



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# **Análise de viabilidade econômica da produção de biodiesel a partir de microalgas**

*Autor: Ivanor Zardo*

*Orientador: Dr. Marcelo Farenzena*

Porto Alegre, 14 de dezembro de 11

## Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	viii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Microalgas	3
2.2 Sistemas de cultivo	5
2.3 Métodos de colheita das microalgas	9
2.3.1 Centrifugação	10
2.3.2 Flotação	10
2.3.3 Floculação	10
2.3.4 Filtração	10
2.4 Processamento	10
2.5 Rompimento Celular	11
2.6 Extração do óleo	12
2.7 Produção do biodiesel	12
3 Materiais e Métodos	14
3.1 Localização	14
3.2 Seleção da espécie de microalgas	15
3.3 Preparação do meio de cultivo	16
3.4 Sistemas de cultivo propostos	17
3.4.1 Sistema aberto	17
3.4.2 Sistema fechado	18
3.5 Colheita	19
3.6 Extração	20
3.7 Produção de biodiesel	21
4 Formulação do Problema ou Estudo de Caso	22
4.1 Aquisição do terreno	22
4.2 Levantamento de custos com sistemas de Cultivo	22
4.2.1 Fotobiorreatores verticais	22
4.2.2 Fotobiorreatores tubulares horizontais sobre o solo	23
4.2.3 Sistema lagoa raceway	24
4.3 Meio de cultivo	25
4.4 Colheita	25

---

4.5	Extração e produção de biodiesel	25
5	Resultados	27
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	32
7	Referências	33

## **Agradecimentos**

*À Deus por sempre iluminar meu caminho e me ajudar a enfrentar os obstáculos.*

*Ao professor Dr. Marcelo Farenzena pela excelente orientação.*

*Aos meus pais e irmãos que sempre me incentivaram e apoiaram em minhas escolhas.*

*Aos meus colegas e amigos pela amizade e agradável convivência.*

## Resumo

Na atual situação de desenvolvimento econômico mundial, na qual vem tornando crescente a demanda por combustíveis a baixo custo para os sistemas industriais e de transporte, está causando dupla crise, a escassez das limitadas fontes de combustíveis fósseis e a degradação ambiental. Com a necessidade de combater esses problemas é que vem se tentando desenvolver combustíveis renováveis e neutros em emissões nocivas. A primeira geração de biocombustíveis obtidos através de culturas agrícolas terrestres preenche em parte esses requisitos, porém, não atinge os limites da demanda e ainda competem com a produção de alimentos. Daí o interesse no desenvolvimento de uma segunda geração de biocombustíveis produzidos de fontes não alimentares, tais como as microalgas, entre as quais, algumas espécies, apresentam elevada produtividade em biomassa e alto teor em óleo quando comparadas às plantas terrestres. Porém, para a substituição dos combustíveis convencionais pelos microalgais, tem-se o fator econômico que se sobressai frente ao ambiental, assunto esse que serviu de estímulo para a realização desse trabalho que tem por objetivo se fazer uma análise de viabilidade econômica de produção de biodiesel através de microalgas, estudando diversas formas de cultivo e processamento, buscando a maneira mais viável economicamente de se obter biocombustível proveniente de microalgas. Partindo-se da escolha da localização para implantação da fazenda de microalgas como sendo no município de Palmares do Sul, litoral norte gaúcho; espécie de microalga utilizada: *Chlorella vulgaris*, por sua robustez e alta produtividade lipídica (Chisti, 2007); estudo dos três sistemas de cultivo: fotobiorreator tubular vertical, fotobiorreator horizontal sobre o solo e lagoa *raceway*; com avaliação dos diferentes materiais para sua confecção, buscando-se o mínimo custo de produção, atingindo-se os valores com investimento inicial de R\$ 301.122,00, R\$ 220.825,00 e R\$ 192.990,00 para cada sistema proposto respectivamente, bem como a colheita que será realizada em duas etapas, uma primeira por floculação e após centrifugação, chegando aos valores por quilograma de biomassa seca colhida de R\$ 1,43 para o sistema de cultivo fotobiorreator tubular vertical, R\$ 1,64 para os horizontais sobre o solo e R\$ 10,89 para o lagoa *raceway*. Por fim, através de uma estimativa de custo de extração do óleo e produção de biodiesel através da cultura da soja, chegou-se aos valores por litro de biodiesel de R\$ 3,31, R\$ 3,78 e R\$ 24,60 para os respectivos sistemas de cultivo, concluindo-se a não viabilidade econômica frente ao biocombustível convencional, que apresenta custo de R\$ 2,38, devido principalmente ao alto consumo de energia gasto com o cultivo e colheita das microalgas. Porém, as microalgas têm grande potencial de no futuro ser uma das principais fontes de biocombustíveis e contribuir para a normalização dos efeitos climáticos, já sentidos, devido principalmente às emissões antropogênicas resultantes da queima de combustíveis fósseis.

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Esquema de cultivo lagoa <i>raceway</i> ( extraído de Jorquera et al., 2010). .....	6
<b>Figura 2.2:</b> a) Fotobiorreator de placa plana; b) Fotobiorreator tubular vertical; c) Fotobiorreator tubular horizontal. ....	6
<b>Figura 2.3:</b> Formas de se obter energia através da biomassa microalgal (adaptado de Wang et al., 2008). ....	11
<b>Figura 2.4:</b> Equação geral da reação de transesterificação, sendo que, R representa a cadeia carbônica dos ácidos graxos e R <sup>1</sup> a cadeia carbônica do álcool reagente (extraído de Gama (2011)). ....	13
<b>Figura 3.1:</b> Mapa que representa representando a localização da fazenda de microalgas proposta nesse trabalho.....	14
<b>Figura 3.2:</b> Fluxograma do processo de cultivo de microalgas até extração de seu óleo visando a produção de biodiesel. ....	15
<b>Figura 3.3:</b> Processo de produção de biodiesel. ....	21
<b>Figura 4.1:</b> A) Representação da área de cultivo do sistema tubular vertical; B) Representação da disposição dos fotobiorreatores nas fileiras com suas respectivas medidas. ....	23
<b>Figura 4.2:</b> Representação da área do sistema de cultivo e figura ilustrativa dos fotobiorreatores horizontais sobre o solo. ....	24
<b>Figura 4.3:</b> Demonstração do sistema de cultivo lagoa <i>raceway</i> . ....	24
<b>Figura 5.1:</b> Gráficos de custos anuais comparativos entre os três sistemas. ....	30

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1:</b> Comparação de microalgas com outras fontes de óleo para fabricação de biodiesel (adaptado de Mata et al., 2010). .....	4
<b>Tabela 2.2:</b> Comparação de produtividades entre fotobiorreatores e sistemas abertos (adaptado de Chisti, 2007). .....	7
<b>Tabela 2.3:</b> Comparação entre fotobiorreatores e sistemas abertos (adaptado de Mata et al., 2010). .....	8
<b>Tabela 3.1:</b> Comparações quanto ao rendimento em óleo dentre espécies cultivadas em duas diferentes salinidades (adaptado de Araujo et al., 2010).....	16
<b>Tabela 3.2:</b> Comparação entre materiais utilizados para confecção dos fotobiorreatores (extraído de Fernandez-Velasco, (2010)) .....	19
<b>Tabela 4.1:</b> Valores utilizados para estimativa de custos com implantação e cultivo das microalgas.....	22
<b>Tabela 4.2:</b> Estimativa de custo para extração de óleo para cultura de soja. ....	26
<b>Tabela 5.1:</b> Lista de equipamentos com custos e consumo de energia. ....	27
<b>Tabela 5.2:</b> Comparativo entre os custos de implantação da fazenda de microalgas com materiais e equipamentos.....	28
<b>Tabela 5.3:</b> Custos anuais com cultivo das microalgas nos diferentes sistemas. ....	29
<b>Tabela 5.4:</b> Estimativa do custo de produção de biomassa para cada sistema proposto..	30
<b>Tabela 5.5:</b> Custo ao litro do biodiesel proveniente de microalgas conforme sistemas propostos nesse trabalho. ....	31

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

PEBD - Polietileno de Baixa Densidade

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PMMA - Polimetil-metacrilato

PVC - Polivinil-cloreto

FBR - Fotobiorreator



## 1 Introdução

O crescente consumo de combustíveis fósseis como fonte de energia vem causando significativas alterações em nosso ecossistema. Devido principalmente ao aumento da concentração do gás CO<sub>2</sub> na atmosfera, produto da reação de combustão desses combustíveis, tem-se a ocorrência do efeito estufa e conseqüente aquecimento global. Com objetivo de amenizar ou controlar esse problema, em 1997 foi assinado o Protocolo de Kyoto, o qual estabelece a redução de 5,2% das emissões de gases que causam o efeito estufa até 2012, tendo como comparação os níveis de 1990 (Louette, 2007).

Desde então se tem despendido grande quantidade de recursos em estudos para o desenvolvimento de técnicas que buscam a redução desses gases, técnicas essas de sequestro e fixação ou de redução em suas emissões. Como a redução em suas emissões representa uma redução no consumo de energia, no atual estágio de desenvolvimento do planeta isso seria impraticável. Portanto, as saídas seriam ou aprisionar esses gases em nosso subsolo ou fixá-los através do cultivo de plantas ou seres que os converta por meio da fotossíntese. Dentre essas alternativas a melhor escolha é pela obtenção de energia através de plantas ou seres que fixam CO<sub>2</sub> produzindo outros produtos de valor agregado como um deles sendo o óleo, que através de seu processamento pode ser convertido em biodiesel, combustível proveniente de fontes renováveis, mais limpo e menos agressivo à natureza.

Diversas culturas como soja, mamona, milho, girassol dentre outras, já estão sendo cultivadas com a finalidade de obtenção de biodiesel, porém, com o aumento da demanda por produtos que são usados tanto em biocombustíveis como em alimentos (humano ou animal), os preços desses tendem a subir e conseqüentemente são repassados aos consumidores, como por exemplo, através de carnes e laticínios.

Buscando-se uma solução para tudo isso é que surge o cultivo das microalgas, organismos que crescem rapidamente, tem produção cerca de 50 a 100 vezes maior do que as culturas terrestres, têm grande capacidade fotossintética, fixando CO<sub>2</sub> e, portanto, contribuindo para a mitigação do efeito estufa, não necessitam de terras férteis para seu cultivo, ao contrário de culturas terrestres que competem com culturas alimentícias, além de produzirem produtos como óleos (podem passar dos 70% em massa) (Chisti, 2007), proteínas e biomassa, servindo como fonte de diversas matérias-primas.

Dentro desse cenário se enquadra o presente trabalho de conclusão de curso, o qual tem como objetivo avaliar os melhores métodos e tecnologias de cultivo e colheita de microalgas, bem como da seleção da espécie que se apresenta mais adequada, analisando a viabilidade econômica para obtenção de biodiesel através do óleo extraído dessas microalgas cultivadas em terreno localizado no estado do Rio Grande Sul.

O presente trabalho é dividido da seguinte forma: no Capítulo 2 tem-se a revisão bibliográfica com a descrição das microalgas e seu potencial produtivo frente a outras culturas, bem como dos diversos métodos para seu cultivo, colheita e processamento para obtenção de produtos com agregado valor comercial. No Capítulo 3 cita-se a possível localização do cultivo de microalgas, a escolha da espécie que se apresenta mais adequada ao cultivo, assim como a escolha dos materiais a serem utilizados para confecção de cada sistema proposto e dos equipamentos necessários para o cultivo e

colheita das microalgas, objetivando a produção de biodiesel. No Capítulo 4 encontra-se o levantamento quantitativo de materiais e seus respectivos custos, bem como de produção para cada sistema. No Capítulo 5 os resultados, citando os custos totais com investimento inicial, de cultivo anuais e de processamento, chegando-se ao valor por litro de biodiesel de microalgas referente a cada sistema, comparando-o com o valor do biodiesel convencional. Por fim, no Capítulo 6, as conclusões segundo os resultados obtidos pelo presente trabalho e algumas sugestões de novos trabalhos para contribuir com o desenvolvimento dessa promissora tecnologia.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Microalgas

As microalgas são conhecidas como uma das mais antigas formas de vida do planeta, definindo-se como organismos microscópicos fotossintetizantes que crescem rapidamente e em diferentes condições ambientais devido à sua estrutura celular simples (Mata *et al.*, 2010). Nessa definição encaixam-se os procarióticos (sem núcleo definido): cianobactérias; e os eucarióticos (núcleo definido envolto por membrana): clorófilas e diatomáceas.

