



MAPEAMENTO TECNOLÓGICO DA UTILIZAÇÃO DE MICROALGAS PARA PRODUÇÃO DE BIOPRODUTOS

Juliana Ferreira de Freitas

Monografia em Engenharia Química

Orientadora

Prof^a. Suzana Borschiver, D.Sc.

Setembro de 2009

MAPEAMENTO TECNOLÓGICO DA UTILIZAÇÃO DE MICROALGAS PARA PRODUÇÃO DE BIOPRODUTOS

Juliana Ferreira de Freitas

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenharia Química.

Aprovado por:

Prof. Mario Sergio O. Castro (EQ/UFRJ)

Eng^a Débora de Barros, M.Sc. (Doutoranda EQ/UFRJ)

Eng^a Simone Regina Albuquerque da Cruz (Chemtech)

Orientadora:

Prof^ª. Suzana Borschiver, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil.

Setembro de 2009

Ficha Catalográfica

Freitas, Juliana Ferreira de.

Mapeamento tecnológico da utilização de microalgas para a produção de bioprodutos / Juliana Ferreira de Freitas. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2009.

XI, 71 p.; il.

(Monografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2009.

Orientadora: Suzana Borschiver.

1. Microalgas. 2. Prospecção. 3. Bioprodutos. 4. Monografia (Graduação - UFRJ/EQ).
5. Suzana Borschiver. I – Mapeamento tecnológico da utilização de microalgas para a produção de bioprodutos.

À minha família

*"Quando a última árvore tiver caído,
quando o último rio tiver secado,
quando o último peixe for pescado,
vocês vão entender que dinheiro não se come."*

Greenpeace

AGRADECIMENTOS

À Deus, acima de tudo pela saúde, pela fé e pela determinação que tive durante toda minha vida e por todas as metas e sonhos realizados.

À minha família e ao meu noivo, por todo amor, amizade, paciência e apoio durante toda minha vida;

À Professora Suzana Borschiver, por toda ajuda, incentivo, aprendizado, orientação e acima de tudo, pela amizade e convívio durante boa parte da minha vida acadêmica;

À Escola de Química – UFRJ, pelo aprendizado e convívio nesta instituição durante minha vida acadêmica;

Aos participantes da Banca Avaliadora por terem aceitado nosso convite e nos honrado com suas presenças;

Aos meus amigos e todas as pessoas que me apoiaram e colaboraram durante todo esse trajeto.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia Química.

MAPEAMENTO TECNOLÓGICO DA UTILIZAÇÃO DE MICROALGAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOPRODUTOS

Juliana Ferreira de Freitas

Setembro, 2009

Orientadora: Prof.^a Suzana Borschiver, D.Sc.

A cada ano que passa, o interesse no potencial biotecnológico das microalgas aumenta, visto a grande variabilidade na composição bioquímica da biomassa microalgal. O desenvolvimento de sistemas mais avançados, sempre buscando maior eficiência e menor custo, não tem se limitado mais à produção de compostos, tais como os carotenóides, mas também tem se dedicado à possibilidade da produção de biocombustíveis aliada à fixação de CO₂, contribuindo para o “Mecanismo de Desenvolvimento Limpo”.

O objetivo deste trabalho é realizar um monitoramento das atuais utilizações das microalgas no mundo e como vêm sendo desenvolvidas e pesquisadas. Foi realizado um trabalho de prospecção tecnológica através da análise de artigos científicos, onde foi possível mapear informações de relevância, como o crescimento nos últimos anos do interesse global no cultivo de microalgas, qual a origem das publicações, o que revelam os países que estão investindo nesse tipo de sistema e até mesmo quais gêneros de microalgas estão sendo mais explorados.

Além disso, foi feito um levantamento não exaustivo das empresas que estão envolvidas, de alguma forma, com o cultivo de microalgas. Foi possível identificar empresas que têm o seu *core business* voltado para o desenvolvimento de tecnologias de cultivo de microalgas, bem como empresas já consolidadas investindo nessa nova fonte de energia renovável.

ÍNDICE

1. Objetivo:.....	12
2. Introdução:	12
3. As microalgas e suas aplicações:	16
3.1. Aspectos do cultivo de microalgas:.....	17
3.2. Bioprodutos a partir de microalgas:	19
3.2.1. Ácidos graxos poliinsaturados:	20
3.2.2. Carotenóides:.....	21
3.2.2.1. Betacaroteno:.....	22
3.2.2.2. Astaxantina:.....	22
3.3. Biocombustíveis a partir de microalgas:	23
3.3.1. Cultivo de microalgas para a produção de biodiesel:.....	24
3.3.2. Os Fotobioreatores:	26
3.3.3. Extração do óleo das microalgas:.....	28
3.3.4. Caracterização do biodiesel de microalgas:	29
3.4. Outras aplicações:	30
3.5. Microalgas e a captura de CO ₂ :.....	31
4. A prospecção tecnológica como ferramenta de competitividade:.....	33
4.1. Métodos e Técnicas:.....	35
5. Prospecção tecnológica em artigos científicos:.....	39
5.1. Análise Temporal:.....	39
5.2. Análise de Artigos por Fonte de Publicação:	40
5.3. Análise de Artigos por Região/País de Origem:	41
5.4. Distribuição de Artigos x Microalgas:	44
5.5. Distribuição de artigos <i>versus</i> área de atuação:.....	46
5.6. Distribuição de artigos x bioprodutos:	47

6.	Empresas de microalgas no mundo:.....	48
6.1.	Análise das empresas por região:	49
6.1.1.	América do Norte:.....	49
6.1.2.	Europa:	60
6.1.3.	Ásia:.....	63
6.1.4.	América do Sul:.....	65
6.1.5.	Oceania:.....	67
6.2.	Microalgas x Bioproduto:	68
6.3.	Equipamentos de cultivo:.....	69
7.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros:	72
7.1.	Conclusões:	72
7.2.	Sugestão para trabalhos futuros:.....	74
8.	Referências Bibliográficas:	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Composição química de algumas espécies de microalgas tendo como base a massa seca (%)	17
Tabela 2: Alguns produtos obtidos de microalgas	20
Tabela 3: Rendimento de extração de óleo vegetal	23
Tabela 4: Comparativo da produção de biodiesel a partir da soja e da microalga	32
Tabela 5: Microalgas de menor relevância a partir da análise de publicações	46
Tabela 6: Empresas da América do Norte	50
Tabela 7: Empresas da Europa	61
Tabela 8: Empresas da Ásia	63
Tabela 9: Empresas da América do Sul	65
Tabela 10: Empresas da Oceania	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Piscina aberta para o crescimento de microalgas	25
Figura 2: Parque de lagoas abertas do tipo “pista de corrida” (raceway ponds)	25
Figura 3: Diagrama esquemático de um fotobioreator	26
Figura 4: Fotobioreator em operação	27
Figura 5: Colheita de microalgas produzidas no fotobioreator	27
Figura 6: Esquema do processo de tratamento terciário de águas residuais com microalgas	30
Figura 7: Critério de Busca	39
Figura 8: Análise Temporal de artigos	40
Figura 9: Distribuição de artigos por fonte de publicação	40
Figura 10: Distribuição de artigos por continente	41
Figura 11: Distribuição de artigos por país – Europa	42
Figura 12: Distribuição de artigos por país – Ásia	42
Figura 13: Distribuição de artigos por continente – América	43
Figura 14: Distribuição de artigos por país – Oceania	43
Figura 15: Distribuição de artigos por país – África	44
Figura 16: Distribuição de artigos por gênero de microalga	45
Figura 17: Gêneros de microalgas em destaque	45
Figura 18: Distribuição de artigos por área de atuação	46
Figura 19: Distribuição de artigos por bioproduto	47
Figura 20: Classificação das atividades das empresas	48
Figura 21: Distribuição das empresas por região	49

Figura 22: Fotobiorreator em escala experimental	52
Figura 23: Fazenda de microalgas – Earthrise Nutritionals	54
Figura 24: Bioreator “Helix” – OriginOil	57
Figura 25: Sistema de biorreator modular para cultivo de microalgas	57
Figura 26: AGS™ Technology	59
Figura 27: Bioreator vertical	60
Figura 28: Fotobiorreator PBR - 200/500	62
Figura 29: Lagoas Abertas do tipo <i>raceway</i> (pista de corrida)	64
Figura 30: Planta em construção – Oil Fox	66
Figura 31: Gêneros de microalgas em destaque a partir da análise das empresas	68
Figura 32: Equipamentos e sistemas de cultivo das empresas	69
Figura 33: Detalhes do fotobiorreator da GreenFuel Technologies utilizado no teste de campo no MIT (Massachusetts Institute of Technology)	70
Figura 34: Esquema de produção da empresa Solazyme	71
Figura 35: Cultura dentro do bioreator	71

1. Objetivo:

O objetivo deste trabalho é realizar um monitoramento das atuais utilizações das microalgas no mundo e como vêm sendo desenvolvidas e pesquisadas. As ferramentas utilizadas serão a prospecção tecnológica através da análise de artigos científicos, onde é possível mapear informações de relevância, como o crescimento nos últimos anos do interesse global no cultivo de microalgas, qual a origem das publicações, o que revelam os países que estão investindo nesse tipo de sistema e até mesmo quais gêneros de microalgas estão sendo mais explorados; e um levantamento não exaustivo das empresas que estão envolvidas, de alguma forma, com o cultivo de microalgas, sendo possível identificar empresas que têm o seu *core business* voltado para o desenvolvimento de tecnologias de cultivo de microalgas, bem como empresas já consolidadas investindo nessa nova fonte de energia renovável.

2. Introdução:

Nos últimos anos, tem sido muito observado o interesse no potencial biotecnológico das microalgas, principalmente devido à identificação de diversas substâncias sintetizadas por estes organismos¹. A imensa biodiversidade e conseqüente variabilidade na composição bioquímica da biomassa obtida das culturas microalgais, aliadas ao emprego de melhoramento genético e ao estabelecimento de tecnologia de cultivo em grande escala, vêm permitindo que determinadas espécies sejam comercialmente utilizadas, tanto para a produção de biocombustíveis como para bioprodutos.

Além disso, foi feito um levantamento não exaustivo das empresas que estão envolvidas, de alguma forma, com o cultivo de microalgas. Foi possível identificar empresas que têm o seu *core business* voltado para o desenvolvimento de tecnologias de cultivo de microalgas, bem como empresas já consolidadas investindo nessa nova fonte de energia renovável.

Além das substâncias conhecidas, a quantidade de compostos de interesse comercial que podem ser obtidos das microalgas parece ser imprevisível. Em nível mundial, o crescente interesse em tecnologias limpas, sustentáveis e orgânicas, na obtenção de produtos para o consumo humano, demanda uma contínua busca por espécies e/ou variedades capazes de sintetizar grandes quantidades de compostos específicos e de como potencializar a biossíntese destes (condições de cultivo, melhoramento genético etc.). Igualmente, há a necessidade de pesquisas visando ao desenvolvimento e,

¹ Entre 1978 a 1996 foi desenvolvido o “Programa de Espécies Aquáticas” no Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL), financiado pelo *Office of Fuels Development*, da *Division of the US Department of Energy*. O programa testou várias espécies de microalgas marinhas e de água doce, concluindo que as diatomáceas e as Clorofíceas unicelulares (p.ex., *Neochloris oleoabundans*, *Scenedesmus dimorphus* e *Botryo-coccus braunii*) são os grupos mais promissores. Espécies do gênero *Botryococcus* podem produzir até 86% de seu peso seco em hidrocarbonetos de cadeia longa. Ou seja, as vantagens de usar microalgas, sobretudo marinhas, como matéria-prima para a produção de biodiesel são óbvias.

principalmente, ao aperfeiçoamento dos sistemas de produção em escala comercial, a fim de tornar comercialmente viáveis alguns dos sistemas conhecidos. Essas pesquisas, por fim, também, se fazem necessárias à identificação dos produtos que podem ser extraídos das microalgas, da possível atividade biológica (estudos metabólicos e toxicológicos) e do desenvolvimento de mercados específicos para estes (DERNER et al., 2006).

Entre os tipos de bioprodutos, podem-se citar os ácidos graxos poliinsaturados, carotenóides, ficobilinas, polissacarídeos, vitaminas, esteróis e diversos compostos bioativos naturais (antioxidantes, redutores do colesterol etc.), os quais podem ser empregados especialmente no desenvolvimento de alimentos funcionais, por suas propriedades nutricionais e farmacêuticas.

Em relação aos biocombustíveis, pode-se observar também o crescente interesse no uso de microalgas para a sua produção, destacando-se: biodiesel, óleo craqueado, hidrogênio e metano (BENEMANN, 1997). Cabe lembrar que o Brasil consome, anualmente, cerca de 40 bilhões de litros de óleo diesel. Só no Rio de Janeiro, são 2 bilhões de litros. No entanto, atualmente, cerca de 75% da produção brasileira de biodiesel é baseada na extração do óleo a partir da soja. Este é, obviamente, um fator de complicação no cenário internacional, já que são cada vez mais fortes, sobretudo na Europa, as campanhas contra a produção de combustíveis a partir de fontes de alimentos tradicionais. Diversas fontes apontam que o biodiesel como elemento de produção para consumo interno e para exportação requer fontes que não façam parte da cadeia alimentar humana e de produção de ração animal, como é o caso das microalgas. Justifica-se a utilização desses microorganismos fotossintéticos em razão do alto teor de lipídios que algumas espécies podem alcançar (20 a 68% de sua massa seca). Os lipídios de microalgas são tipicamente compostos por glicerol, açúcares ou bases esterificadas e ácidos graxos contendo entre C₁₂ e C₂₂, podendo ser tanto saturados quanto mono- ou poli-insaturados. Os ácidos graxos correspondem à maior fração dos lipídios e, em algumas espécies, os PUFA (“*polyunsaturated fatty acids*”) representam entre 25 e 60% dos lipídios totais (a manipulação das condições de cultivo pode dobrar este valor). Cabe lembrar que o biodiesel é obtido a partir de uma reação química de transesterificação de triglicerídeos. Logo, os lipídeos extraídos das microalgas podem ser facilmente transformados em biodiesel. (CÂMARA; HEIFFIG, 2006). Uma característica importante de muitas espécies é a de crescer a grandes velocidades e em meios relativamente simples, duplicando sua biomassa em 24 horas. Estudos comparativos mostram que o crescimento de biomassa de microalgas é cerca de 50 vezes maior do que nas plantas geralmente utilizadas como fontes de energia. Um componente fundamental para o seu crescimento consiste em um eficiente sistema de fotossíntese, o que requer iluminação, fator vantajoso no Brasil.

Em síntese, em relação aos vegetais superiores, as microalgas apresentam várias vantagens, tais como maior eficiência fotossintética, rápido crescimento, maior

produção de biomassa por área, cultivo em condições climatológicas e pedológicas não adequadas às culturas tradicionais, utilização de áreas desérticas, com baixo valor econômico para outros usos, possibilidade de uso de resíduos no cultivo, uma maior capacidade de biofixação de CO₂, facilidade para alterar-se o teor de lipídios. Outro dado que aponta as microalgas como modelos de estudo na produção de biocombustíveis é a produção, por algumas espécies, de quantidades significativas de hidrocarbonetos de cadeia longa, como C₄₀, semelhante ao que se encontra no petróleo. No caso do aproveitamento do CO₂ industrial nos cultivos e uso da biomassa de microalgas na produção de biocombustíveis, é possível o pleito de créditos de carbono.

Resumindo, as principais vantagens do uso de microalgas como matérias-primas para a produção de biodiesel são:

- Pouco consumo de água. A maior parte da água é usada como *habitat* dos organismos que vivem em suspensão. Os cultivos em biorreatores mantêm a água em sistemas fechados ou em piscinas abertas, onde pode ser reutilizada indefinidamente após cada colheita;
- Cultivos em massa podem ser feitos em qualquer lugar. Não se utiliza o solo como *habitat* de sustentação. Portanto nossos solos podem continuar a produzir a agricultura tradicional, sem haver a necessidade de impactar o Cerrado ou Amazônia no processo produtivo;
- Cultivos em massa de microalgas ocupam o espaço em três dimensões. Ou seja, 1 metro quadrado de área usada para cultivos de microalgas pode ser estendido verticalmente produzindo centenas de vezes mais óleo vegetal do que culturas oleaginosas no mesmo espaço. As vantagens de um menor *foot-print*, além de reduzir o custo fixo do empreendimento não representam ameaça de desmatamento que as culturas de oleaginosas potencialmente representam. Em escala experimental, estima-se que as microalgas possam produzir de 200 a 300 vezes mais óleo vegetal do que a maioria das oleaginosas em uma área 100 vezes menor. Isto é, para produzir 250 mil toneladas de biodiesel vegetal a partir de microalgas são necessários 2.500 hectares de espaço em terra. Para produzir as mesmas 250 mil toneladas a partir da soja são necessários 500 mil hectares (BENEMANN, 1997). A questão do espaço é ainda mais vantajosa se os cultivos em massa forem desenvolvidos no mar;
- Microalgas têm eficiência fotossintética muito maior do que os vegetais terrestres, com crescimento e acúmulo rápido de biomassa vegetal. Ou seja, produzem mais biomassa por hectare em menos tempo;

- Outra vantagem de usar microalgas marinhas, é que utilizam água doce ou salobra, não competindo com o consumo humano, agrícola ou industrial;
- Microalgas são fixadoras eficientes de carbono atmosférico. Fixam mais carbono através da fotossíntese em muito menos tempo quando comparadas com vegetais superiores;
- O conteúdo de lipídios das microalgas, substância precursora do biodiesel algal, varia entre 1 a 40% do peso seco, podendo alcançar até 85% se as condições nutricionais do cultivo forem manipuladas (ROSEMBERG, 2008). Quer dizer, se a concentração de nutrientes for reduzida diminuindo os custos de produção, a concentração de lipídios intracelular aumenta, mas decresce a taxa de crescimento (reduzindo a taxa de biofixação de CO₂), um *trade-off* a ser otimizado em instalações comerciais. As microalgas marinhas, sobretudo as diatomáceas, são mais promissoras ainda devido ao alto teor de lipídios em suas células.

