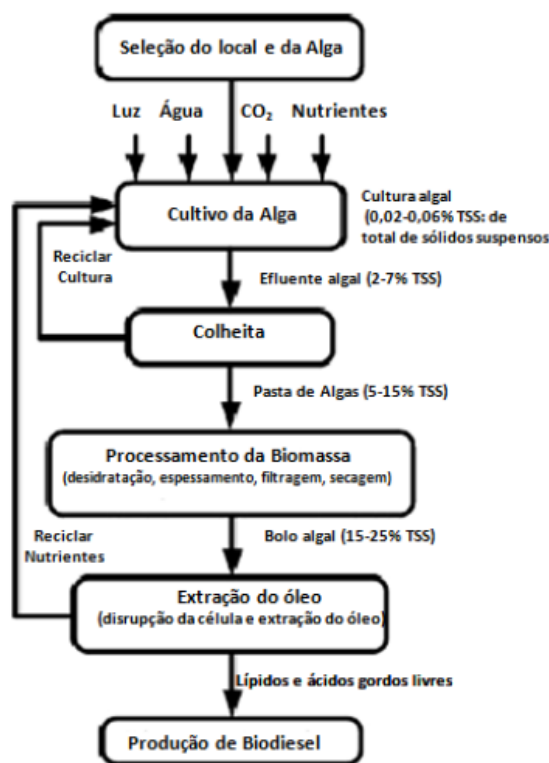


Figura 2 – Etapas do processo de produção de biodiesel a partir de microalgas
Fonte: (CAROLINO, 2011)

Segundo Ekos (2010), é possível ainda a produção de bioquerosene com o óleo extraído da biomassa de microalgas. O processo é distinto da produção de biodiesel, mas a matéria prima utilizada (óleo das microalgas) é a mesma.

3 CULTIVO DAS MICROALGAS

Os cultivos de microalgas podem ser feitos em sistemas abertos ou fechados. Os sistemas mais antigos são os abertos, onde as microalgas são produzidas em lagoas, grandes tanques ou piscinas ao ar livre (KOCHEM, 2010).

Apesar destes sistemas serem de fácil e barata instalação e operação, são sistemas que estão sujeitos a contaminantes e variações quanto aos parâmetros de cultivo (como por exemplo: intensidade solar, temperatura, homogeneidade de nutrientes em decorrência de evaporação da água ou diluição do meio de cultivo quando em dias de chuvas) (KOCHEM, 2010).

Já os cultivos fechados possibilitam maior controle do funcionamento do sistema, porém um dos maiores desafios dos pesquisadores encontra-se na manutenção de parâmetros para manter eficiência do cultivo para sistemas em larga escala (*scale up*) (KOCHEM, 2010).

Assim, sistemas fechados têm custos maiores de instalação, operação e controle, apesar de fornecerem as maiores eficiências fotossintéticas (KOCHEM, 2010).

A figura 3 relaciona propriedades dos diferentes sistemas de produção, abertos e fechados (KOCHEM, 2010).

| | Sistemas aberto | Sistemas fechados |
|---------------------------|-----------------|---------------------|
| Riscos de contaminação | Alta | Baixo |
| Perdas de CO ₂ | Alta | Baixo |
| Perdas evaporativas | Alta | Baixo |
| Eficiência do uso da luz | Pobre | Excelente |
| Razão Área/Volume | Baixo | Alto |
| Área requerida | Alto | Baixo |
| Controle de processo | Difícil | Fácil |
| Produtividade de biomassa | Baixo | Alto |
| Custos de investimento | Baixo | Alto |
| Custos de operação | Baixo | Alto |
| Custos de manutenção | Alto | Relativamente baixo |
| Scale up (escalonamento) | Fácil | Difícil |

Figura 3 – Comparação entre sistema aberto e fechado para cultivo de microalgas
Fonte: (KOCHEM, 2010)

3.1 Sistemas abertos

Os sistemas de cultivo a céu aberto representam os processos clássicos de reatores abertos usados para produção de microalgas (MENNA, 2010).

Os sistemas abertos são compostos de lagoas rasas – pré-existentes ou construídas – expostas à atmosfera ou em estufas e que podem ter dois formatos básicos (WALTER, 2011):

- tipo *raceway* (circuito): formato mais empregado para cultivo comercial, garante boa capacidade de mistura pois conta com pás circulares, bombas ou defletores para circulação de nutrientes, gases e a cultura algal (FIG. 4), garantindo boas taxas de crescimento algal de forma contínua;
- circular: são bastante utilizados e podem receber sistema de aeração, porém, apresentam relativamente menor capacidade de mistura quando comparados aos sistemas em circuito (WALTER, 2011).



Tanques abertos

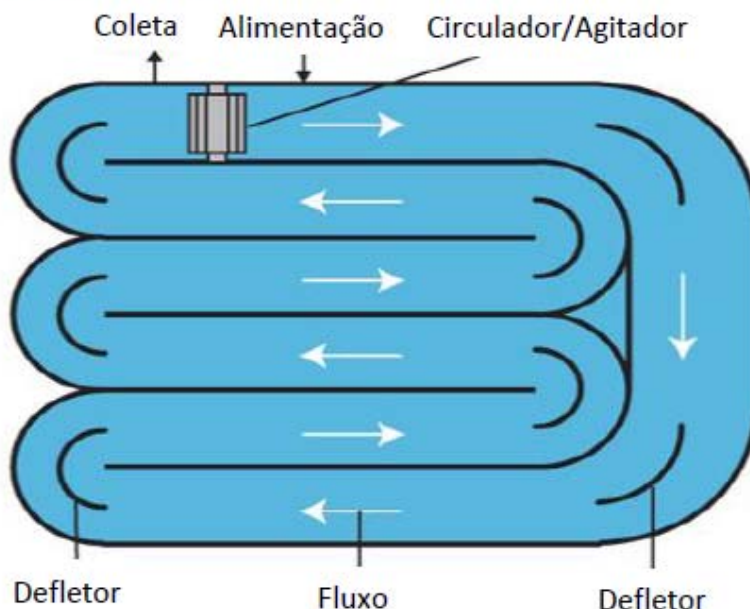


Figura 4 - Sistema de cultivo em circuito (raceway)
Fonte: (WALTER, 2011)