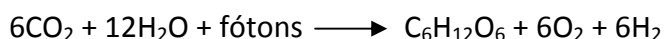
É estimado que existam mais de 50.000 espécies, das quais aproximadamente apenas 30.000 já foram estudadas e analisadas (Mata *et al.*, 2010).

Quanto ao seu metabolismo, algumas espécies são capazes de alterá-lo de acordo com as mudanças ambientais. Segundo Rym *et al.* (2010), o cultivo pode ser fotoautotrófico, quando tem como única fonte de energia a luz, a qual é convertida em energia química através da fotossíntese, heterotrófico, quando são usados compostos orgânicos como fonte de carbono e energia, mixotróficos, quando tanto o metabolismo autotrófico como heterotrófico podem ser usados dependendo da concentração dos compostos orgânico e da intensidade da luz disponíveis e fotoheterotrófico, quando a luz é necessária para que os compostos orgânicos sejam consumidos como fonte de carbono.

A temperatura ótima para o crescimento das microalgas é em torno de 20-35°C e os nutrientes essenciais para o seu crescimento incluem nitrogênio, fósforo, ferro, enxofre e em menor quantidade, magnésio, cálcio e sílica. Água do mar complementada com nitratos, fertilizantes fosfatados e alguns outros micronutrientes comerciais, são comumente usados (Breitman & Hsu, 2010).

É reportado na literatura que a produtividade em biomassa das microalgas pode chegar até 100 vezes mais que a das plantas terrestres mais eficientes. Segue na Tabela 2.1 a relação do rendimento em óleo entre microalgas e algumas culturas agrícolas.

A luminosidade é outro fator bastante importante para o crescimento das células, já que é a luz quem fornece a energia necessária para através do ciclo de Calvin produzir carboidratos pelo consumo de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, segundo a equação de reação:



A radiação capturada pelas microalgas para a realização da fotossíntese são raios com comprimento de onda entre 400 e 700 nm, representando 42,3% do total de energia do espectro da luz visível (Brennan & Owende, 2010). Porém quando a intensidade luminosa for alta, pode ocorrer o fenômeno da fotoinibição. De acordo com Kang *et al.* (2003), a fotoinibição ocorre porque sob condições de alta intensidade luminosa os pigmentos fotossintéticos das microalgas capturam mais prótons do que a fotossíntese pode processar o que pode danificar o aparato fotossintético celular.

**Tabela 2.1:** Comparação de microalgas com outras fontes de óleo para fabricação de biodiesel (adaptado de Mata *et al.*, 2010).

Fonte de óleo	Teor de óleo (% de biomassa em base seca)	Produção de óleo (L óleo/ha. ano)	Uso de terra (m <sup>2</sup> /kg biod. ano)	Produtividade de biodiesel (kg biod./há. ano)
Milho ( <i>Zea mays</i> )	44	172	66	152
Cânhamo ( <i>Cannabis sativa</i> )	33	363	31	321
Soja ( <i>Glycine max</i> )	18	636	18	562
Pinhão-manso ( <i>Jatropha curcas</i> )	28	741	15	656
Camelina ( <i>Camelina sativa</i> )	42	915	12	809
Canola ( <i>Brassica napus</i> )	41	974	12	862
Girassol ( <i>Helianthus annuus</i> )	40	1070	11	946
Mamona ( <i>Ricinus communis</i> )	48	1307	9	1156
Óleo de palma ( <i>Elaeis guineensis</i> )	36	5366	2	4747
Microalga (baixo teor de óleo)	30	58.700	0,2	51.927
Microalga (médio teor de óleo)	50	97.800	0,1	86.515
Microalga (alto teor de óleo)	70	136.900	0,1	121.104

A inibição do crescimento celular pode ser causada também pela alta concentração de O<sub>2</sub> no meio de cultivo. Devido ao oxigênio ser um produto da reação do CO<sub>2</sub> com água, ele deve ser constantemente retirado dos fotobiorreatores (degasado), principalmente dos que possuem tubulações mais longas. Segundo Chisti (2007), para prevenir a inibição por O<sub>2</sub>, a concentração de oxigênio dissolvido no meio de cultivo não deve exceder em 400% o valor de saturação alcançado na presença de ar.

As microalgas selecionadas para o cultivo devem apresentar um bom desempenho no crescimento, devendo ser robustas, ter capacidade de crescer satisfatoriamente, ter alta produção durante a colheita e durante o processamento fornecer grande quantidade de material seco de boa qualidade (Scoparo, 2010).

Algumas vantagens do uso de microalgas para produção de biodiesel segundo Brennan (2010) são:

- Microalgas são capazes de se multiplicar o ano inteiro, resultando numa produção superior a qualquer outra cultura;
- Crescem em meio aquoso, mas necessitam de menos água do que culturas terrestres, reduzindo assim o consumo de água;

- As microalgas podem ser cultivadas em terras que não são produtivas para culturas terrestres, não afetando a produção de alimentos;
- Microalgas têm potencial de crescimento rápido, podendo dobrar sua massa em menos que 3,5 horas, apresentando de 20 - 60% de óleo por peso seco de biomassa, dependendo da espécie a ser cultivada;
- Tem capacidade de fixar o CO<sub>2</sub>, que é um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa (para 1 kg de biomassa seca é consumido cerca de 1,83 kg de CO<sub>2</sub>);
- Os nutrientes para cultivo das microalgas, como nitrogênio e fósforo, podem ser obtidos de efluentes aquosos, gerando-se biomassa enquanto se trata efluentes;
- O cultivo de algas não necessita o uso de agrotóxicos;
- Pode-se produzir além do óleo, outros subprodutos como proteínas e biomassa, a qual após a extração serve para uso fertilizante ou até alimentício;
- A composição bioquímica da biomassa para produção do biodiesel pode ser controlada variando as condições de cultivo das microalgas;
- Microalgas são capazes de produzir biohidrogênio.

## 2.2 Sistemas de cultivo

A escolha do método mais apropriado para o cultivo das microalgas é de suma importância para a viabilidade do processo, buscando-se um ponto ótimo entre custo de implantação/operação com a produtividade de cada método.

O sistema de cultivo aberto, lagoa *raceway* (Figura. 2.1), é composto por canais em circuito fechado de recirculação que tem normalmente cerca de 0,3 m de profundidade. O sistema de mistura e circulação é produzido por um rotor de pás e o fluxo é guiado por chicanas colocadas no canal de escoamento. Os canais de escoamento podem ser construídos em concreto ou chão batido, sendo revestidos com plástico branco ou transparente. Durante o dia, a cultura é alimentada continuamente em frente ao rotor de pás, onde o fluxo começa e a retirada para colheita é feita logo atrás do rotor de pás, após a conclusão do ciclo de circulação. O rotor de pás opera continuamente para evitar decantação de biomassa (Figura. 2.1). O método lagoa *raceway* é utilizado desde 1950 e, portanto tem-se um vasto conhecimento sobre sua operação e projeto (Chisti, 2007). Como a água está diretamente em contato com o ar, sua evaporação pode ser considerada significativa, sofrendo oscilações de temperatura noite/dia e durante diferentes estações do ano. A produtividade pode ser afetada pela contaminação por microalgas indesejadas e microorganismos nocivos. A concentração de biomassa mantém-se baixa, pois as lagoas tem deficiente agitação o que resulta numa não exposição suficiente das algas à luz solar. Lagoas *raceway* são bastante utilizadas para o cultivo de microalgas por serem de baixo custo tanto de implantação como de operação, mas necessitam de grande área de cultivo e são mais susceptíveis à contaminações do que fotobiorreatores.



na direção Norte-Sul para melhor captação da luz solar. Os fotobiorreatores horizontais que também são dispostos com comprimento na direção Norte-Sul e alocados em forma de cerca ou sobre o chão um ao lado do outro (Figura 2.4 c).

Ao contrário das lagoas *raceway*, fotobiorreatores permitem o cultivo de diversas espécies de microalgas por longos períodos sem problemas com contaminação e ainda podendo ser otimizados de acordo com as características fisiológicas da espécie de interesse. Os fotobiorreatores fechados também têm a vantagem, por possuir a limitação das paredes do reator, de evitar contato com ar atmosférico externo permitindo melhor controle sobre as condições de cultivo (pH, temperatura, agitação e concentração de CO<sub>2</sub>), menor evaporação de água para o meio externo, redução das perdas de CO<sub>2</sub>, possibilidade de cultivos com concentração celular e produtividade maiores e evitar a incidência direta da luz no cultivo, amenizando a intensidade dos raios devido a eles primeiro ter que atravessar as paredes transparentes do reator (Chisti, 2007).

Por outro lado, possuem algumas limitações como possibilidade de superaquecimento, acumulação de oxigênio, rompimento celular por cisalhamento e maiores custos de construção e operação.

Segundo Chisti (2008), mesmo o custo associado à construção dos fotobiorreatores ser em torno de dez vezes maior do que em sistemas abertos, esses são compensados pela maior produtividade de biomassa e concentração celular numa mesma área de cultivo, como demonstrado na Tabela 2.2 resultando numa maior produção por área ocupada e favorecendo com isso uma economia de energia na posterior colheita (Mata et al., 2010).

**Tabela 2.2:** Comparação de produtividades entre fotobiorreatores e sistemas abertos (adaptado de Chisti, 2007).

Variáveis	Fotobiorreator	Lagoa <i>raceway</i>
Produção de biomassa anual (kg)	100,000	100,000
Produção volumétrica diária (kg m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> )	1.535	0.117
Produtividade por área cultivada (kg m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	0.072	0.035
Concentração de biomassa alcançada (kg m <sup>-3</sup> )	4	0.14
Taxa de diluição (d <sup>-1</sup> )	0.384	0.25
Área necessária (m <sup>2</sup> )	5681	7828
Rendimento em óleo (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	58.7	42.6
Consumo anual de CO <sub>2</sub> (kg)	183,333	183,333
Geometria do sistema	132 tubos paralelos/unidade, comprimento: 80 m; Diâmetro de tubo: 0.06 m.	978 m <sup>2</sup> /lagoa; Largura: 12 m, comprimento: 82 m, profundidade: 0.30 m.
Número de unidades	6	8

Na Tabela 2.3 pode-se verificar algumas diferenças em relação aos dois sistemas de cultivo.

**Tabela 2.3:** Comparação entre fotobiorreatores e sistemas abertos (adaptado de Mata *et al.*, 2010).

<b>Item de comparação</b>	<b>Fotobiorreatores (FBR)</b>	<b>Sistemas abertos (SAB)</b>
Controle de contaminação	Fácil	Difícil
Risco de contaminação	Reduzido	Alto
Esterilidade	Alcançável	Nenhum
Controle do processo	Fácil	Difícil
Controle de espécies	Fácil	Difícil
Agitação	Uniforme	Baixa
Regime de operação	Batelada ou semi-contínuo	Batelada ou semi-contínuo
Razão Área/Volume	Alto (20-200 m <sup>-1</sup> )	Baixo (5-10 m <sup>-1</sup> )
Concentração celular	<b>Alto</b>	<b>Baixo</b>
Investimento	<b>Alto</b>	<b>Baixo</b>
Custo de operação	Alto	Baixo
Eficiência de utilização luminosa	Alta	Baixa
Controle de temperatura	Alcançável	Difícil
Produtividade	<b>3-5 vezes mais produtivo</b>	<b>Baixo</b>
Tensão hidrodinâmica sobre as células	Baixa-alta	Muito baixa
Evaporação do meio de cultura	Baixa	Alta
Controle de transferência gasosa	Alto	Baixo
Perda de CO <sub>2</sub>	Depende do pH, alcalinidade, etc.	Depende do pH, alcalinidade, etc.
Inibição por O <sub>2</sub>	Grande problema em FBR	FBR > SAB
Aumento de escala	Difícil	Difícil

Essa maior produtividade dos fotobiorreatores em relação aos sistemas abertos se dá principalmente devido à maior área de exposição à luz, porém se não forem bem projetados podem ocorrer alguns problemas como formação de zonas escuras devido à alta concentração celular e ao fenômeno de fotoinibição. Portanto, a construção dos fotobiorreatores necessita de otimização para se atingir um bom desempenho, dimensionando-se os reatores variando altura, diâmetro e fluxo do meio de forma a se obter as melhores condições para o cultivo das microalgas e consequente alta produtividade.