3. As microalgas e suas aplicações:

Alga é um grupo diversificado de organismos fotossintéticos, geralmente categorizados como macroalga ou microalga, tipicamente unicelulares. Há alguns grupos principais de microalgas, que se diferem primordialmente em sua composição de pigmentos, constituintes bioquímicos, ultra-estrutura e ciclo de vida. Cinco grupos podem ser destacados: diatomáceas (classe *Bacillariophyceae*), alga verde (classe *Chlorophyceae*), alga marrom-dourada (classe *Chrysophyceae*), primnesiófitas (classe *Prymnesiophyceae*) e eustigmatófitas (classe *Eustigmatophyceae*). As algas azuis-esverdeadas, ou cianobactérias (Classe *Cyanophyceae*) foram também representadas em algumas coleções (BRUNO, 2001; GROBBELAAR, 2004; RICHMOND, 2004). Segue um resumo descritivo destes grupos de algas:

- As diatomáceas (*Bacillariophyceae*): Essas algas dominam o fitoplâncton dos oceanos, mas também são encontradas em águas naturais (não salinas) e salobras. É conhecida a existência de, aproximadamente, 100.000 espécies. Diatomáceas contêm silício (Si) polimerizado em sua parede celular. As Diatomáceas armazenam carbono na forma de óleos naturais ou como um polímero de carboidratos conhecido como *chrysolaminarina*.
- A alga verde (*Chlorophyceae*): Essas também são abundantes, especialmente em águas naturais (não salinas). São conhecidas por ocorrerem em piscinas. Elas se desenvolvem isoladas ou em colônias. As algas verdes são as ancestrais evolutivas das plantas atuais. O principal composto armazenado pelas algas verdes é o amido, embora óleos também possam ser produzidos sob certas condições. Existem aproximadamente 8000 espécies.
- As algas marrom-douradas (*Chrysophyceae*): Possuem um sistema de pigmentos mais complexo, podendo ser encontradas nas cores amarela, marrom e laranja. São conhecidas, aproximadamente, 1.000 espécies, principalmente em sistemas de águas naturais (não salinas). Elas são similares às diatomáceas em pigmentação e composição bioquímica. As algas douradas produzem óleos naturais e carboidratos como compostos de armazenagem.
- *Prymnesiófitas*: Este grupo de algas, também conhecido como *haptófitas*, consiste de, aproximadamente, 500 espécies. Elas são primordialmente organismos marinhos e são responsáveis por uma substancial proporção da produtividade primária de oceanos tropicais.
- *Eustigmatófitas*. Esse grupo representa um importante componente do “picoplâncton”, que são células muito pequenas (2-4µm de diâmetro). O gênero *Nannochloropsis* é um dos poucos nesta classe e é comum nos oceanos.

Clorofila a é a única clorofila presente nas células, apesar de algumas xantofilas servirem de pigmento fotossintético acessório.

- Cianobactéria. Este grupo é procariota e, portanto, muito diferente de todos os outros grupos de microalgas. São desprovidas de núcleo e cloroplastos, e possuem uma estrutura genética diferente. Há, aproximadamente, 2.000 espécies de cianobactérias, que ocorrem em diversos ambientes. Este grupo é distinguido por possuir membros que podem assimilar nitrogênio atmosférico (deste modo, elimina a necessidade de prover N fixo para as células), nenhum membro desta classe produz significantes quantidades de lipídeos para armazenagem.

O termo microalgas não tem valor taxonômico, engloba microrganismos algais com clorofila a e outros pigmentos fotossintéticos, os quais são capazes de realizar a fotossíntese oxigênica, e sua caracterização (sistemática) implica a consideração de uma série de critérios.

Toda alga é composta de variadas proporções dos seguintes componentes: proteínas, carboidratos, lipídios e ácidos nucleicos. As porcentagens de cada um desses elementos variam com o tipo de alga em questão, e há tipos de microalgas que têm até 40% de sua massa total composta por lipídios. É esta característica que permite, por exemplo, extrair, com grande vantagem, óleo para a conversão em biodiesel. A partir da tabela 1, pode-se observar a composição química de algumas espécies de microalgas:

Tabela 1: Composição química de algumas espécies de microalgas tendo como base a massa seca (%)

Espécie	Proteína	Carboidratos	Lipídios	Ácidos Nucléicos
<i>Chlorella vulgaris</i>	51 - 58	12 - 17	14 - 22	4 - 5
<i>Spirulina platensis</i>	46 - 63	8 - 14	4 - 9	2 - 5
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21	-
<i>Prymnesium parvum</i>	28 - 45	25 - 33	22 - 38	1 - 2
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6	-

Fonte: Adaptado de BECKER (1994)

3.1. Aspectos do cultivo de microalgas:

No ambiente natural, assim como nos cultivos, o crescimento de uma população microalgal é resultado da interação entre fatores biológicos, físicos e químicos. Os fatores biológicos estão relacionados às próprias taxas metabólicas da espécie cultivada, bem como com a possível influência de outros organismos sobre o desenvolvimento algal.

O conteúdo e a composição dos lipídios e ácidos graxos em microalgas podem ser influenciados por fatores como luz, temperatura, concentração da fonte de nitrogênio e concentração de dióxido de carbono. Estudos da literatura mostram que a deficiência de nitrogênio influenciou o cultivo de *Chlorella*, aumentando seu conteúdo lipídico em 63%. O estudo dos efeitos da adição de dióxido de carbono (CO₂), no crescimento e metabolismo de micro algas é estimulado pela necessidade de redução da emissão desse gás na atmosfera. As microalgas têm sido estudadas para biofixação de CO₂ desde que foi demonstrada sua capacidade de adaptação a altas concentrações desse gás, além de utilizá-lo no processo de fotossíntese (DERNER et al., 2006).

Estes organismos podem ser cultivados em diversos sistemas de produção, com volume variando desde poucos litros até bilhões de litros. Os sistemas comumente empregados são pouco sofisticados, uma vez que muitas empresas desenvolvem cultivos a céu aberto, sob condições naturais de iluminação e temperatura, e com baixo ou nenhum controle destes parâmetros ambientais (KIRK et al., 1999). Os tanques são geralmente rasos, construídos em concreto, fibra de vidro, policarbonato, com fundo de terra ou revestido com material plástico, sendo que as culturas são constantemente agitadas. Recentemente, alguns cultivos têm sido desenvolvidos em equipamento específico, denominado fotobiorreator, visando a alcançar aumentos de produtividade. Nestes, os cultivos são realizados em sistema fechado, em painéis e formas planas, em serpentinas, espirais ou cilindros, construídos em plástico, vidro ou policarbonato. Nos fotobiorreatores, é possível controlar as condições de cultivo (quantidade dos nutrientes, temperatura, iluminação, pH etc.). Isto implica uma elevada produtividade, viabilizando a produção comercial de uma série de compostos de elevado valor.

Muitas das substâncias sintetizadas e acumuladas pelas microalgas são também encontradas nas plantas, as quais evoluíram das algas verdes ou Clorófitas. Entretanto, a produção microalgal pode ser justificada por apresentar diversas vantagens, dentre as quais podem ser destacadas (FAUST, 1987):

- O cultivo de microalgas é um sistema biológico eficiente na utilização da energia solar para a produção de matéria orgânica, sendo que, muitas espécies crescem mais rapidamente do que as plantas terrestres, fato que possibilita maiores rendimentos anuais de biomassa (maior produtividade);
- Sua natureza unicelular assegura uma biomassa com mesma composição bioquímica, o que não ocorre com as plantas terrestres que apresentam compostos localizados em partes específicas: nos frutos, folhas, sementes ou raízes;
- Por manipulação das condições ambientais de cultivo (luz, temperatura e nutrientes, por exemplo) muitas espécies podem ser induzidas a sintetizar e acumular altas concentrações de proteínas, carboidratos, lipídios etc. Tais

compostos apresentam um elevado valor comercial, principalmente por serem produtos naturais; podem crescer bem em regiões com extremas condições climáticas;

- Os cultivos podem ser desenvolvidos com água marinha ou de estuários, a qual não pode ser convencionalmente empregada no cultivo de plantas com valor para a agricultura, ou com água proveniente de diversos outros processos de produção (agropecuária, indústrias, dejetos domésticos, etc.);
- O ciclo de vida da maioria das microalgas se completa em poucas horas, o que favorece a seleção de cepas e o melhoramento genético das espécies.

O modo de operação contínuo, embora apresente vantagens como homogeneidade do produto e ininterrupta obtenção do mesmo, na maioria das vezes não se torna viável, econômica ou tecnicamente. Uma aproximação desse sistema é o modo semi contínuo. Neste, o reator é inicialmente carregado com o meio de cultivo e incubado sob condições ótimas. Depois de determinado período é retirado um certo volume de cultivo e adicionada igual quantidade de meio. Apesar de muito utilizado, esse sistema de cultivo é pouco estudado, havendo poucos trabalhos científicos envolvendo variáveis como concentração celular de corte e taxa de renovação de meio.

3.2. Bioprodutos a partir de microalgas:

Diversas microalgas têm sido cultivadas por sua capacidade de sintetizar compostos considerados nutracêuticos, tais como os ácidos graxos poliinsaturados (ácido araquidônico - ARA, ácido eicosapentaenóico – EPA e ácido docosahexaenóico – DHA, por exemplo) e pigmentos carotenóides (astaxantina, betacaroteno, luteína, cantaxantina etc.), que apresentam propriedades terapêuticas (GILL & VALIVETY, 1997; TRIPATHI et al., 1999). Atualmente, são comercializadas como alimento natural ou suplemento alimentar e são encontradas formulações em pó, tabletes, cápsulas ou extratos. São também incorporadas em massas, petiscos, doces, bebidas etc., tanto como suplemento nutricional quanto como corantes naturais (BECKER, 2004; COLLA et al., 2004; PULZ & GROSS, 2004).

Para o emprego na elaboração de alimentos, bem como para a extração de alguma substância de interesse, é necessário primeiramente separar a biomassa do meio de cultura. O processo de separação envolve uma ou mais etapas sólido:líquido, como floculação, centrifugação e filtração, por exemplo. A seguir, a biomassa é desidratada. Para tanto, podem ser empregadas diversas técnicas, como a secagem ao sol, a secagem por atomização e a liofilização. Para a extração dos compostos, as células microalgais são rompidas, empregando métodos de homogeneização, ultra-som, choque osmótico, solventes, enzimas etc. As substâncias de interesse são então recuperadas e, na maioria dos casos, sofrem algum processo de purificação, como ultrafiltração, cromatografia ou fracionamento (MOLINA GRIMA, 2004).

Algumas espécies são bem conhecidas quanto ao potencial de cultivo e quanto aos compostos que sintetizam. Na tabela 2 a seguir, são apresentados alguns produtos obtidos das microalgas:

Tabela 2: Alguns produtos obtidos de microalgas

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

Fonte: Adaptado de BARBOSA (2003)

3.2.1. Ácidos graxos poliinsaturados:

Uma grande importância tem sido dada à provisão das fontes de ácidos graxos poliinsaturados. Isto é devido às mudanças na dieta humana, nos últimos séculos, e ao acentuado aparecimento de uma série de doenças relacionadas ao baixo consumo destes compostos, bem como a sua reconhecida significância terapêutica, especialmente àqueles da família Ômega-3 (SIMOPOULOS, 2002).

Os ácidos graxos podem ser obtidos de fontes animais ou vegetais, tanto terrestres quanto aquáticas, e diversos microrganismos têm sido considerados como uma alternativa às fontes usuais desta classe de lipídios (CERTIK & SHIMIZU, 1999). Segundo RATLEDGE (2001), a produção de óleo a partir de organismos unicelulares (“single cell oil” – SCO) é um conceito relativamente novo, sendo que as microalgas mostram-se como uma promissora opção.

O conteúdo de lipídios da biomassa microalgal pode variar entre 1 a 40% do peso seco e, em certas condições de cultivo, pode alcançar até 85%. Os lipídios algais são tipicamente compostos por glicerol, açúcares ou bases esterificadas e ácidos graxos contendo entre 12 e 22 carbonos, podendo ser tanto saturados quanto mono ou poliinsaturados. Os ácidos graxos correspondem à maior fração dos lipídios e, em algumas espécies, os PUFA (“polyunsaturated fatty acids”) representam entre 25 e 60% dos lipídios totais (BECKER, 2004).

Os lipídios de algumas espécies (quase sempre marinhas) contêm quantidades relativamente altas de ácidos graxos poliinsaturados de cadeia longa, notadamente de EPA (20:5 n-3) e DHA (22:6 n-3) (VOLKMAN et al., 1989; ZHUKOVA & AIZDAICHER, 1995; ROBLES MEDINA et al., 1998). Ao EPA e ao DHA, são atribuídas propriedades benéficas à saúde, associadas ao consumo de certos peixes marinhos e seus óleos. Os PUFA têm função na prevenção e tratamento de uma série de doenças cardiovasculares, da aterosclerose e da arritmia, da redução da pressão arterial, da redução dos níveis de colesterol e triglicéridios no plasma, da artrite reumatóide, do câncer e são aparentemente essenciais na nutrição infantil e no desenvolvimento cerebral (DERNER, 2006).

Os peixes marinhos são uma conhecida fonte destes compostos nutricionalmente muito importantes. Entretanto, existem consideráveis evidências indicando que os ácidos graxos poliinsaturados encontrados nos óleos de peixes provêm da ingestão de organismos que constituem o zooplâncton, os quais têm as microalgas como seu principal alimento. Desta maneira, através da cadeia trófica, os PUFA sintetizados e acumulados pelas microalgas são direcionados até os peixes (ROBLES MEDINA et al., 1998).

Peixes como bacalhau, savelha, arenque, anchova e sardinha contêm uma alta proporção de gordura e são empregados na obtenção de PUFA. No entanto, os produtos extraídos destas fontes podem apresentar vários problemas, tais como: odor desagradável, contaminação com metais pesados, baixa estabilidade, presença de colesterol, produção variável e um complexo perfil de ácidos graxos, podendo apresentar mais de 50 tipos diferentes. Em contraste, os ácidos graxos das microalgas não apresentam as desvantagens citadas. Além disso, nos cultivos, as condições ambientais podem ser controladas e as espécies selecionadas de acordo com o(s) ácido(s) graxo(s) desejado(s). Ademais por apresentar composição mais simples, o processo de purificação dos PUFA é facilitado (ROBLES MEDINA et al., 1998).

3.2.2. Carotenóides:

Cada classe de microalgas apresenta sua própria combinação de pigmentos e, conseqüentemente, coloração distinta. Os três principais grupos de pigmentos encontrados na biomassa microalgal são as clorofilas, os carotenóides e as ficobilinas (ficobiliproteínas) (ABALDE et al., 1995). É possível incrementar a síntese destes

compostos através da manipulação das condições de cultivo, usualmente por algum estresse ambiental.

Os carotenóides, pigmentos de grande interesse comercial, funcionam como fotoprotetores e como pigmentos fotossintéticos secundários, sendo que cada espécie pode conter entre 5 e 10 tipos de um universo de aproximadamente 60 diferentes carotenóides presentes nas células microalgais. Diversas espécies podem acumular grande concentração de betacaroteno, astaxantina ou cantaxantina, por exemplo, os quais têm uma ampla aplicação como corantes naturais e como antioxidantes (PULZ & GROSS, 2004).

O crescente interesse industrial por esses pigmentos naturais pode ser explicado pela capacidade atribuída a eles de prevenir doenças degenerativas: combatendo os radicais livres e funcionando como agentes anticâncer e estimuladores do sistema imunológico. Comparados aos corantes sintéticos, são mais resistentes à presença de ácido ascórbico, ao calor, aos processos de congelamento e apresentam eficiência mesmo quando aplicados nos alimentos em pequenas quantidades. A rígida regulamentação para a aplicação de corantes sintéticos, na indústria de alimentos, estimula pesquisas visando ao desenvolvimento produtivo e ao uso de carotenóides microalgais como aditivo alimentar (CAMPO et al., 2000).

3.2.2.1. Betacaroteno:

O betacaroteno é um pigmento tipicamente encontrado nas microalgas, bem como nas macroalgas e nas plantas. Geralmente é encontrado numa fração inferior a 1% da massa seca, mas pode ser acumulado até aproximadamente 10% em espécies halotolerantes (crescem em elevada concentração de sal), como naquelas do gênero *Dunaliella*. Este composto, extraído da biomassa microalgal, vem sendo aplicado comercialmente como corante natural, podendo atuar como pró-vitamina A, produto antioxidante e contra doenças degenerativas como o câncer (ABALDE et al., 1995).

A espécie *D. salina* é reconhecidamente uma importante fonte de betacaroteno. O cultivo comercial é realizado de maneira eficiente em tanques abertos, em regiões de salinas, onde a elevada incidência luminosa e a alta salinidade geram um estresse (desequilíbrio osmótico) nas células, que respondem com a síntese de glicerol e betacaroteno.

O betacaroteno de fonte microalgal tem sido comercializado sob três formas: extratos, pó e como biomassa seca. Segundo BEN-AMOTZ (2004), o preço deste produto varia entre US\$ 300,00 e US\$ 3.000,00 por quilograma, de acordo com a qualidade do produto e a demanda.

3.2.2.2. Astaxantina:

A espécie *Haematococcus pluvialis* tem sido cultivada comercialmente devido a sua capacidade de acumular astaxantina sob condições de estresse ambiental como

deficiência de nitrogênio e elevada intensidade luminosa (CORDERO-ESQUIVEL et al., 1996). No mercado, são encontrados produtos na forma de concentrados em pó, liofilizados ou biomassa desidratada, bem como extrato em óleo vegetal.

O maior mercado para a astaxantina tem sido a aquicultura, onde é especialmente empregada para dar a cor avermelhada à carne do salmão cultivado (TRIPATHI et al., 1999). Segundo CYSEWSKI & LORENZ (2004), a astaxantina natural é vendida por aproximadamente US\$ 2.500,00 o quilograma, sendo que 95% do consumo mundial da aquicultura são abastecidos com astaxantina sintética. Como existe em nível mundial uma crescente procura por produtos naturais, as empresas produtoras de astaxantina (extraída das microalgas) percebem isso como uma grande oportunidade comercial.

Além do betacaroteno e da astaxantina, outros pigmentos como as ficobiliproteínas, notadamente a ficoeritrina (de coloração avermelhada), sintetizada por Cyanophyta, Rhodophyta e Cryptophyta, e a ficocianina (de coloração azulada / avermelhada) produzida por Cyanophyta, Rhodophyta, Cryptophyta e Glaucophyta, têm sido empregados como corantes na indústria de alimentos, na indústria de cosméticos e em ensaios imunológicos (BECKER, 2004).