Para que o dióxido de carbono da atmosfera penetre no meio de cultivo e para que boa parte da biomassa seja iluminada é necessário que as piscinas não tenham mais que 35 cm de profundidade (WALTER, 2011).

Durante o inverno, os tanques devem ser cobertos para evitar variações de temperatura e impedir que a camada superficial do meio de cultura congele durante a noite em regiões temperadas e subtropicais. A cobertura também reduz as perdas do meio por evaporação e diminui a contaminação por insetos (BERTOLDI; SANT'ANNA; OLIVEIRA, 2008).

Segundo Bertoldi; Sant'anna; Oliveira (2008), o cultivo de microalgas em sistemas abertos tem como benefício a luminosidade natural sem custos. No entanto, há o risco de contaminação por outros organismos que pode ser controlada com agitação e aumento do pH.

Além disso, esses sistemas estão sujeitos a alterações de clima, luz e temperatura. A produção de biomassa em tanques abertos ocorre em contínuo processo de propagação. O ideal é que os tanques sejam rasos com até 30 cm de profundidade (BERTOLDI; SANT'ANNA; OLIVEIRA, 2008).

Outras desvantagens do sistema de cultivo aberto, segundo Menna (2010), são: (i) apenas uma pequena quantidade de espécies de algas conseguem crescer com êxito em larga escala, (ii) presença maior de microorganismos predadores, (iii) grandes perdas evaporativas e dificuldade em conservar o volume de água, (iv) ineficiência na distribuição de dióxido de carbono, (v) necessidade de grande espaço físico, (vi) baixa produtividade e comparação aos sistemas fechados e (vii) altos custos na colheita de biomassa.

3.2 Sistemas fechados (fotobiorreatores)

Ao contrário de sistemas a céu aberto, fotobiorreatores tem como principal objetivo cultivar uma espécie singular de microorganismo. Estes biorreatores vêm sendo usado de maneira bem sucedida na produção de biomassa de microalgas (MENNA, 2010).

Diferentes projetos de fotobiorreatores fechados já foram estudados e implantados em grande escala. As diferentes configurações oferecem vantagens e desvantagens, que associadas ao tipo de alga a ser cultivada, oferece maior ou menor eficiência frente a parâmetros de estudos (KOCHEN, 2010).

Exemplos de sistemas fechados são: fotobiorreatores de placas horizontal ou vertical (*flat plate*), tubulares, cilíndricos, coluna de bolhas (*bubble column*), tanques agitados e *airlift* (KOCHEN, 2010).

3.2.1 Fotobiorreatores de placas

Os fotobiorreatores de placas (FIG.5) oferecem a vantagem de ocuparem pouco espaço em sua instalação, pois consistem de placas finas que podem ser colocadas verticalmente ou inclinadas em relação à fonte de iluminação (KOCHEN, 2010).

As grandes vantagens que esses reatores oferecem são quanto à grande superfície de iluminação, ao baixo acúmulo de oxigênio dissolvido comparado a reatores tubulares e à facilidade de escalonamento, visto que são módulos independentes de placas (KOCHEN, 2010).

Contudo, algumas espécies de microalgas aderem-se às paredes do reator impossibilitando uma boa absorção de luz. Além disso, o controle de temperatura desses sistemas, a fim de evitar a evaporação, torna-se difícil, mesmo que algumas soluções, como acoplar trocadores de calor dentro das placas, já tenham sido criadas (KOCHEN, 2010).

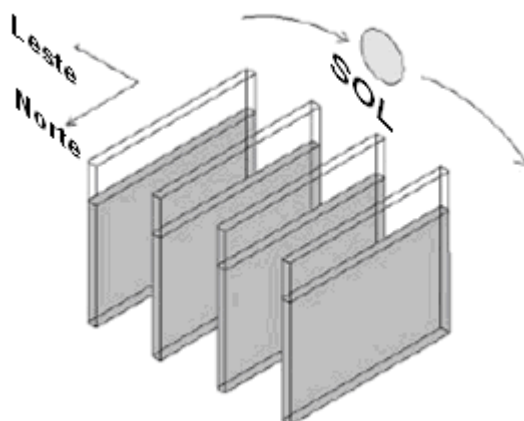


Figura 5 – Esquema de fotobiorreatores de placas (PFP) quanto à orientação solar
Fonte: (KOCHEN, 2010)

3.2.2 Fotobiorreatores tubulares

Reatores tubulares (FIG. 6) consistem de tubos transparentes uns ao lado dos outros ou mesmo em forma espiral com limite de diâmetro de 10 cm (KOCHEN, 2010).

O movimento das algas através dos tubos pode ser feito com auxílio de uma bomba ou de sistemas tipo *airlift*, que oferecem menor cisalhamento devido à ausência de bombeamento mecânico e possibilitam que os gases, CO₂ e O₂, fiquem em concentrações equilibradas devido à aeração no meio (KOCHEN, 2010).