Outro possível problema que também deve ser levado em conta é a deposição de microalgas nas paredes do fotobiorreator o que provoca o bloqueio dos raios luminosos e



consequente queda de produtividade. Alguns métodos devem ser adotados para controlar esse fenômeno como aumentar turbulência do escoamento ou passar bolas com mesmo diâmetro dos tubos pelo seu interior com objetivo de remover essas deposições (Chisti, 2007).

Em relação à luminosidade que é um dos principais determinantes da produtividade e então viabilidade deste processo, deve-se lembrar que as microalgas só irão efetuar fotossíntese durante o período luminoso do dia, sofrendo uma queda de produção durante a noite, já que somente as microalgas que tiverem a capacidade de efetuar metabolismo heterotrófico produzirão biomassa através de compostos orgânicos durante os períodos escuros. Quanto às estações do ano, o pico de produtividade é durante o verão, por ser a estação com mais horas de sol por dia.

Sobre otimização do processo, os fatores a serem considerados além dos já mencionados são vazão de CO<sub>2</sub> e posição em que ele deve ser injetado nos fotobiorreatores, evitando-se desperdício no caso de a vazão ser exagerada ou deficiências no caso de vazões muito baixas, a escolha da espécie a ser cultivada, a adição de nutrientes necessários para o crescimento da biomassa, a retirada de O<sub>2</sub> liberado pelas algas, o pH do meio, temperatura de cultivo e possíveis contaminações que podem vir a ocorrer (Scoparo, 2010).

Pulz, (2001) reporta que o grande desafio para o desenvolvimento da biotecnologia microalgal é a criação de sistemas de cultivo que combinem alta produtividade volumétrica e superficial com facilidade de manutenção, de forma a se obter sistemas economicamente eficientes e viáveis.

### **2.3 Métodos de colheita das microalgas**

A etapa da colheita de microalgas é de grande importância para viabilidade do processo de obtenção de biodiesel, já que representa um total de 30 a 40% do custo da produção de biomassa. Os principais métodos de colheita são através da centrifugação, flotação, floculação e filtração. A escolha dentre esses métodos depende das características da espécie de microalgas a ser colhida como, densidade, tamanho da microalga e valor do produto desejado, levando em conta a energia requerida e rapidez que cada método apresenta (Brennan & Owende, 2010).

Geralmente a colheita das microalgas envolve duas etapas:

- 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 (Brennan & Owende, 2010).

### 2.3.1 Centrifugação

A centrifugação é o método mais eficiente para a separação biomassa/água. É um método rápido, separa cerca de 90 a 95% da biomassa presente no meio e apresenta um produto (biomassa) com relativo baixo grau de umidade. Porém, possui alto consumo de energia e necessita de manutenções frequentes devido à presença de peças móveis, resultando em um alto custo de operação.

### 2.3.2 Flotação

Dentre as diferentes técnicas de flotação existentes, a flotação por ar dissolvido é a mais utilizada para a colheita de microalgas (Brennan & Owende, 2010). Tal operação unitária está baseada no arraste das células, por micro-bolhas de ar injetadas no líquido, para sua superfície onde é formada uma espécie de espuma, a qual é retirada apresentando uma lama com alta concentração de microalgas. Ao contrário da floculação, flotação não necessita de aditivos químicos. Apesar de ser um potencial método para colheita de microalgas, possui a limitação de ser caro e, portanto, desvantajoso economicamente frente a outros métodos.

### 2.3.3 Floculação

A floculação baseia-se na adição de floculantes químicos como: cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), 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, os quais por possuírem maior massa, decantam mais rapidamente. 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.

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 (Molina Grima *et al.*, 2003).

### 2.3.4 Filtração

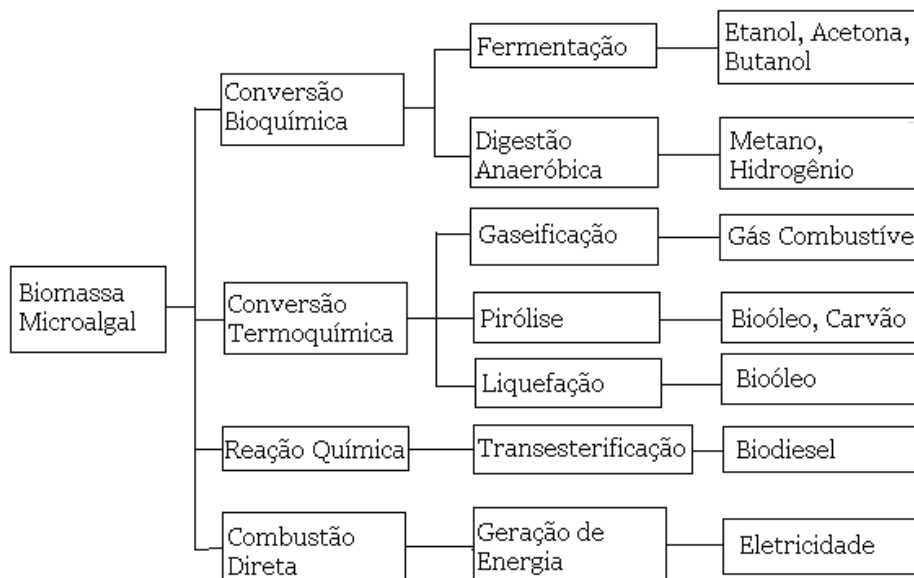
A filtração é mais apropriada para microalgas relativamente grandes (diâmetro maior de 70  $\mu\text{m}$ ). Para diâmetros menores necessita-se de membranas com poros pequenos e consequentemente de alta pressão para que ocorra fluxo através dela, inviabilizando o processo. Segundo Brennan (2010), somente para baixas vazões (menores que 2  $\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ ) a filtração é vantajosa frente à centrifugação.

## 2.4 Processamento

Devido à utilização da biomassa para fins de geração de energia, os processos seguintes à colheita serão a extração do óleo da biomassa e a sua conversão em biodiesel.

A Figura 2.3 mostra as várias maneiras de se obter diferentes combustíveis através da biomassa proveniente de microalgas (Wang *et al.*, 2008).

Na conversão bioquímica, a biomassa é convertida em etanol e butanol através de sua fermentação e em metano e hidrogênio através da digestão anaeróbica, pela degradação da biomassa por bactérias anaeróbicas.



**Figura 2.3:** Formas de se obter energia através da biomassa microalgal (adaptado de Wang *et al.*, 2008).

A conversão termoquímica envolve a decomposição térmica dos componentes orgânicos através da gaseificação, pirólise ou liquefação. A pirólise é um processo realizado sob altas temperaturas e ausência de oxigênio gerando uma mistura de produtos na fase gasosa, líquida e sólida. A liquefação é o processamento da biomassa úmida com presença de catalisadores nas condições de baixa temperatura e alta pressão para a obtenção do bio-óleo (Aresta *et al.*, 2005). A gaseificação trata-se da conversão de combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas, envolvendo vapor super aquecido e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão).

De acordo com Aresta (2005), a combustão direta é utilizada na queima da biomassa em caldeiras para a geração de vapor com aplicação em processos de cogeração de energia. A viabilidade do processo aumenta com a diminuição do teor de umidade da biomassa.

No caso deste trabalho, como o produto desejado é o biodiesel, será abordado somente o processo de extração do óleo da biomassa e posterior conversão em biodiesel através da reação de transesterificação.

## 2.5 Rompimento Celular

Após a recuperação da biomassa, o rompimento celular deve ser aplicado com objetivo de liberar o óleo que está localizado no interior das células. Esse processo deve ser o mais eficiente tanto energético como economicamente, já que dependendo da qualidade da ruptura celular, serão evitadas grandes quantidades de solventes e a extração será mais eficaz. Esse passo é particularmente importante porque o rendimento

global de biodiesel vai depender tanto do método de ruptura quanto do equipamento empregado (Amaro *et al.*, 2011).

Vários métodos podem ser usados para o rompimento das células incluindo processos mecânicos, tais como moinhos, cavitação ultra-som, e autoclave e não-mecânicos como choques, congelamento osmótico, digestão enzimática, o uso de solventes orgânicos e reações ácido ou base (Fon Sing *et al.*, 2010). O método mais utilizado para o rompimento das células é o método mecânico, visto que os métodos não-mecânicos podem desnaturar as enzimas e proteínas presentes na célula.

## 2.6 Extração do óleo

A extração de óleos vegetais é uma técnica bastante antiga, sendo que sua utilização teve início com o linho e o algodão no antigo Egito (10.000 a.C.). Com o passar dos anos, técnicas para extração foram desenvolvidas, em 1877 foi utilizada a primeira prensa hidráulica, resultando num melhor rendimento de óleo, atingindo-se a extração de 90 a 95% de todo o óleo presente no vegetal. Foi somente no em meados do século XIX que se efetuou a primeira extração com solvente (Mansano, 2011).

Como o soluto (óleo) está contido na célula (sólido), o processo é chamado extração sólido-líquido. Na extração sólido-líquido, um constituinte do sólido é transferível para um solvente de extração e em seguida é separado do restante do sólido.

Segundo King *et al.* (2002), o solvente utilizado para a extração deve atender aos seguintes requisitos:

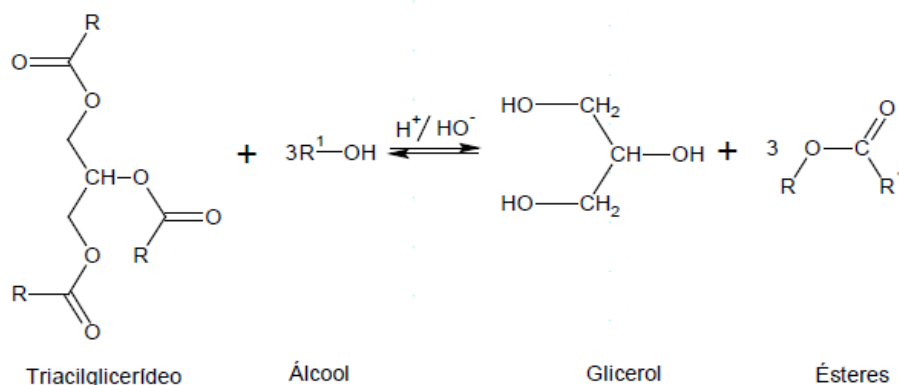
- Possuir seletividade, separando o óleo de materiais estranhos ou indesejáveis;
- Ser de fácil recuperação, sem deixar odores no óleo ou no farelo;
- Não solubilização em água;
- Ponto de ebulição que favoreça a eliminação do solvente do farelo e do óleo;
- Ter custo acessível.

O solvente a ser utilizado e que mais se aproxima aos requisitos acima mencionados para extração de óleo da biomassa de microalgas será o hexano, por possuir grande eficiência na transferência do óleo não havendo solubilização de outros componentes.

## 2.7 Produção do biodiesel

Segundo a legislação brasileira Lei N° 11.097, de 13 de janeiro de 2005, biodiesel é um “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil”.

O biodiesel é fabricado através de um processo químico chamado transesterificação o qual é uma reação química múltiplo passo, incluindo as etapas de hidrólise reversível em série, em que os triglicerídeos são convertidos para diglicerídeos, então diglicerídeos são convertidos a monoglicerídeos. Finalmente, monoglicerídeos são convertidos para ácidos graxos (Biodiesel) e glicerol (como subproduto), seguida pela re-esterificação com um álcool de cadeia curta (geralmente metanol), para garantir fácil separação por possuir alta volatilidade e estimulada por uma base forte (NaOH, KOH) que serve como catalisador da reação (Singh & Singh, 2010). Na Figura 2.4 está representada a equação geral de transesterificação.