3.3. Biocombustíveis a partir de microalgas:

Diferentes estudos realizados mostram que as microalgas possuem o mais elevado rendimento para extração de óleo vegetal, tornando-se uma excelente alternativa para a extração de óleo para biocombustíveis, devido à sua elevada densidade de lipídios comparado com as oleaginosas tais como canola, soja, palma, etc. Dessa forma, as microalgas poderiam teoricamente produzir mais óleo por hectare e reduzir o custo dos biocombustíveis. A tabela 3 a seguir mostra uma comparação do rendimento da extração de óleo vegetal a partir de diferentes cultivos:

Tabela 3: Rendimento de extração de óleo vegetal

CULTIVO	RENDIMENTO DE ÓLEO (L/ha)
Milho	172
Grão de Soja	446
Canola	1190
Pinhão Manso (<i>Jatropha curcas</i> L.)	1892
Coco	2689
Óleo de palma	5950
Microalga (70% óleo / biomassa)	136900
Microalga (30% óleo / biomassa)	58700

Fonte: CHISTI (2007)

Comparando-as com a oleaginosa de maior rendimento em óleo, a palma, temos um fator de vantagem de aproximadamente 25 vezes, quando as algas são cultivadas em piscinas ou lagoas abertas.

As microalgas podem também ser cultivadas em uma instalação industrial com o uso de fotobioreatores. Neste caso, além de ser necessária uma superfície muito menor do que a das lagoas abertas, a utilização de fotobioreatores ajuda novamente a minimizar a preocupação com o uso da terra para se produzir biocombustíveis, ao invés de alimentos.

3.3.1. Cultivo de microalgas para a produção de biodiesel:

Assim como as plantas, as microalgas requerem três componentes para crescer: luz solar, CO₂ e água. A fotossíntese é um processo bioquímico através do qual as plantas, as microalgas e alguns tipos de bactérias convertem a energia fornecida pela luz solar em energia química. Esta energia é utilizada em reações que levam à formação dos açúcares ou à fixação do nitrogênio nos aminoácidos, que são blocos fundamentais para a síntese das proteínas.

Como as microalgas necessitam de luz solar, CO₂ e água para o seu crescimento, elas podem ser cultivadas em piscinas, lagoas e lagos abertos. Mas exatamente por estes sistemas serem abertos, elas se tornam muito mais vulneráveis à contaminação por outras espécies de microalgas e/ou bactérias.

Por esta razão, o número de espécies que têm sido cultivadas com sucesso para uma finalidade dada em um sistema aberto é relativamente pequeno. Além disso, em sistemas abertos há menos controle sobre a temperatura da água, a concentração de CO₂ e as condições de iluminação. Isto faz com que a estação de crescimento seja muito dependente da localização geográfica e, com exceção das áreas tropicais, seja limitada apenas aos meses mais quentes.

Se por um lado temos essas desvantagens com os sistemas abertos, por outro lado temos como vantagem o seu baixo custo de implementação, pois há somente a necessidade de escavar uma trincheira ou uma pequena lagoa (PÉREZ, 2007).

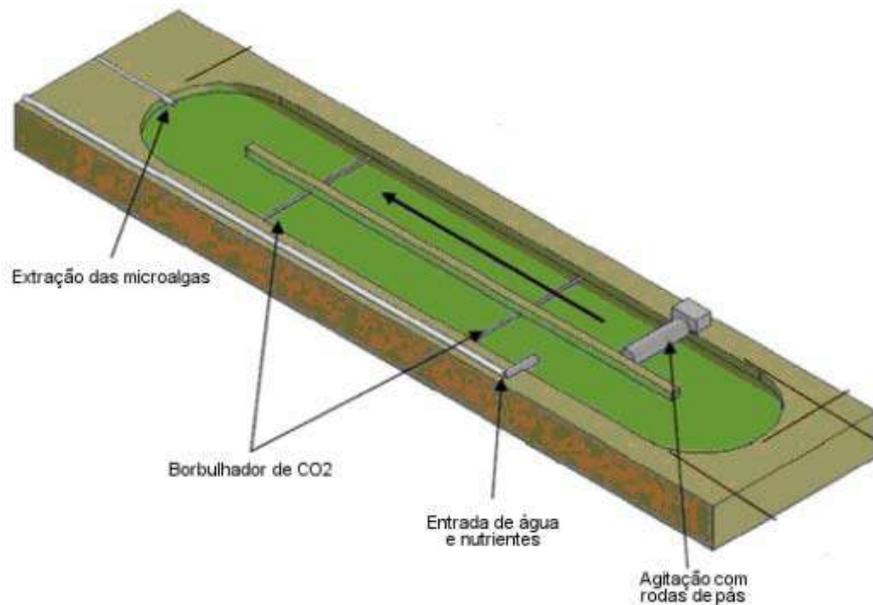


Figura 1: Piscina aberta para o crescimento de microalgas
 Fonte: PÉREZ, 2007.

Uma variação possível no sistema aberto é cobrir a superfície da piscina ou da lagoa com uma estufa. Isto minimiza muitos dos problemas associados a esse tipo de sistema. Permite também um maior número de espécies de microalgas a serem cultivadas, o controle sobre as espécies criadas e a extensão ligeira do tempo durante o qual pode ser utilizada a estação de crescimento se ela não for aquecida (aquecendo-a, pode-se produzir durante todo o ano). Nestes sistemas quase fechados é também possível aumentar a quantidade de CO₂, tornando maior a velocidade de crescimento das microalgas.

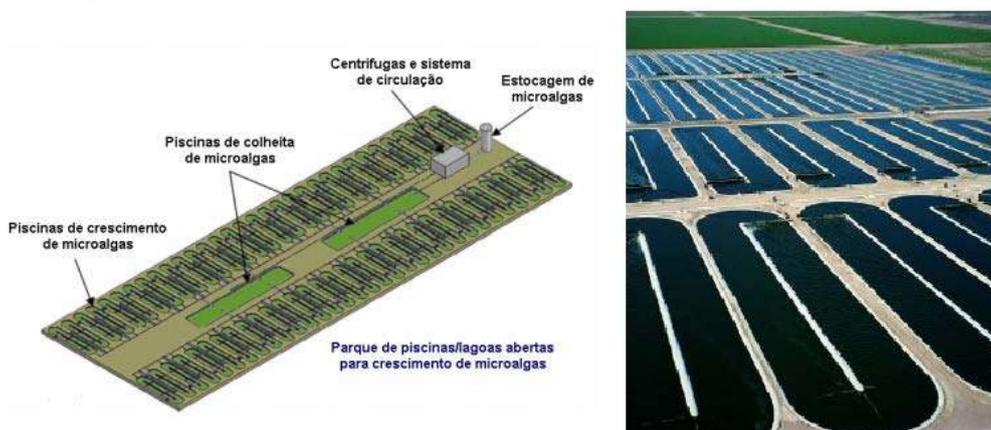


Figura 2: Parque de lagoas abertas do tipo “pista de corrida” (raceway ponds)
 Fonte: PÉREZ, 2007.

As lagoas onde as microalgas são cultivadas são usualmente denominadas de “lagoa tipo pista de corrida” (raceway ponds). Nelas, as microalgas, a água e os nutrientes circulam em torno de uma espécie de pista de corrida. A circulação e a agitação são realizadas por meio de rodas de pás que garantem a manutenção do fluxo e

a suspensão das microalgas na água. As lagoas são geralmente mantidas rasas, pois as microalgas precisam ser expostas à luz solar, já que a mesma pode penetrar a água da lagoa somente até uma profundidade limitada. A operação da lagoa é realizada de forma contínua, com o CO₂ e os nutrientes sendo constantemente fornecidos, enquanto a água rica em microalgas é removida no lado oposto da estrutura.

3.3.2. Os Fotobioreatores:

Com o objetivo de alcançar elevadíssima produtividade, alguns cultivos têm sido desenvolvidos recentemente em um equipamento específico chamado fotobioreator.

Estes cultivos são realizados em sistemas fechados construídos com tubos de plástico, vidro ou policarbonato. Nos fotobioreatores, é possível controlar condições de cultivo como quantidade dos nutrientes, temperatura, iluminação, pH e etc. Isto implica uma elevada produtividade, viabilizando assim a produção comercial.

Os custos de ajuste e operação de um fotobioreator são mais elevados do que os das lagoas abertas, mas a eficiência e os rendimentos em óleo deste método são significativamente maiores. Esta desvantagem inicial no custo é dissipada no médio e longo prazo com o funcionamento do sistema.

Um fotobioreator consiste basicamente em um bioreator que incorpora algum tipo de fonte de luz. Fotobioreator é geralmente o termo mais empregado para definir um sistema fechado, ao contrário de uma lagoa aberta. Uma lagoa coberta com uma estufa também poderia ser considerada um fotobioreator.

Dado que estes sistemas são fechados, é necessário introduzir nele tudo de que as microalgas necessitam para crescer: CO₂, água, luz e nutrientes.

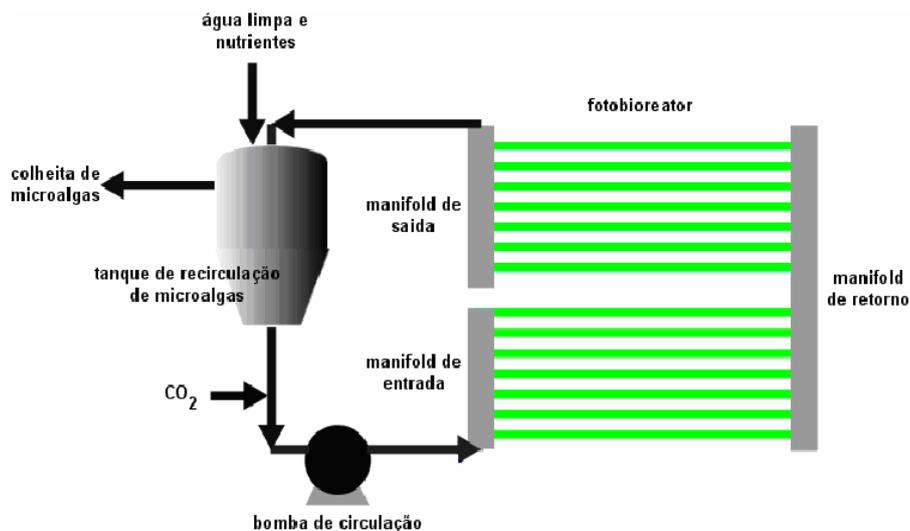


Figura 3: Diagrama esquemático de um fotobioreator
Fonte: PÉREZ, 2007.



Figura 4: Fotobioreator em operação
Fonte: PÉREZ, 2007.

O fotobioreator pode ser operado para recolher as microalgas produzidas de forma contínua ou de uma só vez. Um fotobioreator operado dessa segunda forma é carregado inicialmente com nutrientes e com as sementes de microalgas e levado a operar até o fim de uma batelada, quando é realizada então a colheita das microalgas. Já em um fotobioreator contínuo a colheita de microalgas é realizada com uma frequência elevada, determinada pelos parâmetros de operação do fotobioreator.



Figura 5: Colheita de microalgas produzidas no fotobioreator
Fonte: PÉREZ, 2007.

Algumas das fontes de luz que podem ser usadas para sustentar a fotossíntese em um fotobioreator incluem:

- Luz solar natural;
- Diodos emissores de luz;
- Bulbos fluorescentes.

3.3.3. Extração do óleo das microalgas:

Para a extração de alguma substância de interesse, é necessário primeiramente separar a biomassa do meio de cultura. Esse processo envolve uma ou mais etapas sólido-líquido, como floculação, centrifugação e filtração, por exemplo. A seguir, a biomassa é desidratada. Para tanto, podem ser empregadas diversas técnicas, como a secagem ao sol, a secagem por atomização e a liofilização. Para a extração dos compostos, as células das microalgas são rompidas por meio de métodos como homogeneização, ultra-som, choque osmótico, solventes, enzimas e etc.

A extração do óleo de microalgas é um tópico que pode gerar discussões, pois este processo tem um alto custo e pode determinar a sustentabilidade do biodiesel baseado nessa fonte.

Há três métodos bem conhecidos para extrair o óleo das sementes oleaginosas, e estes métodos podem aplicar-se igualmente bem para as microalgas:

- **Prensagem:** Enquanto se pesquisa outros processos mais eficientes, uma opção de processo simples é usar uma prensa para extrair uma grande porcentagem (70 a 75%) de óleos das microalgas. A extração é realizada comprimindo as microalgas contidas em um determinado volume, por meio da aplicação de uma pressão mecânica adequada. Muitos fabricantes comerciais de óleo vegetal usam uma combinação de pressão mecânica e de solventes químicos para extrair o óleo.
- **Extração por solvente:** O óleo de microalgas pode ser extraído usando produtos químicos. O benzeno e o éter etílico têm sido usados. Um produto popular na extração por solvente é a hexana, que é relativamente barata. A desvantagem em usar solventes para a extração do óleo é o perigo inerente à manipulação desses produtos químicos. Os solventes químicos podem apresentar perigo de explosão, dependendo das características físico-químicas dos mesmos. A extração por solvente com hexana pode ser usada isoladamente ou em conjunto com o método da prensagem de óleo. Depois da extração do óleo, a polpa restante pode ser misturada com a ciclohexana para que se tire o óleo remanescente. Ele se dissolve na ciclohexana e a polpa é filtrada para fora da solução. O óleo e o produto são, então, separados por destilação. Prensagem e solvente juntos podem extrair mais de 95% do óleo total contido nas microalgas.
- **Extração supercrítica:** Este método, sozinho, pode extrair quase 100% de todo o óleo. Entretanto, faz com que seja necessário equipamento especial para o confinamento e a aplicação de pressão. Na extração supercrítica é utilizado CO₂. O gás é liquefeito sob pressão e aquecido ao seu ponto supercrítico, em que tem as propriedades tanto de líquido quanto de gás. Este fluido líquido atua então como um poderoso solvente para extração do óleo.

Outros métodos menos conhecidos para extração do óleo são:

- **Extração Enzimática:** Com o auxílio da água como solvente, esse método utiliza enzimas para degradar a parede celular da microalga, o que facilita o fracionamento do óleo contido na mesma. O custo deste processo de extração é estimado como sendo muito mais elevado do que o da extração por solvente usando-se a hexana.
- **Choque Osmótico:** Trata-se de uma redução repentina na pressão osmótica, que pode causar a ruptura das paredes das células das microalgas em solução. O choque osmótico é usado para liberar componentes celulares, tais como: o óleo, proteínas e etc.
- **Extração ultra-sônica assistida:** A extração ultra-sônica acelera enormemente o processo de extração. Em um reator ultra-sônico, as ondas são usadas para criar bolhas de cavitação em um material solvente. Quando essas bolhas estouram perto das paredes da célula, criam ondas de choque e jatos líquidos que causam a ruptura da parede celular e a liberação do óleo no solvente (PÉREZ, 2007).

3.3.4. Caracterização do biodiesel de microalgas:

O biodiesel das microalgas não é significativamente diferente do biodiesel produzido a partir dos óleos de plantas oleaginosas. Todo biodiesel é produzido a partir dos triglicerídeos das oleaginosas ou das microalgas.

Entretanto, algumas diferenças podem existir:

- As microalgas produzem muitos compostos poliinsaturados, que podem apresentar um problema de estabilidade (níveis elevados de ácidos graxos poliinsaturados tendem a diminuir a estabilidade do biodiesel). Porém, os poliinsaturados apresentam um ponto de congelamento muito mais baixo do que os monoinsaturados ou saturados. Isso faz com que o biodiesel de microalgas tenha propriedades muito mais adaptadas ao tempo frio do que o biodiesel de oleaginosas. Já que uma das atuais desvantagens do biodiesel é o seu desempenho relativamente pobre a baixas temperaturas, parece promissor ver o biodiesel de microalgas tendo este desempenho nesse quesito;
- A diferença mais significativa, entretanto, se refere ao rendimento do óleo extraído das microalgas. De acordo com algumas estimativas, o rendimento do óleo de microalgas é 150 vezes maior do que o dos óleos das plantas oleaginosas de melhor desempenho (PÉREZ, 2007).

Sendo assim, é possível listar algumas das vantagens da produção do biodiesel a partir de microalgas:

- Rendimento mais elevado e, conseqüentemente, custo mais baixo;
- As microalgas podem crescer praticamente em qualquer lugar onde exista bastante luz solar;
- A produção do biodiesel de microalgas propicia também o benefício adicional de reduzir o CO₂ e as emissões de NOx das usinas termoelétricas, se as microalgas forem cultivadas com o uso dos gases de exaustão dessas usinas.

3.4. Outras aplicações:

Além das aplicações relacionadas ao emprego das microalgas e dos produtos extraídos destas na indústria de alimentos e na produção de biocombustíveis, muitos estudos vêm sendo realizados nos mais diversos campos, tais como: no tratamento de águas residuais de inúmeros processos industriais, para a detoxificação biológica e remoção de metais pesados; como bioindicadores, na detecção de nutrientes (para as microalgas) e substâncias tóxicas (detergentes, efluentes industriais, herbicidas etc.).

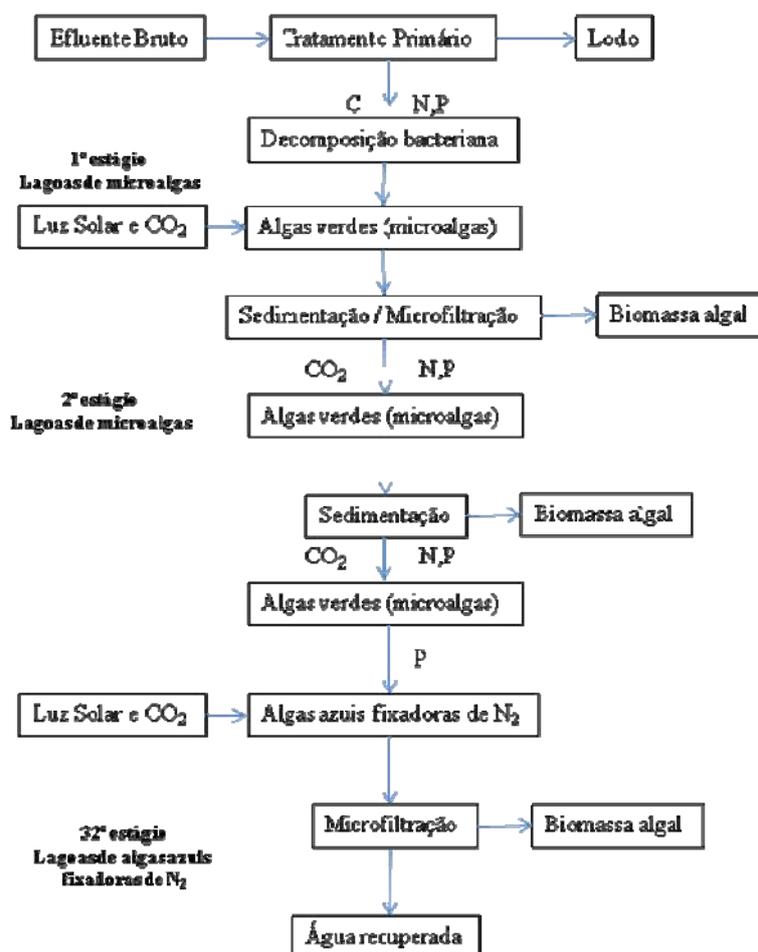


Figura 6: Esquema do processo de tratamento terciário de águas residuais com microalgas

Fonte: Adaptado de Oilgae Report, 2009

Na agricultura, a biomassa pode ser empregada como biofertilizante do solo. Além de sintetizar toxinas, as microalgas podem produzir uma gama de moléculas bioativas com propriedades antibióticas, anticâncer, antiinflamatórias, antivirais, redutoras do colesterol, enzimáticas e com outras atividades farmacológicas. Além disso, podem ser usadas na mitigação do efeito estufa, pela assimilação do CO₂, resultado do processo de queima dos combustíveis fósseis e de práticas agrícolas impróprias (as queimadas, por exemplo). Por fim as microalgas são úteis a produção de hidrogênio livre, por biofotólise na elaboração de um inseticida natural, pela recombinação de uma sequência do DNA da bactéria *Bacillus thuringiensis var.israelensis* (Bti) no genoma de uma espécie de microalga, consumida pelo mosquito da malária em sua forma larval (HEJAZI, 2004).