Entretanto, no escalonamento desses reatores existe a preocupação em relação ao acúmulo de oxigênio e à insuficiência de CO₂ para a fotossíntese ao longo dos tubos. Por isso, o escalonamento é realizado pelo aumento de módulos e não pelo aumento de comprimento e de diâmetro dos tubos (KOCHEN, 2010).

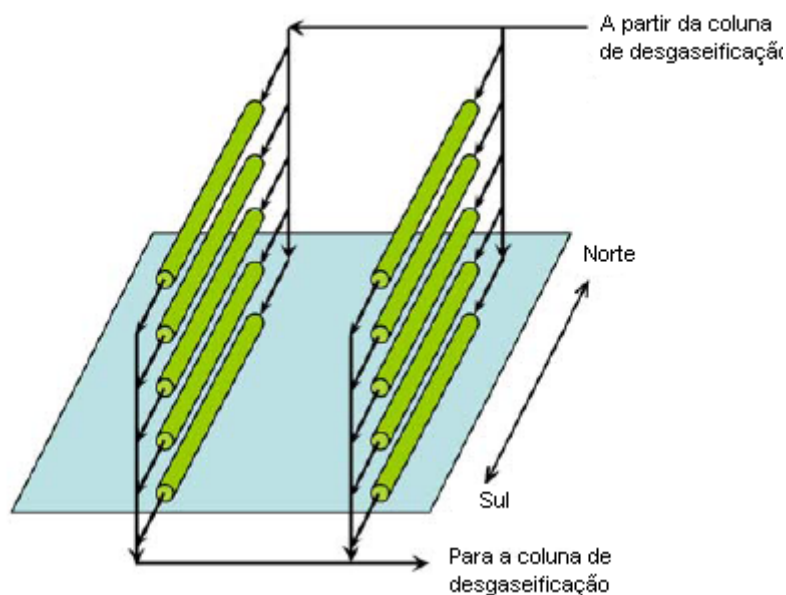


Figura 6 - Sistema fechado tubular
Fonte: (KOCHEN, 2010)

3.2.3 Fotobioreatores de tanques agitados

Reatores do tipo tanque agitado são os reatores padrão da indústria química (FIG. 7). No entanto, o agitador deste tipo de reator gera um excesso de cisalhamento não desejado no meio de cultivo, provocando desagregação de células (MENNA, 2010).

Além disso, este tipo de agitação mecânica não consegue, de maneira eficiente, manter as células em suspensão. Por isso, prefere-se agitação pneumática, como no caso das colunas de bolhas e do *airlift*, do que agitação mecânica (MENNA, 2010).

Os reatores de tanques agitados não têm sido muito estudados, pois não apresentam área superficial luminosa considerável. Além disso, conferem gastos de energia e operação ao sistema para manter a homogeneidade das concentrações do meio, a fim de garantir que todas as algas do cultivo estejam sobre as mesmas condições de crescimento e rotas metabólicas (KOCHEN, 2010).

Geralmente, esses reatores são estudados para determinar modelos de produtividade de algas, a fim de estabelecer aplicabilidade a tais algas em larga escala (KOCHEN, 2010).

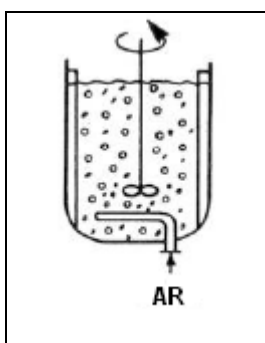


Figura 7 - Desenho de um fotobioreator de tanque agitado
Fonte: (KOCHEN, 2010)

3.2.4 Fotobioreatores *airlift*

Biorreatores do tipo *airlift* são um dos principais reatores do tipo agitação pneumática. Estes reatores são dispositivos simples, compactos, de baixo custo e de fácil operação, facilidade na remoção e reposição de sólidos e altas taxas de transferência de calor e massa (MENNA, 2010).

Com agitação pneumática, proporcionam bons valores de kLa (taxa específica de transferência de massa na interface líquido-gás) e de velocidades de circulação com emprego de baixas quantidades de energia (MENNA, 2010).

Além disso, o *airlift* consegue manter as células em suspensão uniformemente, ao contrário de outros biorreatores em que ocorrem sedimentação de células (MENNA, 2010).

Além de apresentar altas taxas de transferência de massa e do baixo consumo energético, o *airlift* possui ainda, como vantagens no cultivo de microorganismos: (i) ausência de partes móveis, (ii) boa capacidade de suspensão de sólidos, (iii) cisalhamento homogêneo, (iv) mistura rápida e (v) orientação vertical, o que diminui a área de trabalho (MENNA, 2010).

No entanto, ao ser efetuado o escalonamento para larga escala, alguns problemas surgem, como o decrescimento exponencial da penetração de luz frente ao aumento do diâmetro, sendo esta a principal desvantagem do *airlift* (MENNA, 2010).

Neste tipo de reator, ar e/ou dióxido de carbono são injetados pelo fundo do biorreator, promovendo a circulação da cultura a partir do fundo do reator até o topo, através da porção central do biorreator, separada das paredes através de placas planas (MENNA, 2010).

A figura 8 apresenta alguns reatores do tipo *airlift* com culturas de microalgas crescendo.



Figura 8 – Biorreatores do tipo *airlift*, com uma cultura de microalgas crescendo em seu interior
Fonte: (MENNA, 2010)

4 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA O CULTIVO DE MICROALGAS

A composição bioquímica da biomassa das microalgas não é determinada somente pela natureza de cada espécie algal, dependendo de fatores como: intensidade de luz, temperatura, pH, agitação, a água do cultivo e nutrientes (BERTOLDI; SANT'ANNA; OLIVEIRA, 2008).