**Figura 2.4:** Equação geral da reação de transesterificação, sendo que, R representa a cadeia carbônica dos ácidos graxos e R<sup>1</sup> a cadeia carbônica do álcool reagente (extraído de Gama (2011)).

Algumas características do biodiesel segundo Biodiesel (2011), são:

- Seu ponto de combustão na forma pura é de mais de 149°C enquanto do diesel comum é de 52°C sendo, portanto, mais seguro;
- A exaustão do biodiesel é menos ofensiva. Seu cheiro se assemelha um pouco com o cheiro de batatas fritas. Como o biodiesel é oxigenado, ele apresenta uma combustão mais completa;
- Pode ser armazenado nos mesmos locais onde o petróleo é armazenado, sendo de transporte ainda mais seguro devido sua maior temperatura de combustão;
- Provém de fontes renováveis, contribuindo para a redução do dióxido de carbono.

Embora relativamente simples, a produção de biodiesel deve respeitar a rigorosos padrões de qualidade segundo a ANP para que o combustível não prejudique o funcionamento dos motores em longo prazo. Essa preocupação deve iniciar com a qualidade do óleo usado como matéria prima até o armazenamento depois da fabricação.

### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Localização

A localização da fazenda de cultivo de microalgas é de grande importância e deve ser em local estratégico devido à necessidade de grande extensão de terra para implantação dos sistemas de cultivo, alta demanda de água para o meio de cultivo, bom grau de insolação para alta produtividade e estar relativamente próximo a grandes centros para facilitar o escoamento da produção.

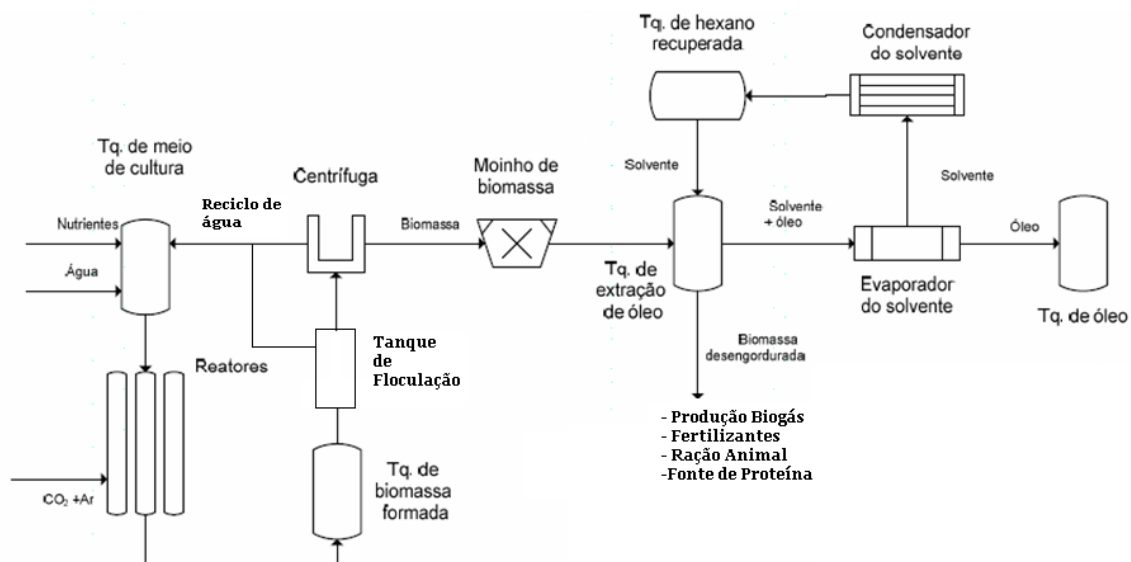
Analisando essas exigências e desconsiderando a necessidade de situar-se próxima a uma fonte de CO<sub>2</sub>, determinou-se que uma boa localização para implantação da fazenda de microalgas no estado do Rio Grande do Sul como sendo na cidade de Palmares do Sul, litoral Norte gaúcho que fica a 78,5 km da capital Porto Alegre. Tal ponto foi selecionado por ser uma posição à beira mar e satisfaz a demanda de água salgada, possui grande extensão de terra não habitada e com preço relativamente baixo, além de ser uma terra improdutivo para outras culturas.

A Figura 3.1 retirada do *Google maps* representa a localização da referida área.



**Figura 3.1:** Mapa que representa a localização da fazenda de microalgas proposta nesse trabalho.

Todo o processo desde o cultivo até extração do óleo está representado no fluxograma pela Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Fluxograma do processo de cultivo de microalgas até extração de seu óleo visando a produção de biodiesel.

### 3.2 Seleção da espécie de microalgas

A espécie selecionada é a que apresenta maior viabilidade para o emprego na produção de matérias graxas, analisando bom desempenho referente ao crescimento e ao acúmulo lipídico, bem como pelas características qualitativas de seu biodiesel de acordo com as especificações da ANP.

A seleção da espécie apropriada de microalga para cultivo é um dos fatores principais para o sucesso da produção de biodiesel. Abaixo serão citadas algumas das características desejadas para a espécie de cultivo (Breitman & Hsu, 2010):

- Possuir alta produtividade de lipídeos;
- Ser robusta e sobreviver ao cisalhamento comum em fotobiorreatores;
- Capaz de se sobressair frente a outras espécies que não são desejadas;
- Alta capacidade de fixar CO<sub>2</sub>;
- Ser tolerante a uma ampla faixa de variação de temperatura, resultado do ciclo noite/dia e variações devido a diferentes estações do ano;
- Ter ciclo de crescimento rápido;
- Possuir alta eficiência fotossintética;
- Apresentar características de auto-floculação.

Até o momento não se sabe da existência de uma espécie de microalgas que satisfaça esses critérios, sendo esta uma das barreiras a ser ultrapassada através da tecnologia de melhoramento genético. Porém, em atual momento, deve-se escolher dentre as espécies existentes, as que mais se aproximam destas características.

Segundo os dados da Tabela 3.1 extraídos de Araujo *et al.* (2010), a espécie *Chlorella vulgaris* se mostra como a melhor opção para produção de biodiesel, apesar de as outras espécies também apresentarem bom desempenho. Entretanto, a produção de biomassa sofre grande influência segundo o grau de salinidade da água, sendo a espécie *Chlorella vulgaris* a que apresenta melhores resultados sob condições de salinidade de 35 g/L.

**Tabela 3.1:** Comparações quanto ao rendimento em óleo dentre espécies cultivadas em duas diferentes salinidades (adaptado de Araujo *et al.*, 2010).

Microalga	Rendimento (Massa/Volume)		Produtividade de óleo (Kg/m <sup>3</sup> .dia)	
	Salinidade 25g/L	Salinidade 35g/L	Salinidade 25g/L	Salinidade 35g/L
<i>Chaetoceros gracilis</i>	0.1989	0.0481	2.21	0.53
<i>Chaetoceros mulleri</i>	0.0606	0.0128	0.67	0.14
<i>Chlorella vulgaris</i>	0.0415	0.2624	0.59	3.75
<i>Dunaliella sp.</i>	0.0252	0.0271	0.36	0.39
<i>Isochrysis sp.</i>	0.0176	0.0149	0.18	0.15
<i>Nannochloropsis Oculata</i>	0.0387	0.0552	0.55	0.79
<i>Tetraselmis sp.</i>	0.0002	0.0192	0.00	0.27
<i>Tetraselmis chui</i>	0.0165	0.0311	0.24	0.44
<i>Tetraselmis tetrathele</i>	0.0938	0.0642	1.34	0.92
<i>Thalassiosira weissflogii</i>	0.0198	0.0031	0.02	0.00

A microalga *Chlorella vulgaris* possui grande capacidade fotossintética, é rica em micronutrientes, possui alto teor de clorofila, proteínas, vitaminas, sais minerais e ácidos graxos. Segundo Liu *et al.* (2008) a espécie *Chlorella vulgaris* chega a possuir 56,6 % em massa de óleos, além de ser uma espécie robusta, podendo suportar, por exemplo, altas concentrações de SO<sub>x</sub> sem interferências em seu crescimento.

### 3.3 Preparação do meio de cultivo

O meio de cultivo será preparado no tanque de meio de cultura e composto por água, parte provinda de fonte externa, parte do reciclo do processo e nutrientes necessários para o metabolismo das microalgas bem como correção de pH para tornar o meio ótimo para o crescimento e desenvolvimento da biomassa.

A água será obtida do oceano, portanto com concentração de sal adequada para o cultivo (em torno de 35 g.L<sup>-1</sup> de NaCl).

O principal nutriente necessário para o crescimento celular, o qual é responsável por quase total produção de biomassa é o CO<sub>2</sub>. Segundo Zeng *et al.* (2011), a maior taxa de crescimento celular e conseqüente maior produtividade em biomassa encontra-se em meio com concentração de 6% de CO<sub>2</sub>. Considera-se que o gás CO<sub>2</sub> seja disponível em



excesso, livre de custos, proveniente de indústrias que possuam processos industriais de fermentação ou combustão, tendo-se gastos somente com sua compressão.

Além de CO<sub>2</sub> e luz solar para seu metabolismo, as microalgas necessitam de vários íons que no caso encontram-se presentes na água do mar, devendo-se adicionar, para se obter as melhores condições de cultivo, somente mais alguns nutrientes (principalmente fontes de nitrogênio e fosfato). A água sendo retirada do mar, fonte abundante e que não serve para irrigação, também tem a vantagem de o cultivo de microalgas não competir com plantações de culturas destinadas a alimentação que precisam ser irrigadas.

A alimentação com meio de cultivo será constante e em vazão determinada de acordo com a taxa de crescimento da espécie escolhida de microalga e das condições do clima. No caso de batelada, ao fim de cada batelada adiciona-se, até preenchimento dos tubos, meio de cultivo com nutrientes suficientes para as microalgas atingirem a concentração desejada em tempo determinado, acompanhando o processo através de análises periódicas de concentração das células no meio.

Segundo Borowitzka e Moheimani (2010), para produzir uma tonelada de biomassa são necessários aproximadamente de 50 a 80 kg de N e 5 kg de P. O nitrogênio pode ser adicionado na forma de nitratos, amônia ou ureias e o fosfato adicionado na forma inorgânica, podendo também tanto o N quanto o P serem aproveitados de efluentes líquidos. Durante a noite, devido à ausência de luz, a taxa fotossintética é zerada, porém em alguns casos o crescimento das microalgas pode ser sustentado pela utilização das fontes de carbono orgânico presentes no meio através do metabolismo heterotrófico. De fato, diversos microrganismos, entre eles algumas microalgas, podem alternar entre o metabolismo autotrófico (fotossintético) e o metabolismo heterotrófico (Sanchez Villasclaras *et al.*, 1996).

Para se obter um controle mais apurado sobre todos esses componentes tanto necessários como prejudiciais às microalgas, serão realizadas análises frequentes do meio, medindo-se principalmente pH, temperatura, presença de microrganismos indesejados, concentração de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e nutrientes, procurando-se atingir as condições ótimas para o crescimento e multiplicação das microalgas, obtendo consequentemente um bom rendimento em biomassa.

### **3.4 Sistemas de cultivo propostos**

Neste trabalho serão avaliados os dois sistemas de cultivo, sistema aberto (lagoas *raceway*) e sistema fechado (fotobiorreatores tubulares verticais e horizontais sobre o solo).