3.5. Microalgas e a captura de CO₂:

Na atmosfera da Terra alguns gases, principalmente o dióxido de carbono (CO₂) o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), funcionam como uma camada protetora que permite a entrada da luz solar, mas retêm uma quantidade do calor produzido, impedindo que uma parcela da radiação absorvida escape para o espaço. Essa particularidade da atmosfera, denominada de efeito estufa, é benéfica para a vida, pois, sem esses gases, a superfície da Terra estaria coberta de gelo e não haveria vida no planeta, tal como conhecemos. Entretanto, os níveis atmosféricos do dióxido de carbono e de outros gases aumentaram muito desde a Revolução Industrial, causando uma intensificação do efeito estufa, com sérios danos ambientais em todo o planeta. Para reduzir a concentração de dióxido de carbono atmosférico existem duas possibilidades: a redução das emissões ou a absorção do dióxido de carbono produzido em excesso, também denominado de sequestro de carbono. Algumas medidas para a redução dos níveis atuais de CO₂ na atmosfera foram propostas no Tratado de Kyoto em 1997, que estabelece que os países desenvolvidos deverão reduzir em 5% a emissão de gases que causam o efeito estufa até 2012 (BORGES, 2007).

Está sendo proposto o plantio de árvores (florestamento/reflorestamento) como mecanismo de sequestro de carbono (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), que possuem a capacidade de incorporar o dióxido de carbono à biomassa vegetal através do processo da fotossíntese. Entretanto, ao se lavrar o solo para o plantio, grande quantidade de CO₂ é liberada para a atmosfera o que anularia o efeito benéfico da absorção de dióxido de carbono e sua incorporação na biomassa das plantas ao longo de sua vida. A utilização de outros organismos fotossintéticos com capacidade de absorver CO₂ da atmosfera poderia ser uma alternativa ao reflorestamento (BORGES, 2007).

As microalgas são as principais responsáveis pela absorção biológica do CO₂ atmosférico nos oceanos que cobrem 3/4 partes da superfície do globo terrestre, uma vez que estão presentes em grande número na coluna de água. Uma parte do CO₂ absorvido pelas microalgas é transferida para o fundo oceânico num processo conhecido como "bomba biológica". Este processo, juntamente com a difusão direta do CO₂ para a

água, impede que o acúmulo de gases do efeito estufa seja ainda maior. Além de seu rápido crescimento, as microalgas podem ser cultivadas em águas salobra e/ou salgada, liberando o uso de água doce para o consumo humano e agricultura. Além disso, as microalgas apresentam uma ampla tolerância a fatores ambientais extremos, podendo ser cultivadas intensivamente em pequenos espaços e em regiões impróprias para atividades agrícolas representando, assim, uma alternativa efetiva para a diminuição do efeito estufa (WANG et al., 2008).

Além disso, as microalgas podem fixar CO₂ a partir de diferentes fontes além da atmosférica, como da exaustão de gases industriais e fixar o CO₂ na forma de carbonatos solúveis (NaHCO₃ e Na₂CO₃). Como a atmosfera contém somente 0,03-0,06% de CO₂, espera-se que as limitações da transferência de massa poderiam retardar o crescimento da microalga. Por outro lado, exaustão de gases industriais como gases de combustão contém até 15% de CO₂, proporcionando uma fonte rica de CO₂ para o cultivo de microalgas e uma rota mais eficiente para a biofixação de CO₂. A terceira via é a fixação de CO₂ através de reações químicas para a produção de carbonatos e, conseqüentemente, como fonte de carbono para o cultivo de microalgas (BORGES, 2005).

A tabela 4 a seguir mostra uma comparação hipotética entre a produção de biodiesel a partir da soja e a partir de microalgas. Este trabalho foi desenvolvido pelo “*National Renewable Energy Laboratory – NREL*”, um instituto americano que é um dos líderes mundiais em pesquisa e desenvolvimento em energia renovável. A partir desta análise, tomando como base uma produção de 3 bilhões de galões por ano para ambas as matérias-primas, é possível perceber que o cultivo de microalgas ocupa um espaço físico muito menor para o mesmo volume de produção; há um consumo maior de água pela produção através das microalgas, porém estas são capazes de crescer em água salobra ou mesmo contaminada, não comprometendo os recursos hídricos praticamente limitados nos dias de hoje. Em relação ao CO₂ capturado, foi estimado um volume de 70 milhões de toneladas por ano. Para uma questão de comparação, de acordo com a Agência Brasileira de Inteligência (ABIN), toda a indústria do estado de São Paulo emitiu 38 milhões de toneladas de CO₂ ao longo do ano de 2006.

Tabela 4: Comparativo da produção de biodiesel a partir da soja e da microalga

	Soja	Microalga
gal/ano	3 bilhões	3 bilhões
gal/acre	48	1200
Total acres	62,5 milhões	2,5 milhões
Uso de água	-	6 trilhões gal/ano
CO ₂ capturado	-	70 milhões ton/ ano
Preço por galão	\$4,80	\$8,00

Fonte: DARZINS, 2008.

4. A prospecção tecnológica como ferramenta de competitividade:

A necessidade de aumento da competitividade por parte de organizações e países pode ser explicada, em parte, pelo grande desenvolvimento das tecnologias da informação. Isso tem levado o mundo ao que se denomina “aldeia global”, fazendo com que os países e as organizações se encontrem frente a um mercado global altamente competitivo. Esse aumento nos níveis competitivos faz com que a antecipação das mudanças tecnológicas se torne um fator importante, levando a capacidade de uma empresa, indústria ou país em identificar novas tecnologias e tomar ações apropriadas ser de vital importância (DU PREEZ, 1999).

O comportamento dinâmico e as inter-relações entre os componentes de uma sociedade provocam modificações nas demandas por tecnologia, sendo esta considerada um importante componente para a sobrevivência das organizações e, de certa forma, para o crescimento da sociedade como um todo, trazendo a possibilidade de se criar novas oportunidades. Neste contexto, fazem-se mais do que necessário os estudos de prospecção tecnológica, fundamentados principalmente por quatro fatores:

- O crescimento dos mercados e o conseqüente aumento da produção necessitam cada vez mais de sistemas estruturados de inovação, organizações e serviços baseados no conhecimento. Isto tem aumentado a relevância dos investimentos em ciência e tecnologia. Como tais investimentos são, a princípio, elevados e de certa forma arriscados, a utilização de ferramentas que possam auxiliar no direcionamento desses investimentos tem se tornado cada mais frequente entre países e organizações;
- A restrição e a justificativa aos gastos públicos têm se tornado comum em vários países, independente de seu grau de desenvolvimento. Assim, todo investimento público, além de justificado, deve mostrar seu grau de relevância ao país ou setor;
- As modificações sofridas pela gestão da produção, no que se refere ao aumento de flexibilidade nas tomadas de decisão, trabalho em equipe e maior enfoque nas relações empresa-cliente, bem como maior ênfase nos processos de “aprendizagem” e “conhecimento” suscitam a maior necessidade de se desenvolverem “visões compartilhadas sobre o futuro da organização e os fatores sociais que afetam sua criação”;
- As mudanças sofridas no processo de geração do conhecimento, que se caracteriza por uma maior interdisciplinaridade e heterogeneidade de áreas. Sua construção se dá através da contextualização de aplicação, onde se espera que ocorram parcerias e da criação de redes de informações entre pesquisadores e usuários, que de alguma forma se beneficiam com a pesquisa.

A análise prospectiva é uma importante ferramenta de gestão que se apóia na premissa da complexidade e na necessidade de explorar e entender uma teia de relações complexas, para se estabelecer possíveis alternativas de futuro. Entre muitos possíveis usos, a prospecção tecnológica pode indicar oportunidades e ameaças ao desenvolvimento tecnológico, setorial e regional, apontando gargalos, limitações, oportunidades e demandas por tecnologias.

Entre várias definições de prospecção tecnológica, pode-se citar que é um meio sistemático de mapear desenvolvimentos científicos e tecnológicos futuros capazes de influenciar de forma significativa uma indústria, a economia ou a sociedade como um todo.

Diferentemente das atividades de previsão clássica, que se dedicam a antecipar um futuro suposto como único, os exercícios de prospecção são construídos a partir da premissa de que são vários os futuros possíveis e são conduzidos de modo a “construir conhecimento”, ou seja, buscam agregar valor às informações do presente, de modo a transformá-las em conhecimento e subsidiar os tomadores de decisão e os formuladores de políticas destacando rumos e oportunidades para os diversos atores sociais.

Fazer prospecção significa identificar quais são as oportunidades e necessidades mais importantes para a pesquisa no futuro, sem perder de vista que os desenvolvimentos científicos e tecnológicos são resultantes de complexa interação entre diferentes fatores, da existência e ação de atores sociais diversos, de trajetórias tecnológicas em evolução e competição, de visões de futuro conflitantes, de urgentes necessidades sociais, de oportunidades e restrições econômicas e da crescente consciência ambiental.

Um estudo prospectivo envolve o uso de múltiplos métodos ou técnicas, quantitativos e qualitativos, de modo a se obter a complementaridade. Uma vez que não faz sentido definir uma fórmula pronta para uma metodologia de prospecção, a escolha dos métodos e técnicas e seu uso dependem intrinsecamente de cada situação – considerados aspectos tais como especificidades da área de conhecimento, aplicação das tecnologias no contexto regional ou local, governamental ou empresarial, abrangência do exercício, horizonte temporal, custo e objetivos. Mesmo que nenhuma técnica, em específico, possa eliminar as incertezas sobre o futuro, um processo estruturado que permita se prever o futuro tecnológico e avaliar as tecnologias emergentes pode ser de grande ajuda para a tomada de decisão tecnológica.

Dentro do contexto da inovação, a prospecção tecnológica auxilia no sentido de:

- Promover canais e linguagens comuns para a circulação de informação conhecimento de caráter estratégico para a inovação;
- Fornecer mais inteligência antecipativa inserida no processo de tomada de decisão em ciência, tecnologia e inovação;

- Incorporar visões de futuro no pensamento dos atores sociais envolvidos no processo de tomada de decisão e de criação de redes;
- Apoiar as decisões relativas ao estabelecimento de prioridades para P&D, gestão dos riscos das inovações tecnológicas, melhoria da competitividade tecnológica de produtos, processos e serviços.

Quanto às estratégias de execução, de modo geral, consideram-se dois grandes pontos de partida simultaneamente, uma vez que são essencialmente complementares:

Evolução Tecnológica: busca-se, a partir do referencial tecnológico, estudar as características das trajetórias tecnológicas consolidadas e identificar possíveis desdobramentos e principais condicionantes, além de identificar trajetórias emergentes e/ou alternativas. Neste caso, por meio da gestão da informação se pode visualizar o estado-da-arte e as tendências de determinado setor ou tema, com o objetivo de gerar informações sobre a sua trajetória passada e sobre as perspectivas futuras, bem como emitir a percepção sobre tendências inovadoras não consensuais.

Evolução Sócio-Institucional: busca-se examinar as maneiras pelas quais a ciência e a tecnologia se relacionam com a evolução da sociedade em distintos cenários. Para isso busca-se avaliar os possíveis impactos de diferentes estratégias de C&T no desenvolvimento, identificar incentivos e restrições sociais, políticas, econômicas e institucionais para as diferentes trajetórias de C&T, além de identificar e analisar a opinião pública e seu conjunto de valores.

As principais variáveis que compõem o escopo dos estudos de prospectiva tecnológica podem ser assim consideradas:

- comunicação entre diferentes grupos: pesquisadores de diferentes campos científicos, tecnológicos, mercadológicos e etc, usuários e financiadores.
- concentração em um futuro de longo prazo, o que de certa forma não é um processo rotineiro comum.
- coordenação entre pesquisadores e usuários, das atividades científicas e tecnológicas futuras.
- consenso sobre os futuros mais prováveis, desejáveis e tendenciais e as prioridades para a pesquisa e desenvolvimento.
- compromisso dos participantes com os resultados obtidos e na tentativa de converter em ação as informações obtidas no estudo prospectivo.

4.1. Métodos e Técnicas:

As diferentes abordagens, métodos e técnicas podem ser considerados como um meio para aperfeiçoar a atividade prospectiva e seus resultados. A lista de campos de

estudo relacionados com a temática de explorar o futuro é grande e tende a crescer ainda mais. Métodos e técnicas tendem a diferir em abordagens e em habilidades requeridas. Podem ser classificados como "hard" (quantitativos, empíricos, numéricos) ou "soft" (qualitativos, baseados em julgamentos ou refletindo conhecimentos tácitos). Muitos métodos e técnicas atualmente em uso se originam de outros campos do conhecimento, tais como modelagens e simulações e se valem das facilidades aportadas pela tecnologia da informação coletando e tratando grandes quantidades de dados disponíveis de forma eletrônica para identificar tendências através de processos de "mineração de dados".

A **criatividade** é uma característica que deve estar presente em todos os estudos desta natureza, pois há a necessidade de se evitar visões pré-concebidas de problemas e situações e encoraja um novo padrão de percepção. É um meio de ampliar a habilidade de visualizar futuros alternativos. Alguns métodos contribuem para aprimorar esta característica naqueles que trabalham com prospecção ou gestão de tecnologia. Porter et al (1991), identifica 5 elementos chave na criatividade:

- Fluência: habilidade de gerar idéias em grande volume;
- Flexibilidade: habilidade de transformar conceitos familiares em novas formas ou mudar de velhos conceitos para novos;
- Originalidade: habilidade de ter idéias fora do comum;
- Percepção (awareness): habilidade de imaginar e perceber conexões e relações não óbvias;
- Vigor (drive): motivação e força para realizar.

Métodos descritivos e matrizes podem ser usados para ampliar a criatividade, quer seja de forma individual, quer seja coletiva, para possibilitar a identificação de futuros alternativos. Além disso, assim como outros métodos e técnicas, dependem da existência de especialistas, de boas séries de dados, de boas estruturas e da compreensão da modelagem e das tecnologias da informação e da comunicação.

Métodos estatísticos referem-se aos modelos que procuram identificar e medir o efeito de uma ou mais variáveis independentes importantes sobre o comportamento futuro de uma variável dependente. O procedimento padrão é testar modelos simples de ajuste (linear, exponencial, quadrado ou cúbico) para a variável dependente, procurando definir os parâmetros do modelo de modo que o erro residual seja mínimo. Já os modelos econométricos e os não-lineares lançam mão de equações mais complexas, fundamentadas em relações de causalidade previstas em teoria e na determinação em conjunto de parâmetros para uma ou mais equações simultâneas.

Opinião de especialistas tem seus limites estabelecidos naquilo que as pessoas percebem como factível, de acordo com sua imaginação e crenças, e deve ser usada sempre que a informação não puder ser quantificada ou quando os dados históricos não estão disponíveis ou não são aplicáveis. Mesmo quando há dados históricos, a opinião de especialistas pode e deve ser usada como uma forma de complementar as informações obtidas e de captação de conhecimentos tácitos, sinais fracos e *insights*. Por isso, tais métodos são considerados qualitativos.

Monitoramento e Sistemas de Inteligência constituem fontes básicas de informação relevante e por isso são quase sempre utilizados. Monitorar significa observar, checar e atualizar-se em relação aos desenvolvimentos numa área de interesse bem definida para uma finalidade bem específica. (PORTER et al.,1991). Alguns objetivos possíveis do monitoramento incluem:

- Identificar eventos científicos, técnicos ou sócio-econômicos importantes para a organização;
- Definir ameaças potenciais para a organização, implícitas nesses eventos. Identificar oportunidades para a organização envolvidas nas mudanças no ambiente;
- Alertar a direção sobre tendências que estão convergindo, divergindo, ampliando, diminuindo ou interagindo.

Segundo Porter et al (1991), estritamente falando, o monitoramento não é uma técnica de prospecção. No entanto, é a mais básica e amplamente utilizada porque provê o pano de fundo necessário no qual a prospecção se baseia. Assim sendo, é fundamental para qualquer prospecção. Pode ser usado para buscar todas as fontes de informação e produzir um rico e variado conjunto. As principais fontes em que se baseia são as de natureza técnica (revistas, patentes, catálogos, artigos científicos, etc). Além disso, podem ser feitas entrevistas com especialistas e outras informações não literárias podem ser coletadas. Coates et al (2001) apontam para a emergência, durante a década de 90, de uma nova forma de prospecção - a inteligência competitiva tecnológica - que vem substituindo o monitoramento clássico, ampliando sua abrangência e atuação.

Modelagens e simulações representam tentativas de identificar certas variáveis e criar modelos computacionais, jogos ou sistemas nos quais se pode visualizar a interação entre as variáveis ao longo do tempo. Computadores ou pessoas ou ambos podem ser envolvidos. Com os computadores, pode-se fazer o jogo do "e se...", onde se fazendo determinadas escolhas podem-se ver as conseqüências que se seguem.