4.1 Luz

Os reatores para cultivo de microalgas são diferenciados daqueles projetados para o cultivo de outros microrganismos. Isso se deve ao fato da maioria das microalgas serem fotoautotróficas e dependerem da luz como fonte energética, tornando esse aspecto um fator essencial no projeto de fotobioreatores (WALTER, 2011).

Uma vez que os fótons de luz podem ser absorvidos pelas suas células como nutrientes, as propriedades da luz, como comprimento de onda e intensidade, são definitivamente fundamentais para seu crescimento. Isso também significa que a velocidade específica de crescimento das algas pode ser muito influenciada pela fonte de luz (WALTER, 2011).

Como a ampla densidade luminosa é a principal característica de qualquer sistema fotossintético, deve-se considerar a correta distribuição da luz sobre o fotobioreator, bem como considerar sua intensidade, uma vez que se aplicada em demasia sobre sua superfície, provocará fotoinibição (crescimento limitado) e conseqüentemente, baixa conversão de energia luminosa em biomassa, isto é, baixa eficiência fotossintética (EF) (WALTER, 2011).

A EF aumenta até o momento em que a iluminação em excesso torna-se um fator limitante ao crescimento, e por outro lado, a produtividade é negativamente afetada pela área central (zona de sombra) ou outras com iluminação deficiente (WALTER, 2011).

4.2 Temperatura

A temperatura utilizada para manutenção das culturas geralmente é a mais próxima daquela onde os organismos foram coletados. Para organismos de clima polar, mantém-se $T < 10^{\circ}\text{C}$; organismos de clima temperado são cultivados com temperatura entre $10\text{-}25^{\circ}\text{C}$ e temperatura superior a 20°C é usada para aqueles característicos de regiões com clima tropical (WALTER, 2011).

A maioria das espécies de microalgas cultivadas toleram temperaturas entre 16 e 27°C , porém, isso pode variar conforme o meio de cultura, a espécie ou a cepa utilizada (WALTER, 2011).

Incubadoras geralmente usam temperatura controlada e constante, sendo que a transferência para diferentes temperaturas pode ser conduzida de forma a alterar apenas 2°C por semana (WALTER, 2011).

De uma forma geral, temperaturas inferiores a 16°C reduzirão o crescimento e temperaturas superiores a 35°C poderão ser fatais para várias espécies (WALTER, 2011).

4.3 pH

A faixa de pH para a maioria das espécies de algas cultivadas situa-se entre 7 e 9, e a faixa ótima entre 8,2 e 8,7, porém, algumas espécies adaptam-se melhor em ambientes mais ácidos ou básicos (WALTER, 2011).

A cultura pode entrar em completo colapso quanto houver alguma falha na manutenção de um pH aceitável. Nos casos de culturas microalgais muito densas, a adição de dióxido de carbono permite corrigir o pH elevado (WALTER, 2011).

Uma alternativa para conjugar agitação e acidez/alcalinidade das culturas é a instalação de um sensor de pH, de forma a otimizar o suprimento de CO_2 , evitando perdas, já que o pH é um fator determinante para a solubilidade do CO_2 (WALTER, 2011).

4.4 Agitação e aeração da cultura

A agitação e a aeração das culturas de microalgas são importantes para uma distribuição homogênea das células, metabólitos, manutenção da temperatura e para a transferência de gases através da interface gás-líquido (WALTER, 2011).

O ar contém a fonte de carbono para a fotossíntese na forma de dióxido de carbono, mas, para culturas muito densas o CO₂ originário do ar e borbulhado através da cultura pode ser insuficiente e um limitante do crescimento (WALTER, 2011).

Dependendo das condições de cultivo e do formato do fotobioreator pode ser necessário suplementar dióxido de carbono, por exemplo, numa proporção de 1% do volume de ar alimentado, garantindo ainda uma maior estabilidade quanto às mudanças no pH, graças ao balanço CO₂/HCO₃⁻ na solução (WALTER, 2011).

Nem todas as espécies algais toleram agitação vigorosa. No ambiente natural elas dificilmente sofrem regimes turbulentos, portanto, alguns métodos podem danificar as células (WALTER, 2011).

A agitação pode ser feita por borbulhamento com ar, pás circulares para plâncton ou ainda bombeamento. A agitação influencia no regime luminoso de tanques externos, portanto, deve ser curta de forma a manter elevada a EF (eficiência fotossintética) (WALTER, 2011).

Por outro lado, em sistemas fechados, um fluxo turbulento de agitação pode ser favorável, uma vez que melhora a circulação interna e evita o depósito de células em zonas escuras (WALTER, 2011).

4.5 Água

Sistemas abertos podem utilizar diferentes tipos de água, incluindo água fresca, salobra, alcalina, marinha, eutrófica ou uma mistura delas. O tipo de água utilizada ditará o sistema de cultivo implementado, a espécie de alga cultivada e os nutrientes necessários (WALTER, 2011).

O emprego de águas salobras ou residuárias pode apresentar variações sazonais em sua composição e qualidade, podendo inclusive conter resíduos químicos como fertilizantes e metais pesados, prejudicando a qualidade da biomassa produzida e dificultando até mesmo a sobrevivência da cultura (WALTER, 2011).