#### **3.4.1 Sistema aberto**

O sistema aberto implantado será do tipo lagoa *raceway*, o qual consistirá em canais feitos no solo com aproximadamente 0,3 m de profundidade, 1 m de largura e 45 m de comprimento, revestido com lona branca ou transparente de PEBD por onde circulará o meio de cultivo das microalgas. As medidas de largura e comprimento dos canais foram propostos, não possuindo limites rígidos a serem respeitados, já a profundidade deve ser menor que 0,3 m para evitar-se pontos escuros (Chisti, 2007). Para que ocorra a circulação e mistura do meio, serão colocados rotores de pás e chicanas em pontos

estratégicos dos canais. A alimentação do meio de cultura é feita continuamente em frente ao rotor de pás, onde o fluxo começa e a retirada para colheita é feita logo atrás do rotor de pás, após a conclusão do ciclo de circulação.

### 3.4.2 Sistema fechado

Serão implantados dois tipos de fotobiorreatores:

- Fotobiorreator tubular vertical do tipo coluna de bolha: segundo Miran *et al.* (1999), as dimensões ideais para fotobiorreatores tubulares verticais, analisando aproveitamento da área de fotobiorreator exposta à luz, sem haver pontos escuros, com maior produtividade são cerca de 0,2 m de diâmetro e 4 m de altura da coluna com 3,5 m de largura entre fileiras.

Devido aos fotobiorreatores tubulares verticais serem confeccionados em PEBD, que não é tão resistente a altas forças de tração e à possível ocorrência de ventos fortes na região de implantação da fazenda, foi convencionado as dimensões de 0,15 m de diâmetro e 3 m de altura. O suporte se dará por estrutura de concreto e aço, ligados em paralelo dispostos em fileiras com sentido Norte/Sul com entrada contínua de CO<sub>2</sub> pela parte inferior da coluna e retiradas de O<sub>2</sub> pela parte superior da coluna.

- Fotobiorreator tubular horizontal sobre o solo: com dimensões de 0,2 m de diâmetro e 30 m de comprimento. Será disposto sobre o chão sem necessidade de suporte, preferencialmente sobre areia por ser de cor clara e refletir a luz, no sentido Norte/Sul de maneira a receber melhor incidência de luz. Sua área para captação de luz não será totalmente aproveitada, já que a parte em contato com o chão não estará exposta à luz solar. A adição de CO<sub>2</sub> será feita em pontos estratégico de seu comprimento bem como a retirada de O<sub>2</sub> formado. Seu comprimento não deve ser muito grande a ponto que ocorra inativação das microalgas devido à alta concentração de O<sub>2</sub> liberado pelas células proveniente da fotossíntese.

O fotobiorreator tubular horizontal tem menor custo do que o vertical devido a não necessidade de sustentação por suporte, porém, possui menor efetividade quanto ao aproveitamento da luz solar e necessita maior área de terra para equivaler à produção dos fotobiorreatores dispostos verticalmente.

Alguns possíveis materiais utilizados para confecção dos fotobiorreatores estão citados na Tabela 3.2 com suas respectivas vantagens e desvantagens.

Segundo Fernández-Velasco (2010), analisando vida útil, espessura da parede, custo e razões mecânicas e de montagem, concluiu-se que o PEBD é o material mais adequado para construção dos fotobiorreatores.

Devido principalmente a longos períodos de operação, os fotobiorreatores podem apresentar a formação de uma camada escura na parede interna do filme pela deposição de biomassa e impurezas o que acaba bloqueando os raios luminosos Também podem apresentar opacidade do filme, resultado do ataque de raios UV, e possíveis rasgos ou furos no filme, o que provocaria perda de meio e biomassa. Caso o filme estiver muito deteriorado, deve-se fazer a troca do mesmo, caso for somente sujo, busca-se uma limpeza apropriada para o tipo de sistema de cultivo. O filme de PEBD tem vida útil de cerca de 3 anos (Fernández-Velasco, 2010).

Deverão se fazer análises frequentes do meio como, medição de temperatura, pH, composição nutricional, concentração celular, níveis de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> para ajustes caso necessário, buscando-se as condições ótimas para o crescimento e bom desenvolvimento celular e evitando-se perdas por desperdício com possíveis exageros de dosagem.

**Tabela 3.2:** Comparação entre materiais utilizados para confecção dos fotobiorreatores (extraído de Fernandez-Velasco, (2010))

Material	Vantagens	Desvantagens
<b>Vidro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Totalmente translúcido sem perda de transparência com o decorrer do tempo;</li> <li>- Vida útil em torno de 20 anos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frágil e, portanto, de difícil transporte;</li> <li>- Requer boa estrutura para suporte.</li> <li>- Relativamente caro;</li> </ul>
<b>Acrílico (PMMA)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa transparência;</li> <li>- Resistente mecanicamente;</li> <li>- Longa vida útil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquecimento devido à deposição de algas nas paredes internas;</li> <li>- De custo elevado.</li> </ul>
<b>PVC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leves;</li> <li>- Resistência à corrosão;</li> <li>- Resistente mecanicamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quando atacado por raios UV tendem a ficar opacos bloqueando a luz solar.</li> </ul>
<b>PEBD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa transparência à luz visível;</li> <li>- Fácil manuseio;</li> <li>- Barato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vida útil em média de 3 anos;</li> <li>- Fácil rompimento caso de contato com materiais pontiagudos.</li> </ul>
<b>PEAD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Barato e com características de PEBD.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difícil soldagem e, portanto, menor resistência à tração.</li> </ul>

### 3.5 Colheita

A colheita é um fator muito importante a ser contemplado no processo. Sua determinação deve levar em conta diversos fatores que podem tornar o método satisfatório ou não. Dentre esses, estão as características das microalgas utilizadas, principalmente tamanho. Para microalgas relativamente grandes pode-se utilizar filtração, já para as menores é preferível se utilizar centrifugação. Outro fator é a vazão de meio a ser separado: para vazões menores que 2 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup> pode-se utilizar filtração, já para vazões maiores a centrifugação se mostra mais vantajosa (Brennan & Owende, 2010).

A floculação, por exemplo, é um método barato, porém lento e resulta numa biomassa bastante úmida, necessitando-se de um posterior tratamento para atingir o grau de umidade ótimo e então ser extraído o óleo.

A centrifugação e a filtração são os métodos que se apresentam mais eficientes, porém mais caros (o consumo de energia por massa separada do meio cresce exponencialmente com o declínio da concentração de alimentação da centrífuga), sendo

a escolha baseada na qualidade desejada para o produto final, na concentração da biomassa no meio de cultivo e no tamanho das células (Scoparo, 2010).

Segundo uma análise das características do cultivo como a espécie a ser cultivada, o tamanho da microalga, a concentração do meio de cultivo a ser separado, a vazão de meio de cultivo e a umidade desejada da biomassa já processada, o método a ser implantado ser de floculação para uma primeira separação. A pré-separação será realizada em tanque de 20 m<sup>3</sup> de capacidade, separando a água, que retorna para o tanque de meio de cultivo. O lodo concentrado será direcionado para a centrífuga onde será separado o restante da água resultando numa biomassa com em torno de 5% de umidade extracelular presente, pronta para etapa de extração do óleo.

Através de uma pré-separação do meio realizada por floculação (método barato, representando lodo com alto teor de umidade), economiza-se em energia e conseqüentemente em custos já que a centrifugação é um método caro, porém eficiente.

### 3.6 Extração

Depois de recuperada, a biomassa deve passar pela etapa de rompimento celular para promover a ruptura das células e conseqüente liberação do óleo para o meio externo. O rompimento celular será realizado mecanicamente através de um moinho de esferas (*bead mill*).

A biomassa já moída está pronta para a etapa de extração, que será realizada no tubo extrator de óleo pela operação unitária de separação sólido-líquido, utilizando hexano como solvente, que por ter afinidade pelo óleo produzido das células, promove a sua extração. Essa operação é similar à realizada na extração de óleos vegetais.

Após a adição de hexano à biomassa, ocorrerá a formação de três fases, onde se separará uma fase menos densa rica em hexano contendo o óleo, que é pouco miscível em água, de outras duas, uma líquida (água) e uma sólida (biomassa desengordurada), as quais podem ser separadas por escoamento da água em excesso e após por secagem.

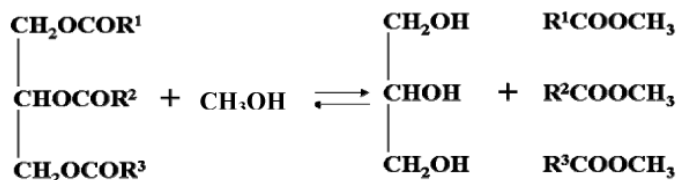
Portanto, duas correntes irão deixar o tanque de extração, a mais leve, composta pelo solvente e pelo óleo podendo ser chamada de miscela, que será enviada para o evaporador de solvente e a corrente composta pela biomassa desengordurada e água que passará por um dessolvetizador secador.

Nos evaporadores, com a aplicação de calor, o hexano por ser muito mais volátil que o óleo, evapora e é recuperado no processo por um condensador que o direciona para o tanque de solvente que alimenta novamente o extrator, operando, portanto, em ciclo fechado. A fração líquida restante nos evaporadores (que não evaporou) resulta em uma corrente de óleo que é destinada a tanques de armazenamento para aguardar posterior processo para obtenção do biodiesel.

A corrente de biomassa após dessolvetizada e seca também é armazenada podendo ser utilizada para diversos fins, como alimento, ração animal, fertilizantes ou até processada em biorreatores para produção de outros combustíveis.

### 3.7 Produção de biodiesel

O óleo então proveniente da etapa de extração é reagido com um álcool (metanol) sob efeito de um catalisador (KOH, NaOH ou etanolato de potássio), produzindo ésteres (Biodiesel) e glicerol na proporção estequiométrica representada pela reação:



Embora a proporção estequiométrica dos reagentes seja três moléculas de álcool para cada molécula de triglicerídeo, a proporção 6:1 é geralmente utilizada para deslocar a reação na direção dos produtos garantindo que todo o triglicerídeo seja consumido (Paiva, 2010). Utiliza-se o metanol para reação, justamente por ser uma molécula pequena e possuir baixo ponto de ebulição, facilitando assim sua separação dos produtos e posterior reaproveitamento. Pela reação percebe-se a formação de uma molécula de glicerina para cada 3 moléculas de biodiesel. Essa glicerina, após purificada, pode ser comercializada. Um esquema do processo pode ser visto na Figura 3.3.

O balanço de massa da reação fica:

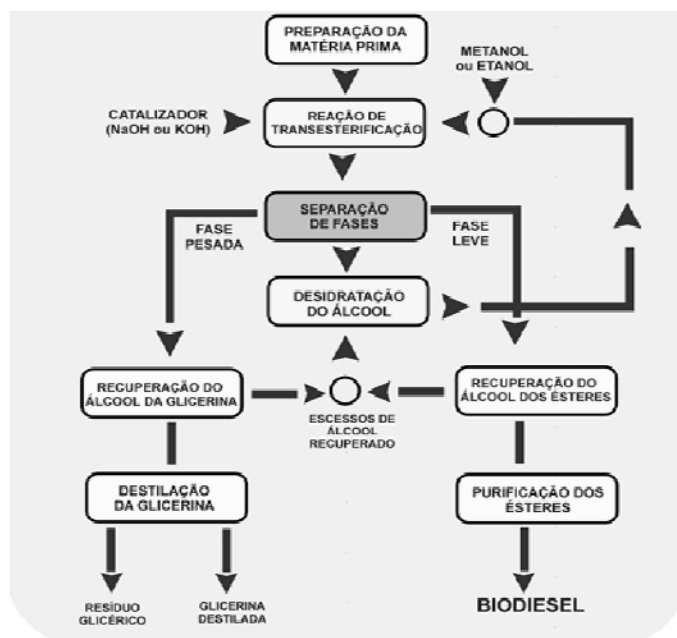
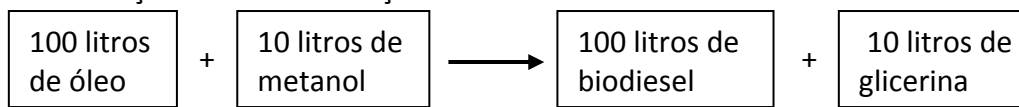


Figura 3.3: Processo de produção de biodiesel.