Cenários, representam uma excelente opção, pois constituem uma forma de integração com outras informações úteis e são excelentes para comunicar resultados aos usuários em geral. Conforme Schwartz, apud Oliveira (2001), são definidos como instrumento para ordenar percepções sobre ambientes futuros alternativos, sobre os quais as decisões atuais se basearão. Na prática, cenários se assemelham a um jogo de estórias, escritas ou faladas, construídas sobre enredos desenvolvidos cuidadosamente. O método de construção de cenários busca construir representações do futuro, assim como rotas que levam até essas representações. Essas representações buscam destacar as tendências dominantes e as possibilidades de ruptura no ambiente em que estão localizadas as organizações e instituições.

A **análise de tendências** é a forma mais simples de prospecção. Este método é baseado na hipótese de que os padrões do passado serão mantidos no futuro. A análise de tendências, em geral, utiliza técnicas matemáticas e estatísticas para extrapolar séries temporais para o futuro. Coleta-se informação sobre uma variável ao longo do tempo e, em seguida, essa informação é extrapolada para um ponto no futuro. (SKUMANICH et al., 1997).

O processo de tomada de decisão inclui a busca de reduzir a incerteza e dúvidas sobre determinadas alternativas e permitir uma escolha razoável entre o que está disponível. Métodos de **avaliação e decisão** incluem o tratamento de múltiplos pontos de vista e sua aplicação permite priorizar ou reduzir os vários fatores que devem ser levados em consideração. Diferentes abordagens vêm sendo adaptadas e utilizadas, como o processo de hierarquias analíticas (AHP) e árvores de relevância, de tal forma que o decisor possa expressar preferências com intervalos de julgamento e estabelecer prioridades.

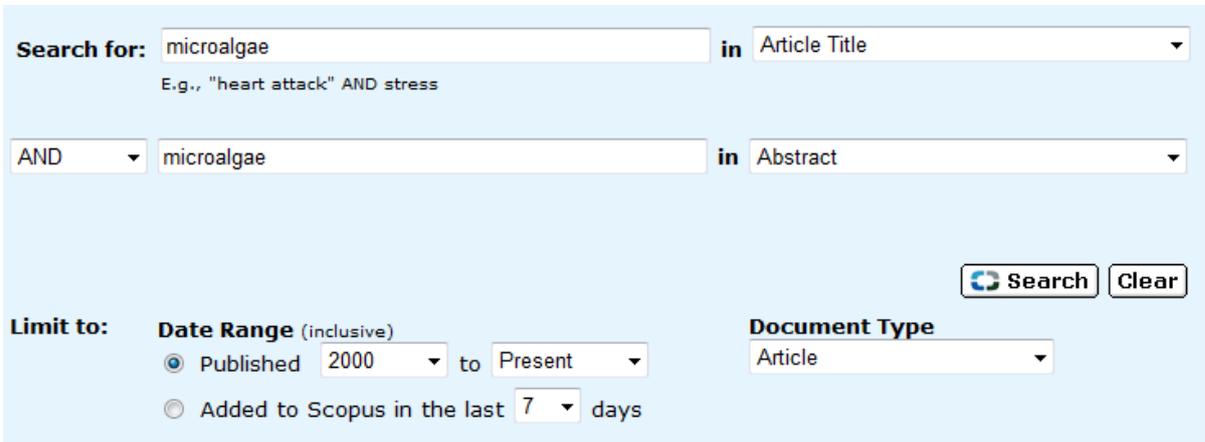
De acordo com essa classificação, esse conjunto de famílias compõe um referencial o denominado "Technology Futures Analysis" (TFA) que abriga conjuntamente as abordagens conhecidas como "Technology Forecasting"; "Technology Foresight" e "Technology Assessment" e seus métodos e processos mais utilizados.

Crescentes desafios têm levado a busca de novos enfoques para a prospecção em ciência, tecnologia e inovação e à avaliação de seus impactos e uma nova geração de métodos, técnicas e ferramentas parece estar surgindo da necessidade de fazer face aos desafios advindos da complexificação da ciência, tecnologia e inovação.

5. Prospecção tecnológica em artigos científicos:

O objetivo deste item é realizar um levantamento de informações sobre a utilização das microalgas, a partir de artigos científicos na base de dados SCOPUS, que foi escolhida para ser utilizada neste trabalho por fornecer as informações de maneira clara e objetiva, facilitando o refino das informações. Cabe salientar que a utilização da prospecção tecnológica em patentes também seria válida para este trabalho, porém decidiu-se restringir somente à prospecção em artigos devido ao volume de informações a serem analisadas.

Desta forma, para o período de 2000 a 2009, utilizou-se “*microalgae*” como palavra-chave, “forçando” que a mesma aparecesse no título e no resumo do artigo, com a finalidade de diminuir o aparecimento de informações irrelevantes ao assunto em questão. Desta forma, foram localizados 431 artigos.



The image shows a search interface for SCOPUS. The search term "microalgae" is entered in the "Search for:" field. The search is limited to "Article Title" and "Abstract". The date range is set to "Published" from "2000" to "Present". The document type is set to "Article". There are "Search" and "Clear" buttons.

Figura 7: Critério de Busca

Fonte: SCOPUS

5.1. Análise Temporal:

A partir da metodologia descrita anteriormente, foi realizada uma análise temporal dos artigos, que é capaz de mostrar a evolução das pesquisas e do desenvolvimento desta área. No gráfico a seguir, percebe-se que, após uma breve queda entre 2002 e 2003, o número de publicações atingiu níveis crescentes nos anos seguintes com maior concentração no ano de 2008.

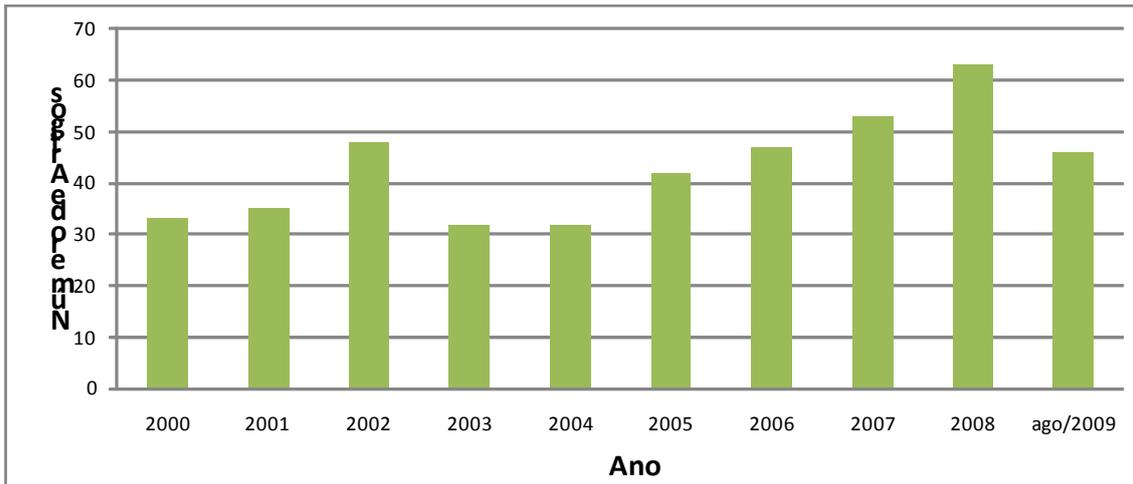


Figura 8: Análise Temporal de artigos
 Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

5.2. Análise de Artigos por Fonte de Publicação:

Além da distribuição das publicações através do tempo, é interessante perceber onde estão sendo publicadas as informações.

Após levantamento dos periódicos onde foram publicados todos os artigos encontrados através da busca, verificou-se um universo de 160 periódicos, sendo que mais da metade destes tinha no máximo dois artigos científicos. Desta forma, decidiu-se destacar através da figura a seguir os 15 periódicos de maior relevância por possuírem a maior parte dos artigos relacionados ao tema.

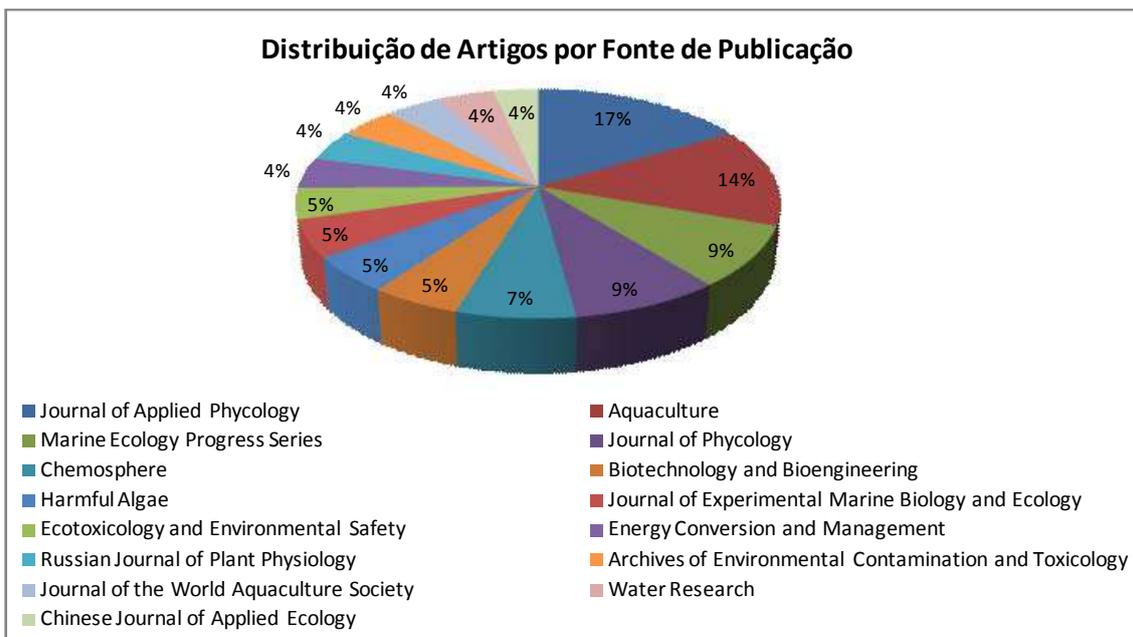


Figura 9: Distribuição de artigos por fonte de publicação
 Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

Pode-se observar que o periódico de maior destaque foi o “Journal of Applied Phycology”, seguido do “Aquaculture”, do “Marine Ecology Progress Series” e da “Journal of Phycology”.

5.3. Análise de Artigos por Região/País de Origem:

Outro fator importante a ser observado para um nível prospectivo é a distribuição das publicações pelo mundo, que permite entender a importância dada ao tema e o alcance do mesmo.

Neste sentido, mapearam-se os países de onde se originaram as publicações estudadas e, em princípio, para facilitar a compreensão, estes foram agrupados por continente. O resultado pode ser analisado através da figura 10.

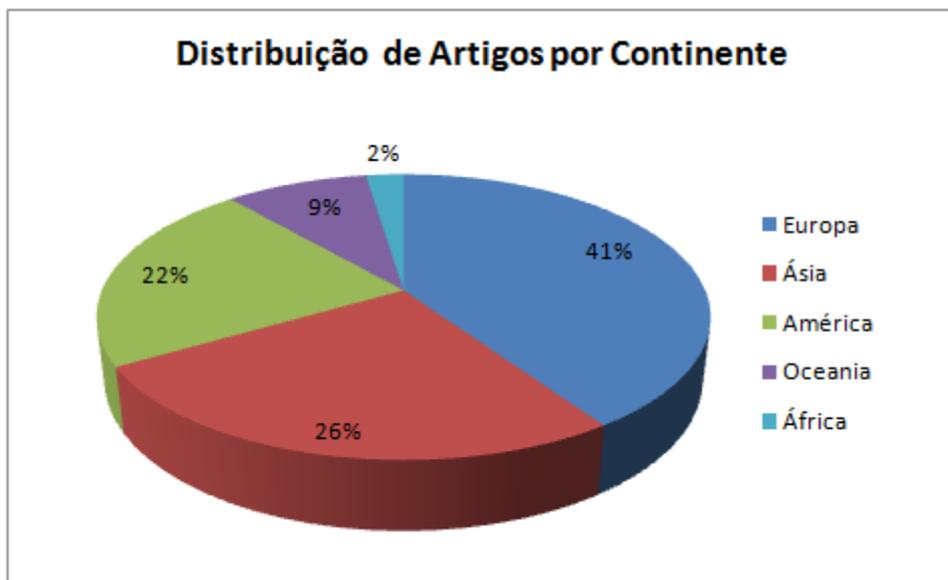


Figura 10: Distribuição de artigos por continente
Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

Como é possível observar, o continente que obteve maior destaque no número de publicações foi a Europa com 41%, seguido da Ásia, com 26%. A América também obteve destaque, com 22 %, um pouco abaixo da Ásia.

Desmembrando o gráfico acima, outros foram gerados, agora com o objetivo de estudar, em cada região, o país de maior destaque.

A figura 11 mostra a distribuição de artigos por países da Europa.

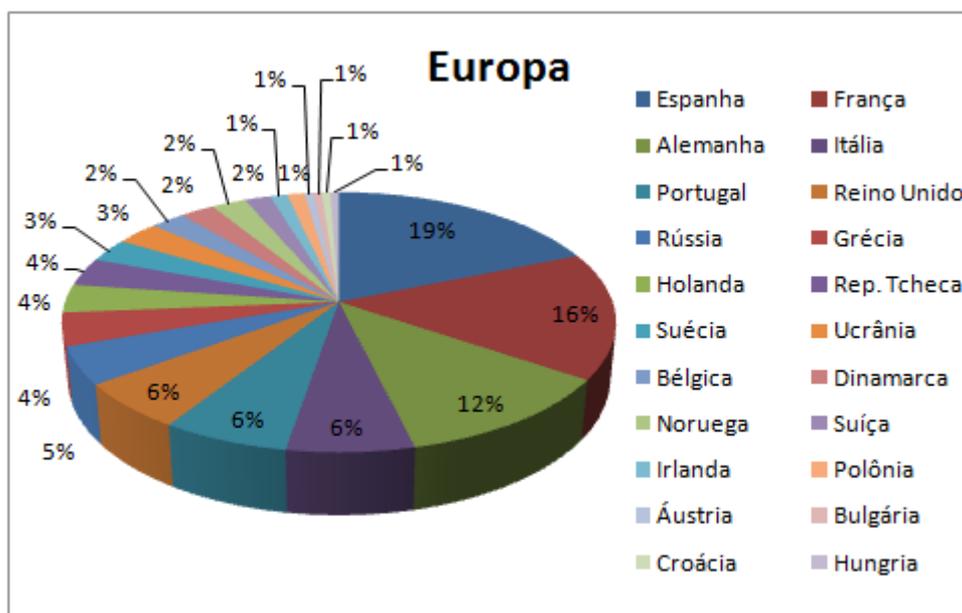


Figura 11: Distribuição de artigos por país – Europa
 Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

Observa-se que dentro do continente de maior destaque, a Europa, o país principal em quantidade de publicações foi a Espanha, com 19%, seguido pelos 16% da França e dos 12% da Alemanha.

A figura 12 mostra a distribuição de artigos por países da Ásia.

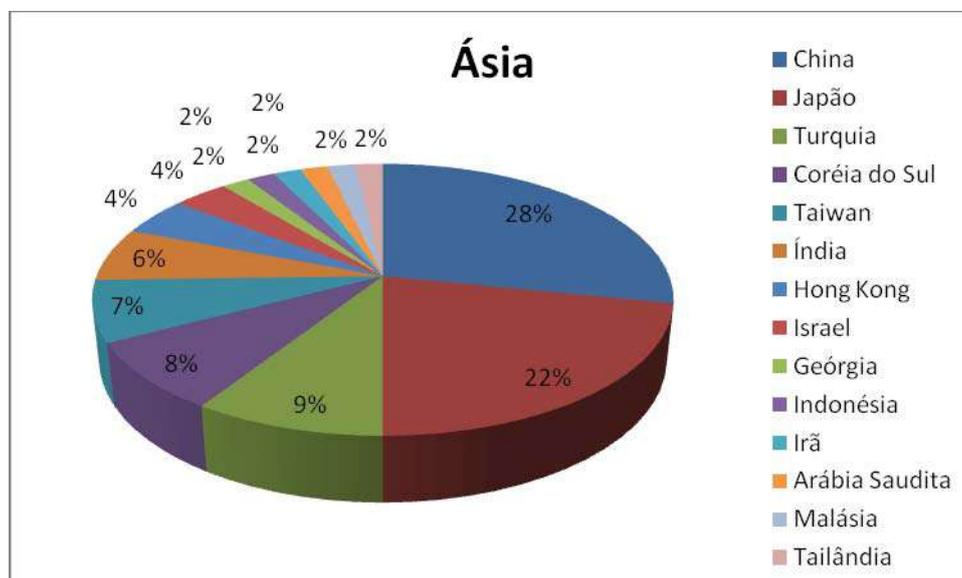


Figura 12: Distribuição de artigos por país – Ásia
 Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

O país de maior destaque neste caso foi a China, que contribuiu com 28% dos artigos do continente asiático, além do Japão, com 22%.

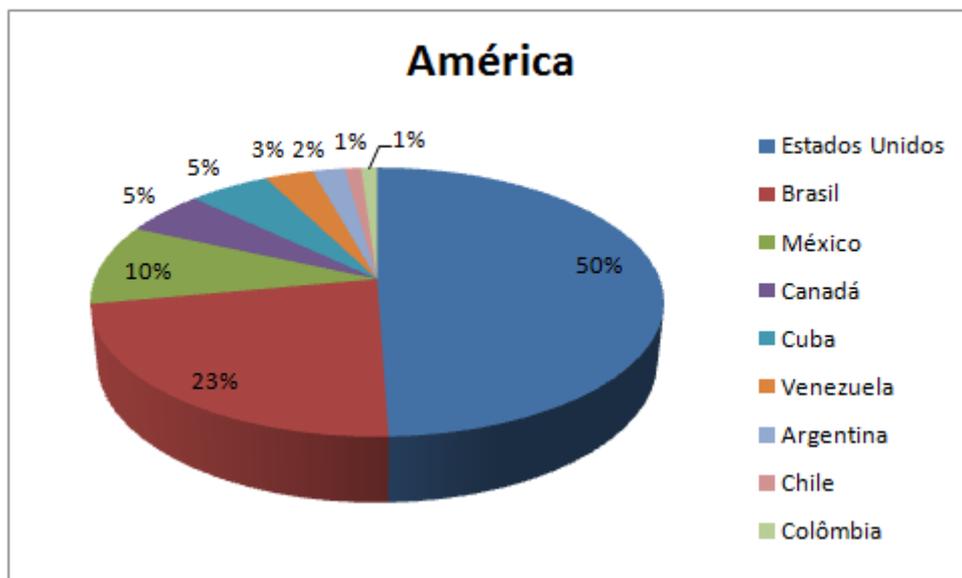


Figura 13: Distribuição de publicações por artigos – América
 Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

No caso da distribuição de artigos na América, mostrado na figura 13, as principais nações foram o Estados Unidos e o Brasil, com 50% e 23%, respectivamente.