5 FATORES NUTRICIONAIS DAS MICROALGAS

Existem diversos meios de cultura apropriados à preservação e produção de culturas de microalgas. Regra geral, nas algotecas ou em locais de exploração de cultivos massivos de microalgas de água doce os macronutrientes essenciais são o carbono, nitrogênio, fósforo e potássio (OLIVEIRA, 2009).

Para manutenção e estudo de culturas de microalgas à escala laboratorial utilizam-se normalmente sais de pureza pro-análise. Já em cultivos de grande escala os meios podem ser preparados a partir de fontes residuais e/ou comerciais, cuja composição nutricional seja conhecida, para que o meio final seja adequado à espécie a produzir.

No caso de meios salinos, que simulem uma água salgada ou salobra, as principais diferenças relativamente aos meios de água doce são o aumento das concentrações de cloreto de sódio e de magnésio no meio (OLIVEIRA, 2009).

5.1 Carbono

Nos sistemas de cultivo de microalgas, o carbono é considerado o macronutriente mais importante, uma vez que constitui cerca de 50 % da biomassa microalgal (OLIVEIRA, 2009).

Parte do carbono existente nos meios aquáticos encontra-se numa forma oxidada (inorgânica) e combinada com oxigênio molecular, sob as formas de dióxido de carbono (CO_2), hidrogenocarbonato (HCO_3^-) ou carbonato (CO_3^{2-}) (OLIVEIRA, 2009).

As microalgas crescem em regime autotrófico, utilizando luz e dióxido de carbono mas, também podem ser cultivadas em regime heterotrófico, usando compostos orgânicos como fonte de energia e fonte de carbono, ou ainda em regime de cultivo mixotrófico (OLIVEIRA, 2009).

Neste último tipo de crescimento utiliza-se simultaneamente a fonte luminosa e o substrato orgânico como fonte de energia, além de CO_2 e substrato orgânico como fontes de carbono (OLIVEIRA, 2009).

5.2 Nitrogênio

O nitrogênio é componente básico na formação de proteínas, ácidos nucleicos e pigmentos fotossintetizantes, constituinte de diversas substâncias do metabolismo primário e pode ser encontrado em concentrações variáveis no interior das células algáceas na forma inorgânica (nitrito, nitrato e amônio) (PEQUENO, 2010).

É assimilado, preferencialmente, sob forma amoniacal (NH_3 e NH_4^+), mas também podem ser assimiladas na forma de nitrogênio gasoso ou molecular (algumas cianobactérias), de nitrato (NO_3^-), de nitrito (NO_2^-) (PEQUENO, 2010).

As principais fontes são os sais de nitrato, sais de amônio e uréia. As concentrações de proteínas e clorofilas nas células são diretamente proporcionais ao suprimento de nitrogênio, com isso, a diminuição da concentração de proteína ocasiona aumento significativo no percentual de polissacarídeos e a diminuição da clorofila aumenta a concentração de carotenóides gerando mudança de coloração no cultivo que tendem ao aspecto amarelado (PEQUENO, 2010).

5.3 Fósforo

Assim como o nitrogênio, o fósforo é considerado um dos principais elementos limitantes para as microalgas. Ele é importante na regulação do metabolismo celular (síntese de lipídeos e carboidratos) e no fornecimento de fosfatos para a geração de energia e na constituição de moléculas estruturais (ATP, açúcares fosfatados, ácidos nucleicos e fosfoenzimas) (PEQUENO, 2010).

O fósforo é assimilado na forma de ortofosfato (HPO_4^{3-}). As microalgas são capazes de absorver quantidades elevadas do fósforo permitindo que a célula continue a se desenvolver mesmo que não haja disponibilidade de novas fontes deste elemento (PEQUENO, 2010).

A absorção do fósforo é inibida total ou parcialmente pelo arsênio. Geralmente as fontes do fosfato são os sais de sódio e potássio (PEQUENO, 2010).

5.4 Outros macronutrientes

O enxofre representa 1 a 2% do peso seco celular e a maior parte dele se encontra presente na constituição dos aminoácidos metionina e cisteína, mas também está presente como cofator de enzimas e em certas vitaminas tais como biotina e tiamina (PEQUENO, 2010).

O potássio é regulador da pressão osmótica, estimula a respiração em pH reduzido, é co-fator de várias enzimas e na conformação e estabilidade de proteínas (PEQUENO, 2010).

O magnésio é elemento essencial para as microalgas por ser constituinte da molécula de clorofila. O magnésio é co-fator de várias enzimas, participa na ativação das enzimas glicolíticas, estimula a síntese de ácidos graxos essenciais, regula os níveis iônicos celulares. Quando há deficiência, ocorre a perda do conteúdo pigmentar da célula, denominado clorose (PEQUENO, 2010).

Apenas as diatomáceas e silicoflagelados necessitam do silício, pois é componente estrutural das frústulas e esqueleto externo respectivamente. São fontes de silício os sais de silicato de sódio hidratados (PEQUENO, 2010).

5.5 Micronutrientes

O principal papel dos micronutrientes, em especial os metálicos, é participar da estrutura e da atividade de diversas enzimas que são envolvidas nas diversas vias metabólicas, conferindo diferentes papéis para cada um deles (LOURENÇO, 2006 apud PEQUENO, 2010).

Alguns micronutrientes metálicos podem ser tóxicos para as microalgas se estiverem em altas concentrações e podem também atuar como antagonistas, provocando deficiência em determinados nutrientes mesmo que ele esteja disponível no meio (LOURENÇO, 2006 apud PEQUENO, 2010).

Os principais micronutrientes requeridos pelas microalgas são o ferro, manganês, molibidênio, cobalto, boro, vanádio, zinco, cobre e selênio (PEQUENO, 2010).