## 4 Formulação do Problema ou Estudo de Caso

### 4.1 Aquisição do terreno

O terreno que será localizado na cidade de Palmares do Sul, situado próximo ao mar, que segundo a prefeitura são terrenos arenosos e impróprios para agricultura, podendo ser usados somente para plantação de árvores exóticas (como *pinus*), que tem custo por hectare de R\$ 3.000,00.

### 4.2 Levantamento de custos com sistemas de Cultivo

Para estimativa dos custos para implantação da fazenda de microalgas com materiais, floculantes e nutrientes, obtiveram-se os valores de sites confiáveis da internet e segundo pesquisa feita no Mercado Agropecuário Santa Clara. Os valores utilizados para realização desse trabalho estão contidos na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Valores utilizados para estimativa de custos com implantação e cultivo das microalgas.

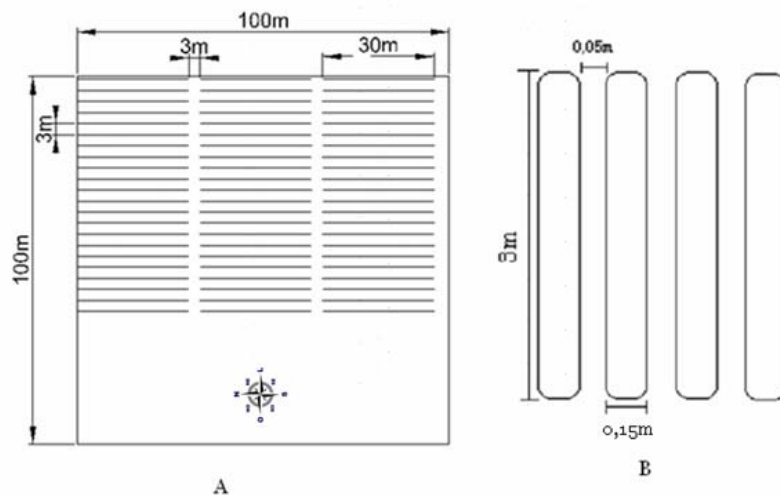
<b>Materiais</b>	<b>Preços</b>
Lona (PEBD, transparente, 150 micras com aditivo UV) (m <sup>2</sup> )	R\$ 1,60
Postes	R\$ 15,00
Perfis de aço (kg)	R\$ 2,90
Tubos de PVC 3" (m)	R\$ 4,85
Tubos de PVC 1" (m)	R\$ 2,00
Conexões para tubos (0,2 m diâmetro)	R\$ 5,00
Floculante (kg)	R\$ 0,30
Nutrientes NPK (saco de 50 kg)	R\$ 50,00

No caso da compra de grandes quantidades desses materiais, seus valores podem sofrer descontos, resultando em uma significativa economia.

#### 4.2.1 Fotobiorreatores verticais

Os fotobiorreatores tubulares verticais serão confeccionados com filme de PEBD com 150 µm de espessura, diâmetro de 0,15 m e altura de 3 m.

O hectare será dividido em 3 blocos com 100 metros de largura por 30 metros de comprimento, onde os fotobiorreatores serão dispostos em fileiras no comprimento de 30 m e distanciadas dentre elas de 3 m (32 fileiras), com distância entre cada tubo de 0,05 m, conforme Figura 4.1, resultando num número total de tubos por hectare de 14.400.



**Figura 4.1:** A) Representação da área de cultivo do sistema tubular vertical; B) Representação da disposição dos fotobiorreatores nas fileiras com suas respectivas medidas.

A área necessária de filme transparente de PEBD de 150  $\mu\text{m}$  de espessura por hectare de cultivo será de 20.200  $\text{m}^2$ . Segundo o valor por  $\text{m}^2$  de filme, o custo total com filme será de R\$ 32.313,00.

Quanto à estrutura de sustentação dos fotobiorreatores, será composta de postes de concreto que servirão de suporte para os perfis de aço, nos quais os fotobiorreatores ficarão fixados.

O vão entre cada poste de concreto será de 4 m, resultando em 8 postes por fileira de cada bloco, totalizando 768 postes por hectare. Para os perfis de aço serão necessários o equivalente a 2.880 metros por hectare, resultando num peso de 14.331 Kg de aço. O valor total gasto com sustentação por hectare será de R\$ 52.860,00.

Para transporte do meio de cultivo para os fotobiorreatores e do meio de cultivo concentrado para os tanques de biomassa formada serão utilizados tubos de PVC de 3" e para condução de  $\text{CO}_2$  para os fotobiorreatores serão utilizados tubos de PVC de 1" num total de 3.000 metros por hectare cada, gerando um custo aproximado de R\$ 20.000,00.

A concentração segundo Hulatt (2011), atingida após 9 dias de cultivo será de 3,6  $\text{Kg}/\text{m}^3$ , sendo a capacidade total em volume de meio por hectare de 757  $\text{m}^3$ , a produção total de biomassa seca/ano será de 110.572 kg.

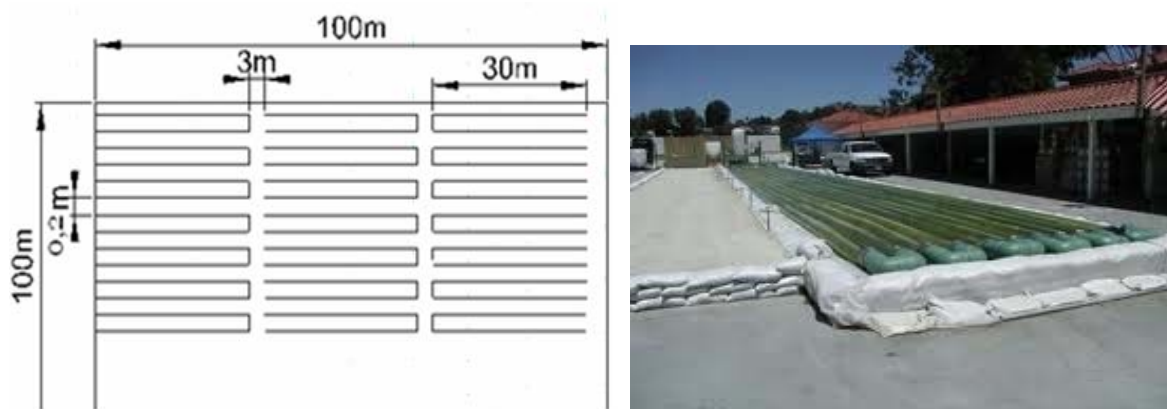
#### 4.2.2 Fotobiorreatores tubulares horizontais sobre o solo

Este sistema também será confeccionado com filme de 150  $\mu\text{m}$  de espessura de PEBD, porém não necessita de estrutura de sustentação, sendo disposto sobre o solo. Os tubos possuirão 0,20 m de diâmetro com 30 m de comprimento, distanciados entre eles de 0,20 m. Da mesma maneira que o sistema tubular vertical, o hectare será dividido em 3 blocos de 30 m de comprimento por 100 m de largura, com distância de 3 m entre cada bloco (Figura 4.2).

A área total de filme de PEBD necessária será de 14.140 m<sup>2</sup>, gerando um custo de R\$ 23.000,00.

Para unir os tubos serão utilizadas conexões de PVC com 0,2 m de diâmetro num número de 750 por hectare, resultando num valor total de R\$ 3.750,00.

Da mesma forma que nos fotobiorreatores verticais, para transporte do meio de cultivo e CO<sub>2</sub> serão utilizados tubos de PVC de 3" e 1" num total de 700 m por hectare cada, gerando um custo total aproximado de R\$ 5.000,00.



**Figura 4.2:** Representação da área do sistema de cultivo e figura ilustrativa dos fotobiorreatores horizontais sobre o solo.

A capacidade total em volume de meio por hectare deste sistema é de 706 m<sup>3</sup>, considerando a concentração de biomassa após batelada de 9 dias de 3 g/L, chega-se a um resultante de 86.000 kg de biomassa seca/ano.

#### 4.2.3 Sistema lagoa *raceway*

O sistema lagoa *raceway* será composto por canais feitos no solo com 0,3 m de profundidade, 3 m de largura e 100 m de comprimento revestidos com lona plástica também de PEBD conforme Figura 4.3.

Os gastos para implantação deste sistema serão reais à mão-de-obra para abertura dos canais e compra de lona necessária para revestir os canais de circulação de meio que será de aproximadamente 9.000 m<sup>2</sup>.



**Figura 4.3:** Demonstração do sistema de cultivo lagoa *raceway*.



O volume total de meio por hectare será de 2.250 m<sup>3</sup>, que com uma concentração de biomassa de 0,14 Kg/m<sup>3</sup> após 9 dias, apresentará um total de 12.775 Kg de biomassa seca/ano.

#### 4.3 Meio de cultivo

Os gastos com meio de cultivo serão com a compra de nutrientes (Nitrogênio e Fósforo), bombeamento de água e meio de cultivo como também com a compressão de CO<sub>2</sub>, o qual representa a maior parcela desses custos.

O CO<sub>2</sub> será obtido de gases originados pela queima de carvão liberados de chaminés industriais que apresentam aproximadamente 15% em CO<sub>2</sub>, sendo comprimido para alimentar os fotobiorreatores por compressores, o compressor será da marca *Mapro* com capacidade de compressão de 60.000 m<sup>3</sup>/h a 1,4 bar de pressão, com valor de R\$ 30.000,00. O sistema será operado com uma vazão de gases igual a 1 V.V.M. durante o período luminoso do dia, devendo a alimentação com CO<sub>2</sub> ser desligada a noite para evitar-se abaixamento do pH.

#### 4.4 Colheita

Para a etapa de floculação será utilizado um tanque de fibra com capacidade para volume de 20.000 L com custo de aproximadamente de R\$ 5.000,00.

O floculante utilizado será o Sulfato de Alumínio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) com dose em torno de 0,1 a 1 g/L dependendo de testes com o meio (Oh et al., 2001). O consumo de floculante é proporcional ao volume de meio a ser colhido, gastando-se mais floculante para colher uma mesma massa, por exemplo, em meios menos concentrados, como lagoas *raceway*, do que em meios mais concentrados como os originados de fotobiorreatores.

Para a etapa de centrifugação será utilizada uma máquina da marca americana *Evodos* (Evodos, 2011), projetada para colheita de microalgas, a qual recupera mais de 95% da biomassa contida na alimentação, resultando num concentrado de biomassa com menos de 5% de água extracelular, a qual apresenta um custo de R\$ 50.000,00.

#### 4.5 Extração e produção de biodiesel

Devido aos processos de extração do óleo das microalgas e sua transformação em biodiesel serem bastante complexos e de difícil orçamento, foi feita uma estimativa de custo tanto de extração como produção de biodiesel através desses processos aplicados para a cultura da soja.

Para se obter esta estimativa do custo para extração de um litro de óleo, foi pesquisado em páginas confiáveis na internet (Aboissa, 2011), (Agrícolas, 2011), (Home, 2011), preços da soja, do óleo e do farelo produzidos, chegando-se através de balanços de massa, conforme Tabela 4.1, a uma estimativa de R\$ 0,65 ao litro de óleo extraído.

**Tabela 4.2:** Estimativa de custo para extração de óleo para cultura de soja.

<b>SOJA</b>	
Preço soja (R\$/saca)	R\$ 46,71
Preço soja (R\$/kg)	R\$ 0,78
Rendimento em óleo (%)	19
Rendimento em farelo (%)	78
kg de soja/ L óleo	4,74
Preço de venda do óleo (R\$/L)	R\$ 2,12
Preço de venda do farelo (R\$/kg)	R\$ 0,60
kg de farelo produzido/L de óleo extraído	3,69
Valor em farelo/L de óleo extraído	R\$ 2,22
<b>Custo produção óleo (R\$/L)</b>	<b>R\$ 0,65</b>

Para a produção de biodiesel, conforme 23º leilão de biodiesel realizado pela Agência Nacional de Petróleo Gás natural e Biocombustível (ANP), o valor ao litro de biodiesel ficou em torno de R\$ 2,38. Como o balanço volumétrico para a produção de biodiesel é de um litro de óleo para um litro de biocombustível, subtraindo-se o valor por litro de óleo (R\$ 2,12) do valor por litro de biodiesel produzido, chegou-se à estimativa de custo de produção por litro de biodiesel de R\$ 0,26.