Nas figuras 14 e 15, tem-se os continentes de menor projeção em quantidade de publicações, a saber Oceania e África, respectivamente. Para o primeiro, o maior contribuinte foi a Austrália, com 84%. Para o outro, a Nigéria, com 50%.

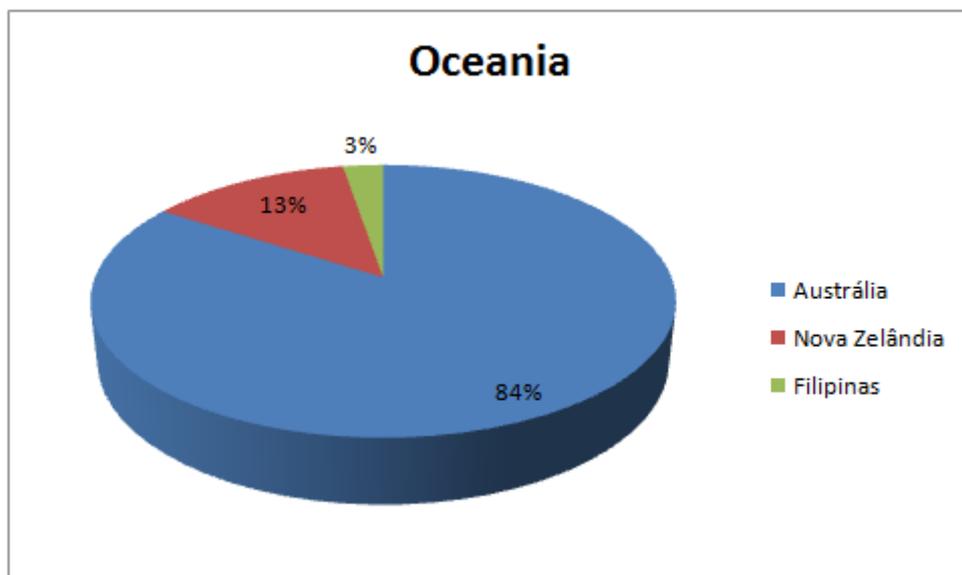


Figura 14: Distribuição de artigos por país – Oceania
 Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

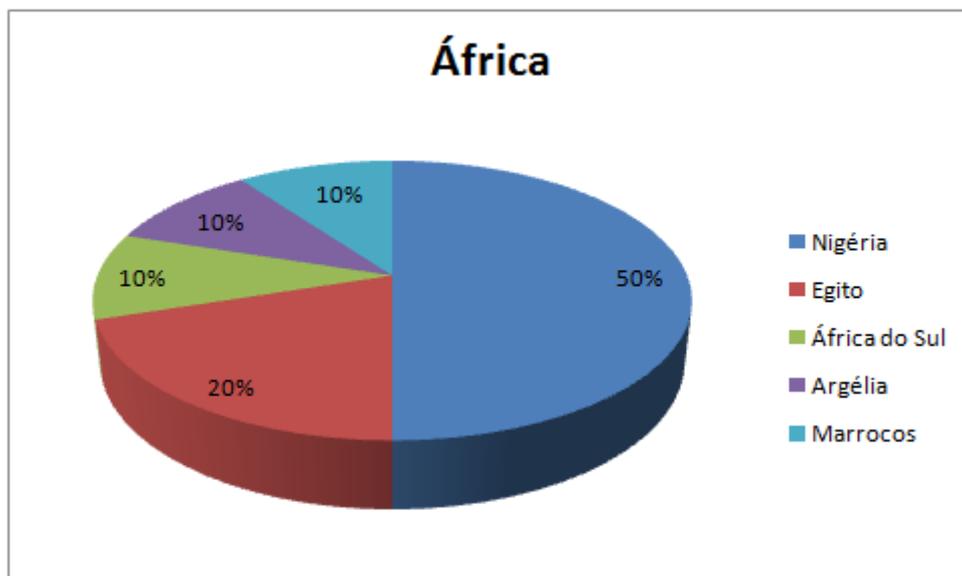


Figura 15: Distribuição de artigos por país – África
 Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

5.4. Distribuição de Artigos x Microalgas:

Dentre os 431 artigos encontrados segundo a metodologia descrita anteriormente, para a análise deste nível de aprofundamento, comumente chamada de “análise micro”, foram selecionados os 109 mais recentes (todos os artigos publicados entre os anos de 2008 e 2009). Após um refinamento para eliminação daqueles artigos com pouca relevância com relação ao assunto, teve-se um total de 81 publicações.

Neste tópico, foi feita uma análise quanto aos gêneros de microalgas mais citados em artigos, isto é, as microalgas mais estudadas. Consideraram-se, para tal, somente aqueles artigos que continham a citação clara do gênero da microalga, desconsiderando-se os demais. A figura 16 mostra o resultado desse mapeamento:

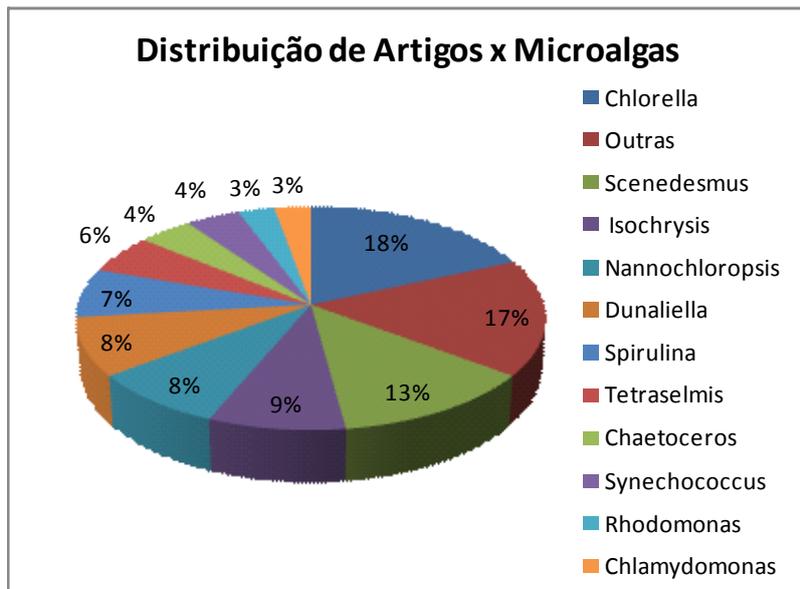


Figura 16: Distribuição de artigos por gênero de microalga
 Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

É possível observar que, dentre os gêneros estudados, com 18%, o maior destaque foi para *Chlorella*, alga verde unicelular da família *Chlorophyceae*, com grande eficiência fotossintética e, portanto, importante fonte de alimento e energia. Em segundo lugar, com 13%, está o gênero *Scenedesmus*, também da família *Chlorophyceae*, cuja aplicação mais comum tem sido na aquicultura, para a alimentação direta ou indireta de algumas espécies de peixes, moluscos, crustáceos e de diversos organismos forrageiros de interesse econômico.



Figura 17: Gêneros de microalgas em destaque
 Fonte: www.io.uwinnipeg.ca

Com 17%, têm-se aquelas microalgas que foram classificadas como “outras”. Trata-se do agrupamento daquelas microalgas com menos destaque e apenas uma citação. A listagem destas microalgas pode ser observada na tabela 5.

Tabela 5: Microalgas de menor relevância a partir da análise de publicações

Microalgas	Número de Artigos
Chaetoceros	1
Aphanothece	1
Skeletonema	1
Nannochloropsis	1
Neochloris	1
Corallina	1
Phaeodactylum	1
Haematococcus	1
Navicula	1
Nephroselmis	1
Cryptomonas	1
Oedocladium	1

Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

5.5. Distribuição de artigos *versus* área de atuação:

A figura 18 busca agrupar os artigos analisados de acordo com o setor de atuação para o qual o estudo foi direcionado.

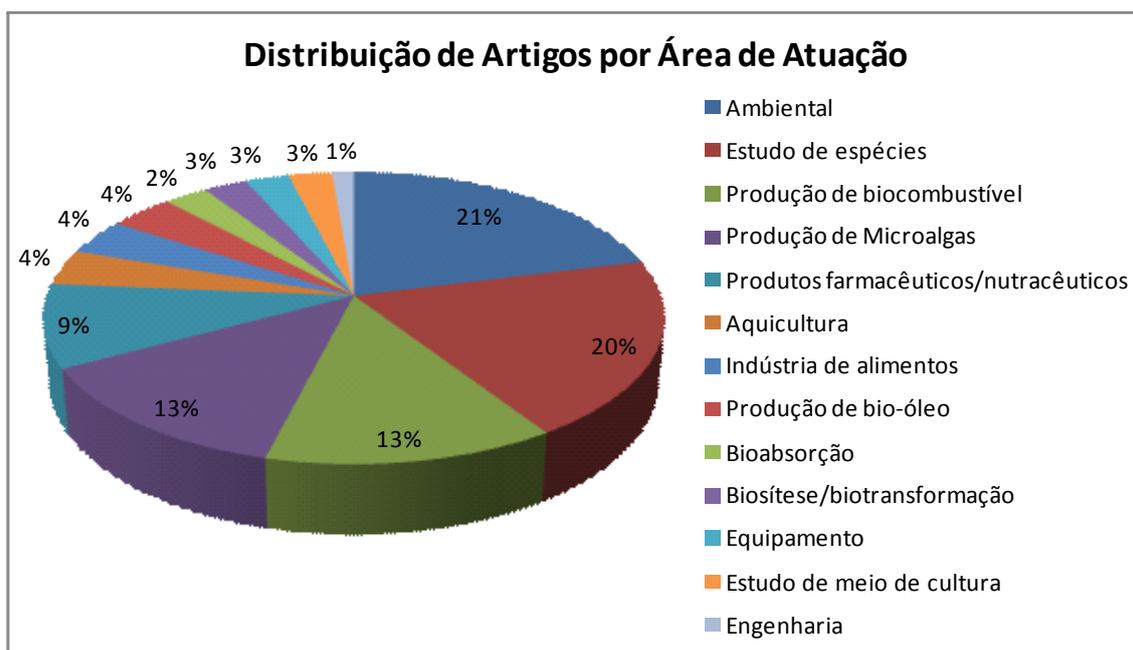


Figura 18: Distribuição de artigos por área de atuação

Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

Observa-se que o maior destaque foi para o setor classificado como “Ambiental” (21%). Neste grupo, foram reunidos os artigos que abordavam tratamento de água, tratamento de efluentes, impacto ambiental (como toxicidade de microalgas e o fenômeno da maré vermelha) e captura de CO₂ pelas microalgas. Em segundo lugar,

tem-se o setor classificado como “Estudo de espécies”, com 20%, grupo no qual se encontram estudos de mapeamento genético de microalgas, efeitos de certos elementos químicos e herbicidas sobre o crescimento microalgal, estudo cinético de algumas espécies e avaliação de composição de algumas microalgas. Em terceiro lugar, temos “Produção de Biomassa” e “Produção de Biocombustíveis” com 13% cada.

5.6. Distribuição de artigos x bioprodutos:

A figura 19 mostra a distribuição de artigos com relação aos bioprodutos oriundos das microalgas. Mais uma vez, nem todos os artigos continham citações do bioproduto, até mesmo pelo fato de que, alguns tratavam de estudos ambientais ou estudos de espécies e, portanto, não focavam a obtenção de um bioproduto. Dos 81 artigos, 38 foram excluídos em função disto.

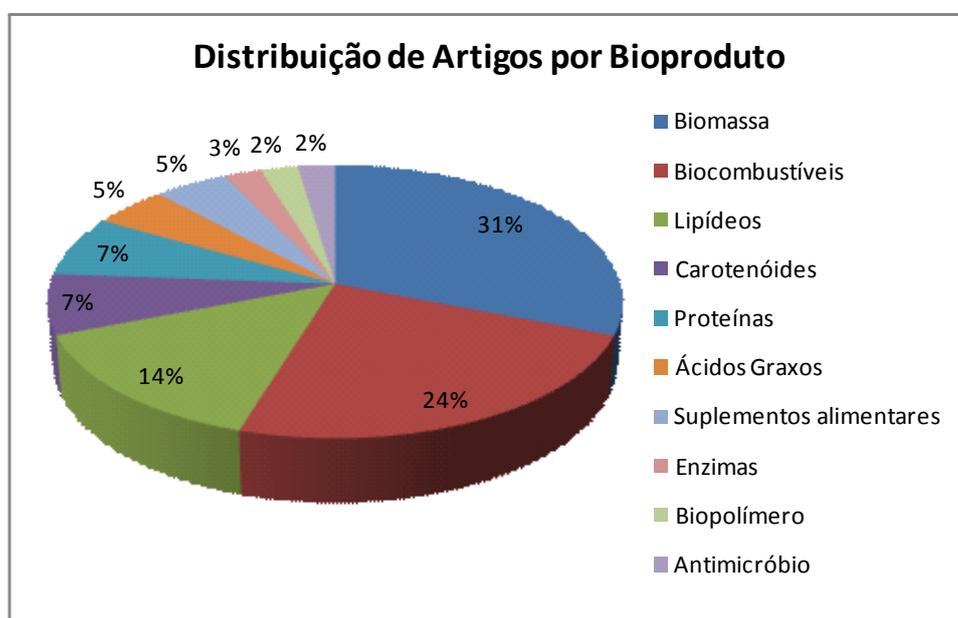


Figura 19: Distribuição de artigos por bioproduto
 Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

Em primeiro lugar, tem-se a produção de biomassa (31%), isto é, a multiplicação de microalgas para diversos fins. Em seguida, tem-se a produção de biocombustíveis (24%), dentre eles biodiesel, bioetanol e metanol. A produção de biocombustíveis a partir de óleo de microalgas apresenta-se como uma solução ideal numa altura em que se deseja encontrar alternativas ao petróleo. A microalga poderá ser uma das soluções ideais, pois faz duas coisas importantes: seqüestra o CO₂, necessário para crescer, e no final produz ainda o óleo para biodiesel.

6. Empresas de microalgas no mundo:

O cultivo de microalgas, para obtenção de biomassa e de seus produtos de síntese, trata-se de uma atividade industrial estabelecida em escala comercial em alguns países e a produção está a cargo de grandes empresas.

A partir das informações contidas nos artigos científicos encontrados através da metodologia descrita no item anterior, foi possível dar início a identificação de empresas no mundo que indicavam a realização de trabalhos com microalgas, seja na produção de bioprodutos, e/ou biocombustíveis e/ou na captura de CO₂. O total foi de 60 empresas encontradas. Cabe ressaltar que essa análise não é exaustiva, pois se procurou apontar as empresas que apresentassem, de maneira pública, indicações de que estariam envolvidas com a questão das microalgas.

A figura a seguir mostra o *ranking* das empresas com relação à classificação que foi realizada de acordo com as atividades das empresas.

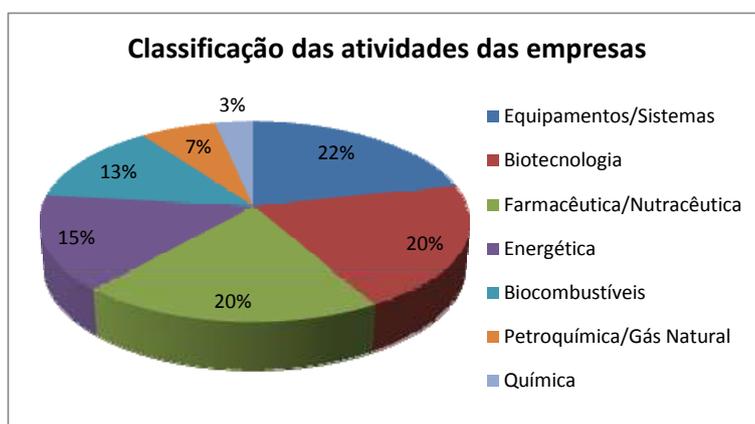


Figura 20: Classificação das atividades das empresas

Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

Em primeiro lugar com 22%, ficaram as empresas classificadas como de “Equipamentos e Sistemas”. São aquelas que desenvolvem tecnologia em equipamentos (biorreatores e centrífugas, por exemplo) e sistemas de produção de biomassa em geral e/ou sistemas de captura de CO₂.

Já em segundo lugar com 20%, ficaram empatadas as empresas de Biotecnologia, que foram classificadas assim por desenvolverem tecnologias sustentáveis que serão empregadas em outras empresas, para a produção de biocombustíveis, captura de CO₂ ou tratamento de águas; e as empresas classificadas como Farmacêuticas e Nutracêuticas, que são as produtoras de fármacos e suplementos alimentares.

Em terceiro lugar com 15%, estão as empresas classificadas como de geração de energia. Neste grupo estão englobadas as empresas de geração de energia solar, energia nuclear e empresas desenvolvedoras de pesquisa em fontes de energia renovável.

Com 13% e em quarto lugar, estão as empresas classificadas como de biocombustíveis. São as empresas que desenvolvem pesquisa e efetivamente já produzem biocombustíveis a partir de fontes renováveis.

Em seguida com 7%, estão as empresas do ramo petrolífero e de gás natural. São empresas do ramo energético que atuam exclusivamente, ou em grande parte de suas atividades, no ramo de exploração e produção de petróleo e gás natural.

Finalmente, em último lugar com 3%, estão as empresas classificadas como da Indústria Química. São aquelas que possuem uma larga gama de produtos químicos que cruzam diversos ramos de aplicação.

6.1. Análise das empresas por região:

Para melhor organização das informações, essas empresas foram classificadas por regiões: América do Norte, Europa, Ásia, América do Sul e Oceania. Cabe salientar que não foi identificada, através das buscas realizadas, empresas de origem do continente Africano.