5.6 Vitaminas

Segundo Lourenço (2006) apud Pequeno (2010), apenas três vitaminas são efetivamente importantes para as microalgas: tiamina, biotina e cianocobalamina. Algumas espécies podem sintetizá-las, as que não sintetizam necessitam recebê-las de fontes exógenas.

As demais vitaminas não atuam como fatores limitantes, pois: (a) são sintetizadas pelas algas, (b) são sintetizadas por microrganismos associados a algas e disponibilizados, (c) não apresentam funções biológicas para algas, (d) ou são necessárias em concentrações tão baixas ao ponto de serem irrelevantes (LOURENÇO, 2006 apud PEQUENO, 2010).

5.7 Quelantes

Alguns dos elementos metálicos importantes para a nutrição das microalgas não são solúveis, eles necessitam interagir com outras substâncias para serem solubilizados (LOURENÇO, 2006 apud PEQUENO, 2010).

Atualmente, o ácido etilenodiaminotetraacético (EDTA) é a principal substância empregada em meios de cultura como quelante, sendo utilizada na forma mais solúvel apresentada pelo sal dissódico ($\text{Na}_2\text{EDTA}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (LOURENÇO, 2006 apud PEQUENO, 2010).

6 MÉTODOS DE COLHEITA DE MICROALGAS E DE EXTRAÇÃO DE ÓLEO

Para o emprego na elaboração de alimentos, bem como para a extração de alguma substância de interesse, é necessário primeiramente separar a biomassa do meio de cultura (DERNER et al., 2006).

As principais técnicas atualmente aplicadas na coleta de microalgas incluem centrifugação, floculação, peneiramento, sedimentação por gravidade, flotação, e técnicas de

eletroforese (MORCELLI, 2011).

O custo da colheita das algas pode ser elevado, uma vez que a fração em massa na cultura em suspensão é geralmente baixa, enquanto as células normalmente carregam cargas negativas e excesso de matéria orgânica para manter sua estabilidade de forma dispersa (MORCELLI, 2011).

A seleção de técnica de colheita é dependente das propriedades das microalgas, tais como densidade, tamanho, e o valor do produto desejado (MORCELLI, 2011).

Geralmente a colheita das microalgas envolve duas etapas (ZARDO, 2011):

- Pré-separação: operação realizada no meio provindo diretamente dos fotobiorreatores com concentração de biomassa resultante do cultivo com objetivo de enriquecer o meio para uma composição de 5 a 10% em biomassa. Esta etapa pode ser realizada por floculação, flotação ou sedimentação por gravidade.
- Separação fina: após a separação mais grosseira pela pré-separação, o meio provindo da primeira etapa é concentrado ainda mais por técnicas como centrifugação e ou filtração. A técnica de filtração geralmente demanda mais energia do que a de centrifugação.

A seguir são citados os variados processos de separação disponíveis atualmente para a colheita de microalga:

6.1 Centrifugação

A maioria das microalgas podem ser recuperadas a partir do cultivo em suspensão usando centrifugação. A recuperação por centrifugação é o método preferido para a colheita de metabólitos de alto valor agregado (MORCELLI, 2011).

Trata-se de um processo rápido, que demanda uma quantidade muito alta de energia. A recuperação de biomassa depende das características de sedimentação das células, o tempo de residência da suspensão ou lodo na centrífuga e a altura a ser “vencida” pela sedimentação (MORCELLI, 2011).

As desvantagens do processo incluem os altos custos de energia e manutenção potencialmente maior devido à presença de peças movimentando-se livremente. Eficiências de colheita superiores a 95%, e aumento na concentração da solução de até 150 vezes para teor total de sólidos de 15% em suspensão são tecnicamente viáveis (MORCELLI, 2011).

6.2 Sedimentação por gravidade

Métodos de sedimentação por gravidade e por centrifugação são baseados na Lei de Stokes, ou seja, a forma na qual os sólidos em suspensão irão se depositar será determinada pela densidade e raio das células e, por consequência, sua velocidade de sedimentação (MORCELLI, 2011).

A sedimentação por gravidade é a técnica mais comum de colheita para biomassa de algas no tratamento de água devido aos grandes volumes tratados e do baixo valor da biomassa gerada (MORCELLI, 2011).

No entanto, o método é adequado apenas para grandes microalgas como as do gênero *Arthrospira* (anteriormente conhecido como *Spirulina*). Sedimentação por gravidade é comumente aplicada para a separação de microalgas no tratamento de água e de efluentes (MORCELLI, 2011).

De acordo com Brennan e Owende (2010) apud Morcelli (2011), a densidade e o raio das células das algas e a velocidade de sedimentação induzida por tais influenciam na

característica de deposição dos sólidos em suspensão.

A colheita das microalgas por sedimentação pode ser conseguida através de separadores de lamela e tanques de sedimentação. A floculação é frequentemente usada para aumentar a eficiência de sedimentação por gravidade (MORCELLI, 2011).

O sucesso da remoção de sólidos por este método depende muito da densidade das partículas de microalgas. Segundo Edzwald et al. (1995) apud Morcelli (2011), partículas de microalgas de baixa densidade não assentam bem e não são separadas com sucesso via sedimentação gravitacional.

6.3 Floculação

A floculação baseia-se na adição de floculantes químicos como: cloreto férrico (FeCl_3), sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$). Essas moléculas, que possuem carga positiva, interagem com as microalgas, que geralmente tem carga negativa, facilitando a agregação entre elas formando-se flocos. Estes flocos, por possuírem maior massa, decantam mais rapidamente (ZARDO, 2011).