## 5 Resultados

Após se terem feito os levantamentos de custos com equipamentos (Tabela 5.1), terreno e materiais para implantação de cada sistema, acrescentando-se mais 10% sobre esses custos nos sistemas fechados e 5% (por serem de construção mais simples) sobre o sistema lagoa *raceway*, como margem para outros possíveis gastos, chegaram-se aos valores de investimento inicial citados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.1:** Lista de equipamentos com custos e consumo de energia.

Lista de Equipamentos					
Equipamentos	Dimensão	Custos	Consumo (kWh)	Horas trabalho dia	Consumo total kW/ano
Tanque de meio de cultura (Fibra)	20 m <sup>3</sup>	R\$ 5.000,00	-	-	-
Bomba de meio de cultura (Centrífuga)	10 m <sup>3</sup> /h	R\$ 2.000,00	2	12	8.760
Bomba de meio de cultura (Centrífuga)	10 m <sup>3</sup> /h	R\$ 2.000,00	2	12	8.760
Bomba de água do mar (Centrífuga)	10 m <sup>3</sup> /h	R\$ 2.000,00	2	12	8.760
Bomba de água de reciclo (Centrífuga)	10 m <sup>3</sup> /h	R\$ 2.000,00	2	12	8.760
Bomba de meio concentrado (Helicoidal)	10 m <sup>3</sup> /h	R\$ 10.000,00	3	12	13.140
Compressor de CO <sub>2</sub>	60.000 m <sup>3</sup> /h	R\$ 30.000,00	7	12	30660
Caixa de floculação (Fibra)	20 m <sup>3</sup>	R\$ 5.000,00	-	-	-
Centrífuga ( <i>Evodos</i> )	7 m <sup>3</sup> /h	R\$ 50.000,00	7,67	12	33.580
Moinho ( <i>bead mill</i> )	1 ton/h	R\$ 58.000,00	10	3	10.950
<b>Total</b>		<b>R\$ 166.000,00</b>			<b>123.370</b>

Através da análise da tabela 5.2 percebe-se que a maior parcela dos custos iniciais é referente à compra dos equipamentos necessários para o cultivo e colheita das microalgas, representando, por exemplo, para o sistema lagoa *raceway*, 86% do investimento inicial. Analisando os outros gastos, que são específicos para implantação de cada sistema de cultivo, sem contar os equipamentos que são os mesmos para qualquer sistema, verifica-se um custo inicial para o sistema lagoa *raceway* em torno de cinco vezes menor do que para o sistema fotobiorreator tubular vertical.

Para investimento inicial será feito um empréstimo com juros de 5% ao ano que será amortizado em 20 anos com parcelas anuais no valor de R\$ 24.162,35 para fotobiorreatores tubulares verticais, R\$ 17.350,57 para fotobiorreatores horizontais sobre o solo e R\$ 15.452,32 para o lagoa *raceway*, que serão somadas aos custos de cultivo anuais.

**Tabela 5.2:** Comparativo entre os custos de implantação da fazenda de microalgas com materiais e equipamentos.

	<b>Fotobiorreatores Tubulares Verticais</b>	<b>Fotobiorreatores Tubulares Horizontais</b>	<b>Lagoas Raceway</b>
Área terreno (m <sup>2</sup> )	10.000	10.000	10.000
Custo terreno/hectare	R\$ 3.000,00	R\$ 3.000,00	R\$ 3.000,00
Área total de filme de PEBD (m <sup>2</sup> /ha)	20.200	14.140	9.000
<b>Custo por hectare em filme</b>	<b>R\$ 32.313,00</b>	<b>R\$ 23.000,00</b>	<b>R\$ 14.400,00</b>
Custo total em postes	R\$ 11.430,00	-	-
Custo em perfis de aço por hectare	R\$ 41.430,00	-	-
Conexões		R\$ 3.750,00	-
Tubos PVC (3")	R\$ 13.860,00	R\$ 3.800,00	-
Tubos PVC CO <sub>2</sub> (1")	R\$ 5.715,00	R\$ 1.200,00	R\$ 400,00
Custo com equipamentos	R\$ 166.000,00	R\$ 166.000,00	R\$ 166.000,00
Margem de 10%	R\$ 27.374,00	R\$ 20.075,00	(5%) R\$ 9.190,00
<b>Custo inicial total por hectare</b>	<b>R\$ 301.122,00</b>	<b>R\$ 220.825,00</b>	<b>R\$ 192.990,00</b>

Os custos anuais com o cultivo das microalgas compreendem custos variáveis com floculante, nutrientes, funcionários e energia, e custos fixos com manutenções. Para custos com manutenção de equipamentos e materiais considera-se vida útil de 10 anos para os equipamentos e tubulações de PVC, 3 anos para o filme de PEBD e 20 anos para as estruturas metálicas. Somando-se esses custos amortizados em seus respectivos anos de vida útil com os custos variáveis, as parcelas anuais e ainda incluindo uma margem de 10% sobre esses custos, para outros possíveis gastos, se chegou aos custos anuais de cultivo conforme apresentados na Tabela 5.3.

O custo da energia elétrica foi retirado do site da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) (CEEE, 2012), como sendo de R\$ 0,38 por kWh de consumo.

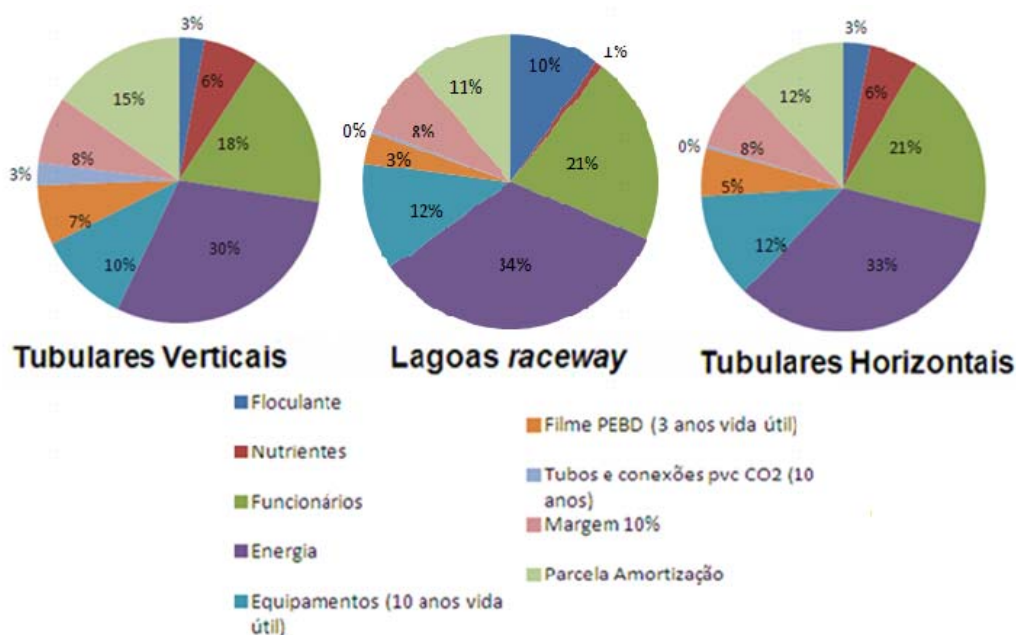
Considerou-se os mesmos gastos com energia, funcionários e equipamentos pelos três sistemas propostos, visto que, apesar de o sistema lagoa *raceway* apresentar uma produção bastante inferior aos outros sistemas, ele apresenta um volume de meio muito maior a ser colhido. Entretanto, consome-se a mesma quantidade de energia e utiliza-se os mesmos equipamentos para se colher um mesmo volume de meio, só que com menor concentração de biomassa e, portanto, obtendo-se uma produção menor.

**Tabela 5.3:** Custos anuais com cultivo das microalgas nos diferentes sistemas.

<b>Custos de cultivo anuais</b>			
	<b>Fotobiorreatores Tubulares Verticais</b>	<b>Fotobiorreatores Tubulares Horizontais</b>	<b>Lagoas Raceway</b>
<b>Floculante</b>			
Dose de $(Al_2(SO_4)_3)$ utilizada (Kg/m <sup>3</sup> )	0,5	0,5	0,5
Preço (R\$/Kg)	R\$ 0,30	R\$ 0,30	R\$ 0,30
kg/ano por hectare	15.357	14.333	45.625
<b>Custo total (R\$/ano)</b>	<b>R\$ 4.607,20</b>	<b>R\$ 4.300,05</b>	<b>R\$ 13.687,50</b>
<b>Nutrientes (Nitrogênio e Fósforo)</b>			
Consumo (kg nutrientes/Kg biomassa)	0,09	0,09	0,09
Consumo anual (kg/ano)	9.951,56	7.740,10	1.149,75
Preço por saco (50 Kg) NPK	R\$ 50,00	R\$ 50,00	R\$ 50,00
<b>Custo total (R\$/ano)</b>	<b>R\$ 9.951,56</b>	<b>R\$ 7.740,10</b>	<b>R\$ 1.149,75</b>
<b>Funcionários</b>	1	1	1
Funcionário (R\$/mês)	R\$ 2.400,00	R\$ 2.400,00	R\$ 2.400,00
<b>Total anual</b>	<b>R\$ 28.800,00</b>	<b>R\$ 28.800,00</b>	<b>R\$ 28.800,00</b>
<b>Energia</b>			
Custo por kWh	R\$ 0,38	R\$ 0,38	R\$ 0,38
Consumo total (kW/ano)	123.370	123.370	123.370
<b>Custo total em energia por ano (R\$/ano)</b>	<b>R\$ 46.880,60</b>	<b>R\$ 46.880,60</b>	<b>R\$ 46.880,60</b>
<b>Custos fixos equipamentos (10 anos vida útil)</b>	<b>R\$ 16.600,00</b>	<b>R\$ 16.600,00</b>	<b>R\$ 16.600,00</b>
<b>Custos fixos filme PEBD (3 anos vida útil)</b>	<b>R\$ 10.771,17</b>	<b>R\$ 7.666,82</b>	<b>R\$ 4.800,00</b>
<b>Custos fixos estrutura de sustentação (20 anos)</b>	<b>R\$ 2.642,86</b>	-	-
<b>Custos fixos com tubos de PVC (10 anos vida útil)</b>	<b>R\$ 1.957,14</b>	<b>R\$ 435,00</b>	<b>R\$ 500,00</b>
<b>Margem de 10% sobre gastos anuais</b>	<b>R\$ 13.190,42</b>	<b>R\$ 12.394,64</b>	<b>R\$ 12.406,87</b>
<b>Parcela de amortização anual</b>	<b>R\$ 24.162,35</b>	<b>R\$ 17.350,57</b>	<b>R\$ 15.452,32</b>
<b>Custos totais de cultivo anual</b>	<b>R\$ 157.965,37</b>	<b>R\$ 140.875,70</b>	<b>R\$ 139.111,95</b>

Na Figura 5.1 é possível visualizar as parcelas de custos anuais referentes a cada item citado na Tabela 5.3 nos diferentes sistemas de cultivo. Percebe-se claramente que a maior parcela dos custos anuais é representada pelo consumo de energia, consumo esse com a compressão de gás CO<sub>2</sub> para o meio de cultivo e centrifugação do meio para obtenção da biomassa quase seca. Outros custos também significativos para os três sistemas são com mão-de-obra, considerando-se um funcionário por hectare, e com

manutenção dos equipamentos necessários para o cultivo, considerando vida útil de 10 anos.



**Figura 5.1:** Gráficos de custos anuais comparativos entre os três sistemas.

Com a produção anual em biomassa seca dividida pelos custos de cultivo anuais chegou-se aos valores de custo por kilograma de biomassa para cada sistema proposto conforme Tabela 5.4.