Na figura 21, pode-se observar a distribuição das empresas localizadas no mundo, de acordo com a sua região de origem:

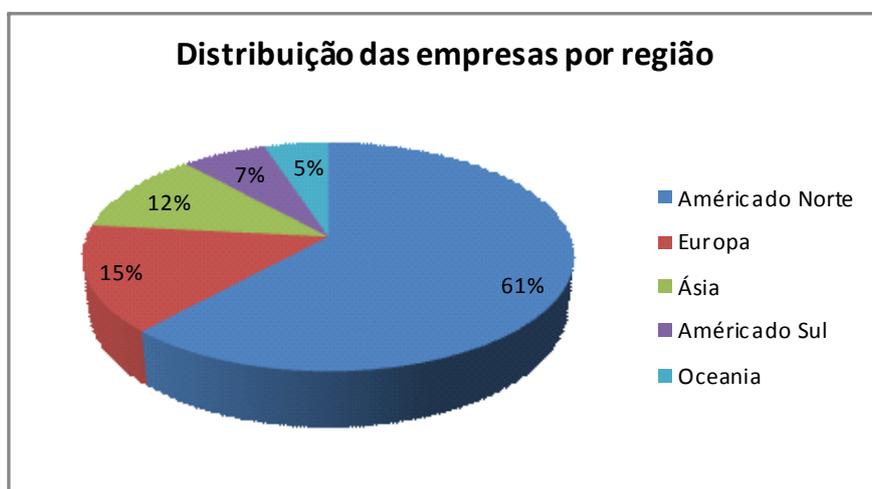


Figura 21: Distribuição das empresas por região
Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

6.1.1. América do Norte:

No caso da América do Norte, com 37 empresas, os Estados Unidos merecem destaque, com empresas de todos os ramos de atividades. A tabela a seguir mostra o grupo de empresas localizadas na América do Norte e seus países de origem:

Tabela 6: Empresas da América do Norte

Empresas - América do Norte			
Canadá			
Menova Energy Inc. 	Trident Exploration Corp. 	Ocean Nutrition 	
Estados Unidos			
A2BE Carbon Capture algae@work™ 	Aquatic Energy LLC 	Aurora Biofuels 	Bionavitas 
BodegaAlgae 	CEHMM 	Celanese / Nutrinova 	Chevron 
Circle Biodiesel & Ethanol Corporation 	Community Fuels 	Cyanotech 	Diversified Energy 
Earthrise Nutricionals 	General Atomics 	Global Green Solutions 	Green Star 
GreenFuel 	GreenShift 	HR BioPetroleum 	Imperium Renewables Inc 
Inventure Chemical 	LiveFuels Inc 	Martek Biosciences 	Mera Pharmaceuticals 
Origin Oil 	PetroAlgae 	PetroSun 	PhycoBiologics 
Solazyme Inc 	Solena Group 	Solix BioFuels 	Texas Clean Fuels 
Valcent Products 		XL Renewables 	

Fonte: Elaboração Própria

Uma breve descrição de cada empresa dessa região é feita a seguir, visando mostrar a atividade principal de cada uma delas e sua ligação com a produção de microalgas:

- ***Menova Energy Inc.:***

Empresa especializada em fornecer soluções inovadoras de energia solar para projetos de aumento de geração de energia em plantas industriais, projetos de construção civil integrada e plantas de tratamento de águas residuais e dessalinização. Formou, no ano de 2007, um consórcio com a empresa “Trident Exploration Corporation” para a utilização de microalgas com o propósito de captar CO₂ oriundo da queima de petróleo.

- ***Ocean Nutrition:***

Empresa canadense, criada em 1997, produtora de suplementos alimentares. Seu principal produto é o Ômega-3 EPA/DHA, que são as formas mais potentes do ômega-3, extraído de óleo de peixe para a fortificação de alimentos e bebidas.

- ***Trident Exploration Corp.:***

Empresa de desenvolvimento e exploração de gás natural, focada na produção de metano de carvão (CBM). Formou, no ano de 2007, um consórcio com a empresa “Menova Energy Inc”, para utilização de microalgas com o propósito de captar CO₂ de processos oriundos da queima do petróleo.

- ***A2BE Carbon Capture:***

Empresa que desenvolve tecnologia para produção de combustível e alimentos a partir de CO₂ utilizando fotossíntese e cultivo de algas. O cultivo é baseado na captura de CO₂ e em tecnologias de reciclagem com a gaseificação da biomassa em uma instalação integrada de produção de combustível renovável. O protótipo vai produzir biodiesel a partir de algas e álcool combustível a partir da biomassa utilizando a gaseificação. Serão empregadas como matérias-primas de biomassa: resíduos de madeira e resíduos sólidos municipais, incluindo resíduos de alga processada. O CO₂ produzido pela gaseificação de biomassa será utilizado para cultivo das algas nas máquinas de captura e reciclo de carbono (CC&R).



Figura 22: Fotobiorreator em escala experimental

Fonte: www.algaeatwork.com

- ***Aquatic Energy LLC:***

Empresa que visa a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de produção de biocombustíveis a partir de microalgas. Atualmente, investe na construção e operação de uma fazenda de microalgas de 30 acres na cidade de Louisiana. Desta forma, terá facilidade de mostrar a operação rentável da tecnologia desenvolvida e modelo de negócio.

- ***Aurora Biofuels:***

A empresa foi fundada por um grupo de estudantes da Universidade da Califórnia, em Berkeley, em 2006, e utiliza alga geneticamente modificada para produzir biodiesel. Atualmente, estão desenvolvendo uma planta-piloto que, de acordo com a empresa, vai mostrar a capacidade da empresa para produzir biocombustível em grande escala.

- ***Bionavitas:***

Empresa desenvolvedora de tecnologias voltadas ao cultivo de microalgas para produção de bioprodutos. Desenvolveu sistema para a produção de grandes

volumes de algas usando bioreatores com uma tecnologia que ultrapassa a “parede de sombra” (shade wall), na qual a alga começa a bloquear a luz solar e reduz a sua taxa de reprodução. O foco da empresa é, além de produzir biocombustíveis e outros bioprodutos a partir do óleo da microalga, também investe no tratamento de efluentes.

- ***BodegaAlgae:***

É uma empresa que desenvolve fotobioreatores para o uso em sistemas de produção de biocombustíveis a partir da biomassa de algas. De acordo com a empresa, a sua tecnologia torna o cultivo interno e de pequena escala de algas mais rentável do que os métodos laboratoriais comuns, que utilizam freqüentemente luz elétrica de alta potência e cara.

- ***CEHMM (Center of Excellence for Hazardous Materials Management) :***

É uma organização, fundada em 2004, dedicada a reduzir o impacto de materiais perigosos ao meio ambiente. Possui um projeto de pesquisa e desenvolvimento que investiga processos de produção, propagação, coleta e extração de óleo de algas de água salgada e doce. Esse óleo das algas é para ser usado como matéria-prima para a produção de biodiesel.

- ***Celanese:***

A Celanese é uma empresa de produtos químicos intermediários, principalmente de acetilprodutos. Possui um segmento chamado “Nutrinova” no ramo de alimentos funcionais, que faz uso das microalgas para produzir ômega-3/DHA.

- ***Chevron:***

A Chevron, empresa do ramo energético especialmente petrolífero, e a empresa Weyerhaeuser Co., uma das maiores empresas de produtos florestais do mundo, formaram uma “joint venture” (50-50), chamada “Catchlight Energy LLC”, para desenvolver biocombustíveis renováveis a partir de fontes não alimentares, inclusive microalgas. Possui projetos de pesquisa e desenvolvimento para obtenção de combustíveis de jatos e de outros transportes a partir de algas.

- ***Circle Biodiesel & Ethanol Corporation:***

É uma companhia desenvolvedora de tecnologia e equipamentos que fornece sistemas para empresas produtoras de biocombustíveis (etanol e biodiesel). A empresa está envolvida no desenvolvimento e fabricação de sistemas de recolhimento de microalgas para a produção de biodiesel, etanol e metano (biogás).

- ***Community Fuels:***

Empresa privada localizada na Califórnia, Estados Unidos, especializada em processamento de matérias-primas alternativas para produção de biocombustíveis, inclusive microalgas. A empresa construiu uma das maiores plantas de biodiesel na Califórnia que utiliza tecnologia de processos própria que maximiza a qualidade, flexibilidade e eficiência energética na produção de biodiesel.

- ***Cyanotech:***

Empresa especializada em tecnologia de microalgas. Produz suplementos nutricionais, nutracêuticos e cosméticos.

- ***Diversified Energy:***

Empresa privada especializada em desenvolver tecnologias de energia renovável. Desenvolve um sistema de produção de biomassa de alga chamado Simgae™. Esse sistema é uma solução baseada na agricultura para a produção de alga em larga escala que tem os benefícios tanto do sistema aberto quanto do fechado.

- ***Earthrise Nutritionals:***

A empresa produz e comercializa suplementos alimentares a partir de microalgas. Possui produtos a base de Spirulina e Chlorella, com função antioxidante e altos níveis de zinco, vitamina C e carotenóides. A “fazenda” de microalgas da empresa está localizada no sudeste da Califórnia, Estados Unidos, uma região remota, onde a água do Rio Colorado rica em minerais é bombeada até os tanques de crescimento.



Figura 23: Fazenda de microalgas – Earthrise Nutritionals (Califórnia, Estados Unidos)

Fonte: www.earthrise.com

- ***General Atomics:***

Empresa de energia nuclear que, através de parceria com outras empresas, está em fase de pesquisa para desenvolver biocombustível a partir de microalgas. Possui colaboração do instituto sem fins lucrativos “CEHMM”, que está construindo tanques abertos para cultivo em água salgada de microalgas. GA e CEHMM estão trabalhando juntas para desenvolver melhores processos para cultivo e extração de óleo das microalgas.

- ***Global Green Solutions:***

A empresa, com operações na América do Norte, Europa e África do Sul, desenvolve e implementa soluções de tecnologia ecológica para geração de energia renovável. Fundada em 2006, desenvolveu duas tecnologias inovadoras: “Greensteam”, um sistema de combustão de alta eficiência, que gera vapor industrial e energia elétrica, a partir de resíduos de biomassa; e “Vertigro Algal Technologies”, um processo para produção de biocombustíveis a partir de microalgas através de um biorreator vertical de alta densidade, originado de uma *joint venture* com a empresa “Valcent Products”.

- ***Green Star:***

Green Star Products, Inc. é uma empresa pioneira em pesquisas de recursos energéticos alternativos. Atualmente, está trabalhando nas primeiras instalações de produção em grande escala de microalgas. Além do seu foco principal, biocombustíveis, a empresa está interessada na produção de suplemento alimentar para gado a partir de biomassa de microalgas.

- ***GreenFuel:***

Empresa desenvolvedora de tecnologias para serem utilizadas por indústrias com instalações de gás, carvão, combustão de petróleo e outras. “GreenFuel” afirma ter um leque de tecnologias para reciclar lucrativamente CO₂, que pode ser convertido em combustíveis para transporte, suplementos alimentares ou a biomassa reutilizada para geração de energia. Além disso, a empresa diz que as instalações industriais não necessitam de modificações internas para hospedar uma “fazenda” de microalgas, não requer terras férteis e água potável.

- ***GreenShift:***

A empresa desenvolve e comercializa tecnologias limpas de utilização eficiente dos recursos naturais. Possui um sistema patenteado que utiliza microalgas em estufas para consumir emissões de gás provenientes de combustão de combustíveis fósseis. As algas utilizam água e o CO₂ disponível na exaustão e liberam oxigênio. Assim que a alga cresce e chega à maturidade, elas sedimentam para o fundo do biorreator e são recolhidas para serem convertidas em etanol e biodiesel.

- ***HR BioPetroleum:***

É uma companhia de tecnologias renováveis, focada em utilizar microalgas para produzir biocombustíveis e/ou outros produtos de valor, e simultaneamente reduzir as emissões industriais de CO₂. Em 2007, formou uma *joint venture* com a Shell, chamada Cellana, uma instalação piloto no Havaí para cultivar alga marinha e produzir óleo vegetal que vai ser convertido em biocombustível. O objetivo é cultivar as microalgas em tanques abertos com água do mar e utilizar linhagens de algas nativas do Havaí.

- ***Imperium Renewables Inc:***

Indústria de refino de biodiesel e desenvolvedora de tecnologia. A empresa foi fundada como “Seattle Biodiesel LLC” em 2004, para comercializar novos projetos para o refino de biodiesel. Possui tecnologia empregada na produção de biodiesel a partir de microalgas, em parceria com a “Solazyme Inc”.

- ***Inventure Chemical:***

A empresa de tecnologias sustentáveis. Está desenvolvendo e comercializando etanol de segunda geração e tecnologia de biodiesel utilizando diferentes fontes, incluindo algas. Sua especialização inclui tanto o processo de conversão quanto o design e construção da planta. Atualmente, opera um protótipo de fábrica de produção de biocombustíveis, onde atualmente se produz biodiesel e etanol de algas.

- ***LiveFuels Inc:***

Foi fundada em 2006 com o objetivo de desenvolver microalgas eficientes e em larga escala para produção de biocombustíveis. Hoje, a empresa opera plantas-piloto nos Estados Unidos para desenvolver um sistema próprio de geração de biocombustíveis a partir de microalgas de forma viável e sustentável.

- ***Martek Biosciences Co.:***

É uma companhia de biotecnologia, que investe no desenvolvimento de produtos nutricionais a partir de microalgas, tais como: astaxantina e DHA.

- ***Mera Pharmaceuticals:***

É uma empresa de biotecnologia marinha, que investe em tecnologia de fotobiorreatores e em cultura de microalgas para a produção de biocombustíveis e nutracêuticos. Fabrica um suplemento alimentar a base de astaxantina natural de microalgas da espécie *Haematococcus pluvialis* que tem função anti-oxidante e anti-inflamatória. Além disso, produz sal marinho originado das águas do Havaí, onde a água é aquecida pelo sol e evaporada naturalmente em um sistema fechado de secagem.

- **Origin Oil:**

OriginOil é uma empresa de tecnologia que está desenvolvendo sistemas próprios de cultivo de microalgas para produzir biocombustíveis. Este sistema vai desde o cultivo até a extração do óleo.



Figura 24: Biorreator “Helix” – OriginOil

Fonte: www.originoil.com

- **PetroAlgae:**

Fundada em 2006, PetroAlgae é uma companhia de energia renovável. Utiliza espécies naturais de algas desenvolvidas pela “Arizona State University” e criadas seletivamente para, em rápido crescimento, proporcionar um alto rendimento de óleo. A empresa foca, além da geração de biodiesel, na captura de CO₂ da atmosfera.



Figura 25: Sistema de biorreator modular para cultivo de microalgas

Fonte: PetroAlgae Corporate Overview, 2009.

- **PetroSun:**

A PetroSun é uma empresa de energia especializada na descoberta e desenvolvimento de combustíveis fósseis e recursos de energias sustentáveis.

Suas operações incluem exploração, desenvolvimento e produção de petróleo e gás e produção de algas para biocombustíveis alternativos. Extensa pesquisa foi conduzida para determinar a utilização de microalgas como fonte de energia, com sistemas que estão sendo desenvolvidos para o biodiesel, etanol e bioplásticos.

- ***PhycoBiologics:***

Empresa especializada em desenvolver microalgas transgênicas para produção de ração animal, biorremediação, monitoramento ambiental e biopesticidas.

- ***Solazyme Inc:***

Indústria de biotecnologia que existe há 5 anos e utiliza biologia sintética e engenharia genética para melhoramento de linhagens de algas para maior rendimento. É uma das únicas empresas a lidar com a “Chevron” e com a produtora de biodiesel “Imperium Renewables”, que converte a matéria-prima (óleo da microalga) usando tecnologia própria.

- ***Solena Group:***

É uma companhia de produção de energia que utiliza sua própria tecnologia em reatores de plasma patenteada para converter todas as formas de biomassa em energia renovável. O sistema da “Solena” converte qualquer tipo de matéria orgânica, inclusive rejeitos, em energia. Trabalhando em colaboração com a empresa espanhola “Bio Fuel Systems S.A.”, “Solena” produz microalgas utilizando emissões de CO₂, com o objetivo das algas serem gaseificadas para a produção de eletricidade.

- ***Solix Biofuels:***

Indústria de produção de biodiesel a partir de microalgas. “Solix Biofuels” tem origem do Programa de Espécies Aquáticas do Departamento de Energia dos Estados Unidos, iniciado em 1978, para explorar meios de produção de biodiesel a partir de microalgas. Tecnologia que envolve fotobioreatores plásticos que controlam variações na iluminação, química e temperatura.



Figura 26: AGS™ Technology

Fonte: www.solixbiofuels.com

- ***Texas Clean Fuels:***

Fundada em 2006, a empresa desenvolve sistemas baseados no conceito de "CO₂-Alga-biocombustível". Vem oferecendo agora sua primeira geração de fotobiorreatores para produtores de microalgas.

- ***Valcent Products:***

A empresa é especializada em soluções de crescimento de plantas e em tecnologias inovadoras e limpas. A tecnologia VAT (*Vertical Algal Technology*) foi desenvolvida pela "Valcent Products" sendo como ideal para as adjacências de refinarias, pois através da absorção de CO₂ pelas microalgas, é possível uma redução significativa de gases do efeito-estufa. Essa redução representa valor na forma de Créditos de Carbono e o óleo da microalga pode gerar biocombustível.



Figura 27: Bioreator vertical

Fonte: www.valcent.net

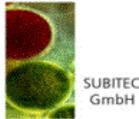
- ***XL Renewables:***

É uma empresa de energia renovável focada na produção em larga escala de biomassa de microalga e o desenvolvimento de projetos de biorrefinarias integradas. No início de 2007, a empresa estabeleceu seu Centro de Desenvolvimento de Algas (ADC), onde está sendo implementado um mecanismo para testar design de produção e operação de sistemas, desenvolvimento de variedades de algas e otimização do sistema.

6.1.2. Europa:

Na Europa, a maioria das empresas possui ramo de atividade voltado à biotecnologia focada no desenvolvimento de sistemas de produção de biomassa de microalgas para diversos fins. Observa-se que o foco maior da produção de microalgas estaria para a extração de substâncias voltadas a área farmacêutica ou nutracêutica, apesar das empresas Shell, AlgaFuel e AlgaeLink estarem desenvolvendo sistemas para a produção de biocombustíveis. A tabela a seguir mostra o grupo de empresas localizadas na Europa e seus países de origem:

Tabela 7: Empresas da Europa

Empresas – Europa		
<i>Alemanha</i>		
Cognis 	IGV 	SUBITEC GmbH 
<i>Portugal</i>		
Necton 	AlgaFuel 	
<i>Áustria</i>		<i>Espanha</i>
Panmol / Madaus 		PharmaMar 
<i>Holanda</i>		
AlgaeLink 	Royal Dutch Shell 	

Fonte: Elaboração Própria

Uma breve descrição de cada empresa dessa região é feita a seguir, visando mostrar a atividade principal de cada uma delas e sua ligação com a produção de microalgas:

- **Algafuel:**

A empresa dedica-se ao desenvolvimento e a implementação de projetos de bioengenharia para a produção industrial de microalgas, dividida em fases ao longo do tempo (com scale up's progressivos), e que possibilitem processos industriais de sequestro de CO₂ e/ou de produção de biomassa com diversos aproveitamentos, nomeadamente fonte de matéria-prima para a fabricação de biocombustíveis.