Além disso, muitos desses produtos químicos, sob pH adequado e outras condições, tais como temperatura e salinidade, reagem com a água para formar hidróxidos insolúveis que se ligam formando longas cadeias ou malhas que ao se depositarem arrastam consigo mais partículas que se encontram em suspensão (ZARDO, 2011).

O método da floculação é geralmente usado na primeira etapa da colheita (pré-separação), gerando um lodo com concentração de biomassa em torno de 5 a 10%, necessitando, no entanto, de um pós-tratamento para se atingir o teor de umidade desejado (ZARDO, 2011).

6.4 Peneiramento

Na técnica de peneiramento, a suspensão é forçada através de uma tela com um tamanho particular de poro. *Microstrainers* e filtros de tela vibratórios são dois dos principais dispositivos de peneiramento na colheita de microalgas (MORCELLI, 2011).

Microstrainers podem ser descritos como filtros rotativos com telas de malha fina, que são operados com frequentes retrolavagens. Uma alta concentração de microalgas pode resultar no bloqueio da tela, enquanto que uma baixa concentração de microalgas pode resultar na captação ineficiente (MORCELLI, 2011).

Microstrainers apresentam várias vantagens, como: simplicidade na função e na construção, operação fácil, baixo investimento, abrasão insignificante (resultado da ausência de peças movendo-se rapidamente) sendo, no entanto, elevada a demanda energética e tendo altas razões de filtração (MORCELLI, 2011).

6.5 Filtração

Um processo de filtração convencional é mais apropriado para colheita de microalgas relativamente grandes (dimensões superiores a 70 μm) como para os gêneros *Coelastrum* e *Arthrospira* (MORCELLI, 2011).

Não pode ser usado para a colheita de espécies de algas que se aproximem da dimensão de bactérias (inferiores a 30 μm), como *Scenedesmus*, *Dunaliella* e *Chlorella* (MORCELLI, 2011).

Filtração convencional opera sob pressão ou sucção, e auxiliares de filtração tais como terra diatomácea ou celulose podem ser usados para melhorar a eficiência (MORCELLI, 2011).

Para a recuperação de algas de menor tamanho de células (<30 µm), a micro e a ultrafiltração por membranas (processos que utilizam como força motriz a aplicação de pressão através de membranas densas ou porosas) são alternativas tecnicamente viáveis à filtração convencional (MORCELLI, 2011).

É apropriado para as células frágeis que exigem pressão trans-membrana baixa e velocidade de escoamento tangencial baixa. Para o processamento de pequenos volumes de microalgas (inferior a 2 m³/dia), a filtração por membranas pode ser mais rentável em comparação com a centrifugação (MORCELLI, 2011).

Devido ao custo de substituição da membrana e de bombeamento em grandes escalas de produção (acima de 20 m³/dia), a centrifugação pode ser um método mais econômico de colheita de biomassa (MORCELLI, 2011).

6.6 Processo eletrolítico

Mecanismos para eletrocoagulação envolvem três etapas consecutivas: (1) geração de coagulantes por oxidação eletrolítica de um eletrodo de sacrifício, (2) desestabilização das partículas em suspensão e quebra de emulsão, e (3) agregação da fase desestabilizada para formar flocos (MORCELLI, 2011).

Diferente de coagulação eletrolítica, floculação eletrolítica não requer o uso de eletrodos de sacrifício. Floculação eletrolítica funciona com base no movimento de microalgas para o ânodo, a fim de neutralizar a carga resultante e, em seguida, formam agregados (MORCELLI, 2011).

6.7 Colheita por flotação

Métodos de flotação são baseados no aprisionamento das células de algas utilizando micro-bolhas de ar dispersas no cultivo e, portanto, ao contrário da floculação, não requerem qualquer adição de produtos químicos (MORCELLI, 2011).

Algumas cepas naturalmente flutuam na superfície da água conforme o conteúdo de lipídios das microalgas aumenta. Embora a flotação tenha sido mencionada como um potencial método de colheita, as evidências da sua viabilidade técnica ou econômica são limitadas (MORCELLI, 2011).

A flotação é um processo de separação por gravidade em que as bolhas de ar ou gás aderem às partículas sólidas e, em seguida, levam-nas para a superfície do líquido (MORCELLI, 2011).

7 MEDIDAS DE CRESCIMENTO DAS MICROALGAS

No cultivos das microalgas podem ser aplicados determinados parâmetros de crescimento empregando fórmulas e representações gráficas para avaliar o desenvolvimento das culturas (PEQUENO, 2010).

O crescimento de uma população microalgal pode ser estimado pelo emprego de determinados parâmetros, dentre os quais podem ser destacados a densidade celular máxima, a velocidade (taxa) de crescimento e o tempo de cultivo (PEQUENO, 2010).

Esses parâmetros podem ser determinados a partir do cultivo pela contagem direta por microscopia (quantificar o número de células algáceas por mililitro de cultivo), fluorescência "in vivo" e densidade óptica (PEQUENO, 2010).

De acordo com Oliveira (1993) apud Pequeno (2010), a densidade celular máxima é o maior valor obtido em número de células por mililitro, já a velocidade de crescimento representa o número de divisões celulares da população por unidade de tempo (divisões por dia).

O tempo de cultivo é o período transcorrido entre o início do cultivo e o momento no qual a cultura alcançou a densidade celular máxima ou que a biomassa apresentou o maior conteúdo de um determinado composto de interesse ou, ainda, alcançou o maior valor nutricional para a espécie de organismo que se quer alimentar no menor espaço de tempo possível (PEQUENO, 2010).