**Tabela 5.4:** Estimativa do custo de produção de biomassa para cada sistema proposto.

	Fotobiorreatores Verticais	Fotobiorreatores horizontais sobre o solo	Lagoas <i>raceway</i>
Custo inicial total por hectare	R\$ 301.122,00	R\$ 220.825,00	R\$ 192.990,00
Custos de cultivo anuais	R\$ 157.965,37	R\$ 140.875,70	R\$ 139.111,95
Concentração biomassa após batelada de 9 dias	3,6 kg/m <sup>3</sup>	3 Kg/m <sup>3</sup>	0,14 Kg/m <sup>3</sup>
Produção anual de biomassa	110.572 Kg/ano	86.000 Kg/ano	12.775 Kg/ano
<b>Custo por kg de biomassa</b>	<b>R\$ 1,43</b>	<b>R\$ 1,64</b>	<b>R\$ 10,89</b>

De acordo com a Tabela 5.4, analisando os custos encontrados para produção de um kilograma de biomassa seca para cada sistema, verifica-se um custo de produção muito mais elevado para o sistema lagoa *raceway*.

Apesar de o investimento inicial com material para confecção do sistema lagoa *raceway* ser em torno de 5 vezes menor e o volume de meio contido por hectare ser em torno de três vezes maior do que para o sistema fotobiorreator vertical, devido ao alto custo dos equipamentos e principalmente à baixa concentração de biomassa atingida após mesmo tempo de batelada (em torno de 25 vezes menor), chega-se a essa diferença de massa produzida anualmente e conseqüente maior valor quando comparado aos outros sistemas propostos.

Por fim, com o custo por kilograma de biomassa estimado, considerando-se um rendimento de 40% em massa de óleo ( $\rho = 900 \text{ kg.m}^{-3}$ ) e que a biomassa desengordurada (60% em massa) pode ser comercializada como ração para alimentação animal, da mesma forma que o farelo de soja, com valor de R\$ 0,60 ao kilograma. Pelo biodiesel ser um combustível renovável, que possui isenção de impostos, chegou-se aos valores por litro de biodiesel produzido conforme Tabela 5.5.

**Tabela 5.5:** Custo ao litro do biodiesel proveniente de microalgas conforme sistemas propostos nesse trabalho.

<b>Biodiesel de microalgas</b>			
	<b>Fotobiorreatores tubulares verticais</b>	<b>Fotobiorreatores tubulares horizontais</b>	<b>Lagoas raceway</b>
Preço biomassa (R\$/Kg)	R\$ 1,43	R\$ 1,64	R\$ 10,89
Rendimento em óleo (%)	40	40	40
Rendimento em farelo (%)	60	60	60
Kg de biomassa/ L óleo	2,25	2,25	2,25
Preço biomassa desengordurada (R\$/Kg)	R\$ 0,60	R\$ 0,60	R\$ 0,60
Custo produção biodiesel	R\$ 0,26	R\$ 0,26	R\$ 0,26
Custo óleo (R\$/L)	R\$ 3,05	R\$ 3,52	R\$ 24,34
<b>Custo biodiesel (R\$/L)</b>	<b>R\$ 3,31</b>	<b>R\$ 3,78</b>	<b>R\$ 24,60</b>

Comparando os custos por litro de biodiesel proveniente de microalgas, segundo Tabela 5.5 com o valor do biodiesel convencional de R\$ 2,38 ao litro, conclui-se que o biodiesel de microalgas é inviável economicamente. Porém, considerando-se mesma produtividade em biomassa e com rendimento de 55% em óleo, máximo rendimento em óleo atingido pela espécie *Chlorella vulgaris* segundo Liu *et al.* (2008), e que o consumo de energia em seu cultivo fosse reduzido em 55%. Através do sistema de cultivo por fotobiorreator tubular vertical se chegaria a um valor de produção de biodiesel por litro de R\$ 2,38, competitivo portanto, com o biodiesel convencional.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

No presente trabalho foi feito um estudo de viabilidade econômica para produção de biodiesel a partir de microalgas, avaliando diferentes técnicas de cultivo e processamento.

De acordo com os valores alcançados por litro de biodiesel proveniente de microalgas, concluiu-se que atualmente a tecnologia não se apresenta viável economicamente frente aos biocombustíveis convencionais.

Dentre os três sistemas de cultivo estudados, o fotobiorreator tubular vertical, apesar de ser o de construção mais complexa e cara, foi o que apresentou menor custo por quilograma de biomassa obtida (R\$ 1,43), enquanto o sistema horizontal sobre o solo (R\$ 1,64) e o lagoa *raceway* (R\$ 10,89). Esses resultados são relativos à produtividade dos sistemas que é diretamente influenciada pela área de exposição luminosa, apresentando-se superior para o sistema tubular vertical, um pouco inferior para o horizontal sobre o solo e bastante inferior para o lagoa *raceway*.

O principal fator que encarece o biodiesel de microalgas é o elevado consumo de energia, principalmente pela colheita, através da centrifugação, e compressão dos gases para alimentação dos fotobiorreatores. Esses custos representam um total de 30 a 34% dos custos de produção de biomassa anual.

O Rio Grande do Sul assim como todo o país tem grande potencial para cultivar microalgas devido às grandes extensões de terras, principalmente à beira mar, atendendo à demanda de água salgada e ocupando-se terrenos inférteis, não competindo desse modo com culturas destinadas à alimentação.

Muitas barreiras ainda devem ser ultrapassadas para se chegar a um biocombustível competitivo economicamente. Para contribuir com essa tecnologia, inúmeros trabalhos devem ser desenvolvidos, como na busca de técnicas para melhor aproveitamento do CO<sub>2</sub> durante sua difusão no meio e, portanto, diminuir o consumo de energia com sua compressão. O desenvolvimento de técnicas de colheita tão eficientes quanto, porém mais baratas do que a centrifugação. Busca de espécies de microalgas que apresentem maior rendimento em óleo, elevada taxa de crescimento celular e que sejam de fácil colheita.



## 7 Referências

- Aboissa. (2011). Aboissa, ([www.aboissa.com.br](http://www.aboissa.com.br)) Acessado em 24/11/2011.
- Agrícolas. (2011). Notícias Agrícolas, ([www.noticiasagricolas.com.br](http://www.noticiasagricolas.com.br)) Acessado em 24/11/2011.
- Amaro, H. M., Guedes, A. C. & Malcata, F. X. (2011). Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Applied Energy*, **88**(10), 3402-3410.
- Araujo, G. S., Matos, L. J. B. L., Gonçalves, L. R. B., Fernandes, F. A. N. & Farias, W. R. L. (2010). Bioprospecting for oil producing microalgal strains: Evaluation of oil and biomass production for ten microalgal strains. *Bioresource Technology*, **102**(8), 5248-5250.
- Aresta, M., Dibenedetto, A., Carone, M., Colonna, T. & Fragale, C. (2005). Production of biodiesel from macroalgae by supercritical CO<sub>2</sub> extraction and thermochemical liquefaction. *Environmental Chemistry Letters*, **3**(3), 136-139.
- Biodiesel, V. d. (2011). Vantagens do Biodiesel, (<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/vantagens/vantagens-biodiesel.htm>)
- Borowitzka, M. & Moheimani, N. (2010). Sustainable biofuels from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1-13.
- Breitman, C. S. & Hsu, J. T. (2010). Microalgae cultivation using photobioreactors for biodiesel production. *Recent Patents on Chemical Engineering*, **3**(3), 180-194.
- Brennan, L. & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(2), 557-577.
- CEEE. (2011). CEEE, ([www.ceee.com.br](http://www.ceee.com.br)) Acessado em 24/11/2011.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, **25**(3), 294-306.
- Chisti, Y. (2008). Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*, **26**(3), 126-131.
- Evodos. (2011). Evodos.
- Fernández-Velascob, G. B. a. J. G. (2010). Net energy ratio of photobiohydrogen generation. Australian National University.
- Fon Sing, S., Isdepsky, A., Borowitzka, M. & Moheimani, N. (2010). Production of biofuels from microalgae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1-26.
- Gama, P. E., Gil, R. A. d. S. S. & Lachter, E. R. (2011). Produção de biodiesel através de transesterificação in situ de sementes de girassol via catálise homogênea e heterogênea. *Química Nova*, **33**, 1859-1862.
- Home, I. (2011). IndexMundi Home, (<http://www.indexmundi.com/pt/pre%27os-de-mercado/?mercadoria=%C3%B3leo-de-soja&moeda=brl>) Acessado em 20/11/2011.
- Hulatt, C. J. & Thomas, D. N. Productivity, carbon dioxide uptake and net energy return of microalgal bubble column photobioreactors. *Bioresource Technology*, **102**(10), 5775-5787.
- Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E. A., Embiruçu, M. & Ghirardi, M. L. (2012). Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresource Technology*, **101**(4), 1406-1413.
- Kang, C. K., Kim, J. B., Lee, K. S., Kim, J. B., Lee, P. Y. & Hong, J. S. (2003). Trophic importance of benthic microalgae to macrozoobenthos in coastal bay systems in Korea: Dual stable C and N isotope analyses. *Marine Ecology Progress Series*, **259**, 79-92.

- King, J. M., Liang, X. & Rusch, K. A. (2002). Nutritional Properties of the Marine Rotifer *Brachionus plicatilis* Fed the Freshwater Microalgae *Selenastrum capricornutum*. *Journal of the World Aquaculture Society*, **33**(4), 478-488.
- Liu, Z.-Y., Wang, G.-C. & Zhou, B.-C. (2008). Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, **99**(11), 4717-4722.
- Louette, i. e. o. A. (2007). *COMPENDIO DE SUSTENTABILIDADE*. WHH- Willis Harman House ed, São Paulo.
- Mansano, E. (2011). Extração, (<http://emersonam.tripod.com/extracao.html>) Acessado em 20/11/2011.
- Mata, T. M., Martins, A. A. & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(1), 217-232.
- Miran, A. S., Gamez, A. C., Camacho, F. G., Grima, E. M. & Chisti, Y. (1999). Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae. In *Progress in Industrial Microbiology*, Vol. 35, pp. 249-270.
- Molina Grima, E., Belarbi, E. H., Aciñe Fernández, F. G., Robles Medina, A. & Chisti, Y. (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: Process options and economics. *Biotechnology Advances*, **20**(7-8), 491-515.
- Oh, H. M., Lee, S. J., Park, M. H., Kim, H. S., Kim, H. C., Yoon, J. H., Kwon, G. S. & Yoon, B. D. (2001). Harvesting of *Chlorella vulgaris* using a bioflocculant from *Paenibacillus* sp. AM49. *Biotechnology Letters*, **23**(15), 1229-1234.
- Paiva, E. J. M. (2010). Estudo da Produção de Biodiesel a partir de Óleo de Babaçu e Etanol utilizando a Transesterificação Alcalina Tradicional com Agitação e Assistida por Ultrassons In *Escola de Engenharia de Lorena - EEL/USP*, Vol. Mestrado, USP. São Paulo.
- Pulz, O. P. (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **57**(3), 287-293.
- Rym, B. D., Neje, G., Lamia, T., Ali, Y., Rafika, C., Khemissa, G., Jihene, A., Hela, O. & Hatem, B. O. (2010). Modeling growth and photosynthetic response in *Arthrospira platensis* as function of light intensity and glucose concentration using factorial design. *Journal of Applied Phycology*, **22**(6), 745-752.
- Sanchez Villalobos, S., Martínez Sancho, M., Espejo Caballero, M. & Delgado Pérez, A. (1996). Production of microalgae from olive mill wastewater. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **38**(3-4), 245-247.
- Scoparo, C. H. G. (2010). Remoção de CO<sub>2</sub> em fotobiorreatores utilizando efluentes petroquímicos In *Faculdade de Engenharia Química - FEQ*, Vol. Pós-Graduação, Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química São Paulo.
- Singh, S. P. & Singh, D. (2010). Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(1), 200-216.
- Wang, B., Li, Y., Wu, N. & Lan, C. (2008). CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **79**(5), 707-718.
- Zeng, X., Danquah, M. K., Chen, X. D. & Lu, Y. (2011). Microalgae bioengineering: From CO<sub>2</sub> fixation to biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**(6), 3252-3260.