Esse último parâmetro de avaliação do crescimento é considerado muito importante em se tratando de cultivos em grande escala, uma vez que o tempo é decisivo para a escolha de uma determinada espécie, do seu processo de produção e da infraestrutura necessária para o seu cultivo (PEQUENO, 2010).

Segundo Brown et al. (1997) apud Pequeno (2010), a composição nutricional das microalgas pode variar também em função de diferentes condições de cultivo e da fase de crescimento da cultura. Para avaliar o desenvolvimento de microalgas, é essencial que o crescimento da população em cultivo seja acompanhado para determinar o momento adequado para a sua colheita e utilização.

Conclusões e recomendações

No Brasil, o cultivo de microalgas poderá vir a ser uma prática socioeconômica muito promissora devido as suas condições climáticas adequadas, com temperaturas amenas em grande parte do ano e fontes hídricas abundantes (PEQUENO, 2010).

Assim, o domínio das técnicas de produção de concentrados de microalgas poderá abrir um novo campo de investigações sobre compostos bioativos como por exemplo voltados a indústria de corantes naturais, como a ficoeretrina e a ficocianina (PEQUENO, 2010).

Ainda, desde que muitas microalgas têm elevado valor nutricional, elevada produtividade de biomassa, baixas taxas de subsídios químicos e energéticos e reduzida demanda por área de cultivo, sua produção em escala industrial é promissora na geração de benefícios na áreas social, ambiental e econômico (PEQUENO, 2010).

No entanto, Walter (2011) adverte que a utilização de biomassa microalgal na alimentação humana, embora testada com sucesso, requer segurança quanto à inexistência de riscos microbiológicos e contaminação química, principalmente por metais pesados.

Também, Borges (2010) ressalta que as microalgas são consideradas o futuro dos biocombustíveis, uma vez que podem ser cultivadas em terras não férteis, com o uso de fotobiorreatores, e têm uma produtividade algumas vezes maior que os vegetais estruturados.

É importante frisar que todo o processo de cultivo e extração de compostos das microalgas deve ser acompanhado por profissionais das áreas de biologia, engenharia química e afins com experiência no assunto.

Referências

BERTOLDI, F.; SANT'ANNA, E.; OLIVEIRA, J. Revisão: biotecnologia de microalgas. **B.CEPPA**, Curitiba, v. 26, n. 1, p. 9-20, jan./jun, 2008. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/alimentos/article/download/11804/8320>>. Acesso em: 23 ago. 2012.

BORGES, C. **Modelagem da produção de lipídios em microalgas**. 2010. 37p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/35187/000792963.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 23 ago. 2012.

CAROLINO, L. **Cultivo de microalgas unicelulares para determinação da produção lipídica e sequestro de carbono**. 2011. 80p. Dissertação (Mestrado em Biologia Celular e Biotecnologia) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2011. Disponível em: <http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/4026/2/ulfc090739_tm_Liliana_Carolino.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2012.

DERNER et al. Microalgas, produtos e aplicações. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, nov-dez, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v36n6/a50v36n6.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2012.

EKOS. **Seminário de microalgas**. São Paulo: Instituto Ekos Brasil, 2010. Disponível em: <<http://www.ekosbrasil.org/default.asp?siteAcao=mostraPagina&paginaId=2033>>. Acesso em: 23 ago. 2012.

KOCHEN, L. H. **Caracterização de fotobioreator air-lift para cultivo de microalgas**. 2010. 37p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/35198/000792984.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 23 ago. 2012.

MENNA, S. R. **Modelagem de um biorreator do tipo airlift para cultivo de microorganismos**. 2010. 30p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/35178/000792996.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 23 ago. 2012.

MORCELLI, A. **Estudo da eficiência de diferentes agentes coagulantes na sedimentação de microalgas cultivadas em fotobioreatores**. 2011. 44p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/36898/000793008.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 23 ago. 2012.

OLIVEIRA, O. S. **Optimização da produtividade lipídica da microalga *Arthrospira platensis* como matéria-prima para biocombustíveis**. 2009. 65p. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009. Disponível em: <http://run.unl.pt/bitstream/10362/5903/1/Oliveira_2009.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2012.

PEQUENO, M. A. **Avaliação do potencial produtivo de óleos obtidos a partir de microalgas por cromatografia gasosa**. 2010. 54p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010. Disponível em: <http://www.quimica.ufpb.br/posgrad/dissertacoes/Dissertacao_Marcos_Pequeno.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2012.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal**. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001. 906p.

SILVA, M. C. **Tratamento terciário de efluente secundário, usando a microalga *Chlorella sp.* imobilizada em matriz de alginato de cálcio**. 2011. 79p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2011. Disponível em: <http://pos-graduacao.uepb.edu.br/ppgcta/?wpfb_dl=27>. Acesso em: 23 ago. 2012.

WALTER, A. **Estudo do processo biotecnológico para obtenção de ficocianina a partir da microalga *Spirulina platensis* sob diferentes condições de cultivo**. 2011. 133p. Dissertação (Mestrado em Processos Biotecnológicos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em:

<<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/26959/ALFREDO%20WALTER.PDF?sequence=1>>. Acesso em: 23 ago. 2012.

ZARDO, I. **Análise de viabilidade econômica da produção de biodiesel a partir de microalgas**. 2011. 34p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em:

<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/38387/000823849.pdf?sequence=1>>.

Acesso em: 23 ago. 2012.

Nome do técnico responsável

Lucas Gomes Rocha

Nome da instituição do SBRT responsável

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC

Data de finalização

24 ago. 2012