- **Cognis:**

A Cognis uma empresa com sede na Alemanha e é fabricante de insumos para diversos setores, como: alimentício, farmacêutico, produtos de higiene pessoal e produtos de limpeza. Utiliza as microalgas para produzir aditivos alimentares, como carotenóides.

- **IGV (Institut für Getreideverarbeitung):**

O Instituto foi criado em 1960 como um instituto de pesquisa prático-orientada para moendas, fermentos e indústria de alimentos. Atualmente, desenvolve fotobiorreatores, conceitos de separação de biomassa, tecnologias de secagem e extração de óleo das células, além de triagem de substâncias ativas relevantes para aplicações farmacêuticas e de cosméticos, caracterização dessas substâncias e desenvolvimento de processos para o isolamento das mesmas.



Figura 28: Fotobioreator PBR - 200/500

Fonte: www.igv-gmbh.de

- ***SUBITEC GmbH:***

É uma empresa de biotecnologia que desenvolve a produção fotoautotrófica da biomassa celular de microalgas. Os principais empregos desta biomassa são: ácidos graxos, proteínas, vitaminas, carotenóides e pigmentos, que vêm como matéria-prima na indústria química, farmacêutica e alimentar. Além disso, desenvolve processos de circuito integrado para cultivo de microalgas com captura de CO₂ de processos industriais. O sistema fechado permite a recirculação de água e nutrientes e vai permitir a recuperação integral da biomassa de algas.

- ***Panmol/Madaus:***

Empresa especializada em produtos farmacêuticos. O objetivo de todos os produtos da Madaus é tratar as causas da doença, não apenas os sintomas, mas prevenir a ocorrência de doenças ou, pelo menos, de se tornar crônica. Faz uso da microalga do gênero *Spirulina* para produzir vitamina B12, que proporciona uma melhora na resposta imunológica do organismo.

- ***Necton S.A:***

Empresa fundada em 1997 que desenvolve atividades na área de biotecnologia marinha, tendo se especializado na produção de sal marinho. Deu origem, em janeiro de 2008, a *Algafuel*, que se dedica especificamente à industrialização de biomassa de microalgas para a produção de biocombustível.

- ***PharmaMar:***

PharmaMar é uma companhia biofarmacêutica, fundada em 1986, especializada na pesquisa e desenvolvimento de novas moléculas derivadas de organismos marinhos para o tratamento oncológico.

- **AlgaeLink:**

Empresa dedicada a projetos de equipamentos (fotobiorreatores) para o crescimento de microalgas para produção de biodiesel e de *commodities* com tecnologia patenteada.

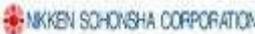
- **Royal Dutch Shell:**

A Royal Dutch Shell é uma indústria petroquímica que formou uma *joint venture* com a HR BioPetroleum - chamada Cellana- uma instalação piloto no Havaí para cultivar alga marinha e produzir óleo vegetal que vai ser convertido em biocombustível. O objetivo é cultivar as microalgas em tanques abertos com água do mar e utilizar linhagens de algas nativas do Havaí.

6.1.3. Ásia:

Na Ásia foram identificadas 7 empresas, sendo a maioria delas voltada para o mercado de suplementos alimentares. A tabela a seguir mostra o grupo de empresas localizadas na Ásia e seus países de origem:

Tabela 8: Empresas da Ásia

Empresas – Ásia		
<i>Índia</i>		
Enhanced Biofuels & Technologies 	Parry Nutraceuticals 	
<i>Israel</i>		
Algatech 	Nature Beta Technologies Chlostanin 	SeamBiotic 
<i>Japão</i>		
Fuji Chemical Industry Co  FUJI CHEMICAL INDUSTRY CO., LTD.	Nikken Sohonsa Co.  NIKKEN SOHONSHA CORPORATION	

Fonte: Elaboração Própria

Uma breve descrição de cada empresa dessa região é feita a seguir, visando mostrar a atividade principal de cada uma delas e sua ligação com a produção de microalgas:

- **Enhanced Biofuels & Technologies:**

A empresa desenvolve várias tecnologias de produção de biocombustíveis a partir de óleos vegetais, a fim de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e trazer maior controle e segurança no abastecimento de combustíveis. EBT está

realizando pesquisas sobre a produção de biodiesel a partir do cultivo de algas em grandes tanques que utilizam CO₂ proveniente de gases de combustão de usinas como fertilizante para as algas.

- ***Parry Nutraceuticals:***

Empresa de pesquisa e desenvolvimento em biotecnologia de microalgas para a produção de suplementos para a saúde, como: Spirulina orgânica, beta-caroteno e astaxantina.

- ***Algatech:***

A empresa foi fundada em 1999 para desenvolver e comercializar produtos derivados da microalga para a indústria nutracêutica e cosmeceutica. Seu principal produto é a astaxantina.

- ***Nature Beta Technologies:***

Nature Beta Technologies é uma empresa de biotecnologia, subsidiária da japonesa Nikken Sohonsa Co, situada na cidade de Eilat, em Israel. É especializada no uso da microalga do gênero *Dunaliella* na produção carotenóides e de diversos produtos naturais para medicina, cosméticos, ração animal, dentre outros.

- ***SeamBiotic:***

Empresa que utiliza gases de estações de energia para cultivo de algas com objetivo de produzir suplementos alimentares (como Omega-3 e Omega-6) e biocombustíveis. Durante os últimos 5 anos, tem realizado um estudo em escala piloto numa usina de Israel localizada na costa do Mediterrâneo, e alcançou uma grande produção de certas algas contendo alto percentual de lipídeos e carboidratos que promovem a transformação em biocombustíveis.



Figura 29: Lagoas Abertas do tipo *raceway* (pista de corrida)

Fonte: www.seambiotic.com

- ***Fuji Chemical Industry Co:***

Companhia farmacêutica japonesa, com mais de 60 anos, que produz produtos farmacêuticos e nutracêuticos, como a astaxantina natural, a partir de microalgas (*Haematococcus pluvialis*). Desenvolve um trabalho com produtos farmacêuticos para tratamento e prevenção do câncer.

- ***Nikken Sohonsa Co:***

Grupo japonês que investe no cultivo de microalgas para a produção de suplementos alimentares, cosméticos, dentre outros.

6.1.4. América do Sul:

Na América do Sul, foram identificadas 4 empresas. Uma na Argentina, direcionada a pesquisa de biocombustíveis, e três no Brasil, sendo que duas possuem como seu principal objetivo na utilização de microalgas a captura de CO₂ de emissões industriais, com conseqüente diminuição da liberação deste gás para atmosfera, e as outras duas a produção de biocombustíveis, como alternativa de combustível sustentável. A tabela a seguir mostra o grupo de empresas localizadas na América do Sul e seus países de origem:

Tabela 9: Empresas da América do Sul

Empresas – América do Sul		
<i>Argentina</i>		
Oil Fox		
		
<i>Brasil</i>		
Algae Biotecnologia	MPX	Petrobras
	 <small>Uma empresa do Grupo EBX</small>	

Fonte: Elaboração Própria

Uma breve descrição de cada empresa dessa região é feita a seguir, visando mostrar a atividade principal de cada uma delas e sua ligação com a produção de microalgas:

- **Algae Biotecnologia:**

A empresa pertence ao Grupo Ecogeo (empresas de consultoria e engenharia, montagem e operação de sistemas e equipamentos, com atuação nas áreas

ambiental e energética e foco na sustentabilidade), e desenvolve tecnologia de sistemas de cultivo de microalgas no Brasil, com o propósito de produzir biocombustíveis, compostos de interesse industrial e captar CO₂ de emissões industriais.

- **Oil Fox:**

Oilfox é uma empresa voltada às soluções tecnológicas, comerciais e financeiras, para o setor agrícola e de transporte. Atualmente a empresa investe em sua planta de produção de biodiesel a partir de microalgas.



Figura 30: Planta em construção – Oil Fox

Fonte: www.oilfox.com.ar

- **MPX:**

Criada em 2001, a MPX Energia S.A iniciou suas atividades no setor elétrico a partir do desenvolvimento de uma termelétrica no estado do Ceará. Em parceria com a companhia americana MDU Resources Group e com investimento de US\$ 150 milhões, a Termoceará, com capacidade de geração de 220 MW, movida a gás natural. E empresa estuda a utilização de uma tecnologia de sequestro de carbono, onde os gases gerados são redirecionados da chaminé da usina para um tanque com microalgas, que se alimentarão dos gases.

- **Petrobras:**

É uma companhia integrada que atua na exploração, produção, refino comercialização e transporte de petróleo e seus derivados. Desde o ano de 2006, o Centro de Pesquisas (Cenpes) da empresa, em parceria com as universidades federais de Rio Grande e de Santa Catarina, realiza pesquisas para produzir biodiesel a partir de microalgas, que vivem nas águas salinizadas do litoral do Norte e na água proveniente de produção de petróleo do Pólo Industrial de Guamaré. Cerca de 40 espécies de microalgas já foram coletadas e catalogadas.

6.1.5. Oceania:

A Oceania apresentou 3 empresas, sendo que todas elas apresentam interesse em biocombustíveis como produto final. Além da produção do óleo das microalgas, a “Aquaflow Bionomic Corporation” desenvolve sistemas para tratamento de água, a “International Power” foca na captura de CO₂ de emissões industriais para evitar o lançamento na atmosfera e a “Energetix” tem como seu foco principal a produção de biocombustíveis. A tabela a seguir mostra o grupo de empresas localizadas na Oceania e seus países de origem:

Tabela 10: Empresas da Oceania

Empresas – Oceania	
<i>Austrália</i>	
<p>International Power</p> 	<p>Energetix (The Victor Smorgon Group)</p> 
<i>Nova Zelândia</i>	
<p>Aquaflow Bionomic Corporation</p> 	

Fonte: Elaboração Própria

Uma breve descrição de cada empresa dessa região é feita a seguir, visando mostrar a atividade principal de cada uma delas e sua ligação com a produção de microalgas:

- ***International Power:***

“International Power Australia” é subsidiária do grupo “International Power plc”, e é uma das líderes das geradoras independentes de energia. A empresa possui usinas em diversos pontos na Austrália. “International Power” e “The Victor Smorgon Group” estão trabalhando em conjunto em um processo que objetiva transformar as emissões de gases estufa da usina Hazelwood (Austrália) em biocombustíveis ambientalmente seguros, através de microalgas.

- ***Energetix (The Victor Smorgon Group):***

A “The Victor Smorgon Group” é o grupo proprietário de uma empresa chamada Energetix, que produz em torno de 12 milhões de litros ao ano de combustível a partir de óleo de canola e sebo animal. Além disso, a empresa utiliza microalga e fotossíntese para transformar CO₂ em biocombustíveis. Essa tecnologia está sendo testada na usina Hazelwood em Latrobe Valley.

- ***Aquaflow Bionomic Corporation:***

A Aquaflow, fundada em 2005, cultiva algas diretamente de tanques instalados em Sistemas de Controle de Efluentes (EM) e outras águas ricas em nutrientes. A empresa anunciou que foi a primeira no mundo a produzir biodiesel comercial a partir de algas de tanques de esgoto.

6.2. Microalgas x Bioproduto:

Foi realizada uma análise das empresas, com relação às cepas de microalgas mais utilizadas em seus sistemas de cultivo e/ou projetos de pesquisa. Cabe ressaltar que não foi possível identificar o gênero de microalga utilizado em todas as empresas, visto que os mesmos foram retirados de fontes públicas de informação.

A figura 31 a seguir expõe os gêneros de microalgas mais utilizadas pelas empresas em questão:

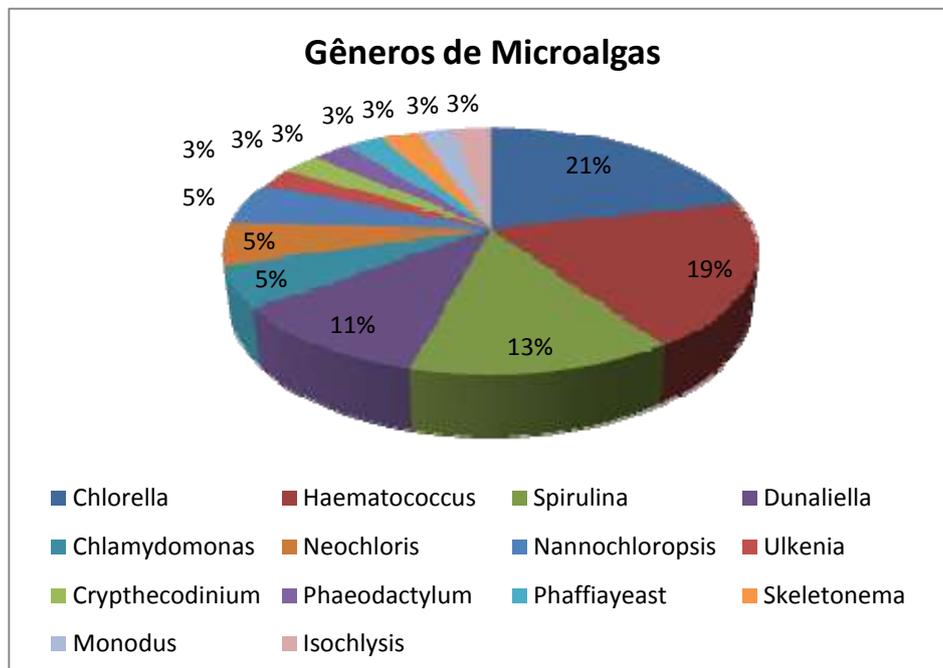


Figura 31: Gêneros de microalgas em destaque a partir da análise das empresas
Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

Como se pode observar, os quatro gêneros de microalga mais utilizados no geral pelas empresas são Chlorella com 21%, seguido do gênero Haematococcus com 19%, Spirulina com 13% e Dunaliella com 11%.

As microalgas do gênero Chlorella estão sendo utilizadas pela empresas para a produção de biocombustíveis e para a obtenção de carotenóides, como a astaxantina e o beta-caroteno. Já as microalgas do gênero Haematococcus estão sendo utilizadas pela maioria das empresas para a obtenção do carotenóide astaxantina. As empresas que utilizam as microalgas do gênero Spirulina produzem, em geral, produtos que agem como complementos nutricionais, como a astaxantina, vitamina B12 e aminoácidos

essenciais. E por último, as microalgas do gênero *Dunaliella* estão sendo cultivadas também para a produção de astaxantina e beta-caroteno. É importante ressaltar que esta análise foi feita através de informações públicas das empresas e como se trata de um assunto que envolve pesquisa e desenvolvimento de tecnologias competitivas, muitas informações não são expostas em seus relatórios e páginas institucionais na *internet*.

6.3. Equipamentos de cultivo:

A busca pelo alcance de sistemas eficientes e rentáveis faz com que as empresas, principalmente aquelas que possuem como seu *core business* a comercialização de tecnologias a serem aplicadas em outras companhias, desenvolvam equipamentos cada vez mais específicos, de acordo com o seu produto final desejado e/ou objetivo final (captura de CO₂, tratamento de águas residuais, dentre outros).

O objetivo deste item é expor alguns dos diferentes tipos de equipamentos de cultivo de microalgas utilizados pelas empresas estudadas. A figura a seguir mostra os equipamentos e sistemas de cultivo em destaque das empresas consultadas:

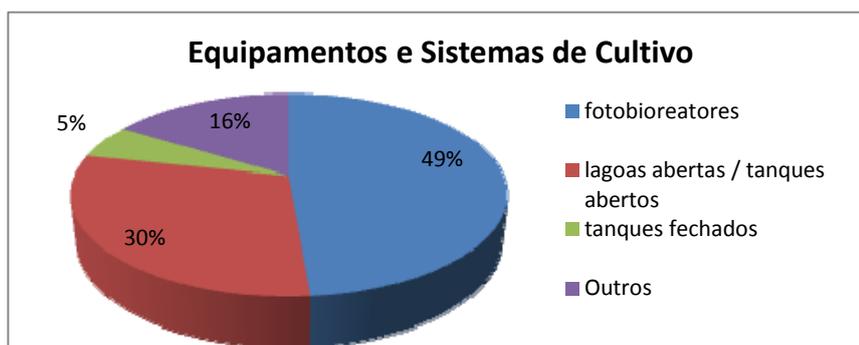


Figura 32: Equipamentos e sistemas de cultivo das empresas
Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

Em primeiro lugar com 49% ficaram os fotobioreatores. Apesar do custo deste tipo de cultivo ser maior do que as lagoas abertas, os fotobioreatores proporcionam alta eficiência e alto rendimento em óleo. Ou seja, esta desvantagem inicial no custo é dissipada no médio e longo prazo com o funcionamento do sistema. Pode-se observar através da figura a seguir um exemplo do uso de fotobioreatores.



Figura 33: Detalhes do fotobioreator da GreenFuel Technologies utilizado no teste de campo no MIT (Massachusetts Institute of Technology)

Fonte: PÉREZ, 2007.

A empresa GreenFuel Technologies realizou testes de campo utilizando um fotobioreator que usa 13% dos gases de exaustão emitidos pela usina termoeletrica (co-geração) do Massachusetts Institute of Technology – MIT para alimentar as microalgas.

Um primeiro resultado foi a redução significativa da concentração do CO_2 na exaustão, sendo esta da ordem de 82,3% em dias ensolarados e de 50,1% em dias nublados. O processo removeu também 85,9% de óxidos de nitrogênio. Os fotobioreatores foram construídos de forma triangular usando tubos de policarbonato com a hipotenusa deste triângulo voltada para o sol. Os gases são introduzidos na base do triângulo e ascendem em direção ao topo enquanto a suspensão (água, microalgas e nutrientes) circula no sentido oposto. De acordo com a empresa, a mistura no tubo sob regime turbulento da suspensão de microalgas com o CO_2 e a velocidade na qual o líquido circula determinam a taxa de crescimento das microalgas.

Em segundo lugar com 30% ficaram as lagoas abertas e tanques abertos. Se por um lado existe a desvantagem da possibilidade de contaminação por outras espécies e de menor controle sobre a temperatura da água, a concentração de CO_2 e as condições de iluminação, por outro existe a vantagem do seu baixo custo de implementação. No sistema mais básico há somente a necessidade de escavar uma trincheira ou uma pequena lagoa.

Em menor porcentagem estão os tanques fechados com 5% como, por exemplo, os tanques de fermentação com ausência de luz solar utilizados pela Solazyme Inc.

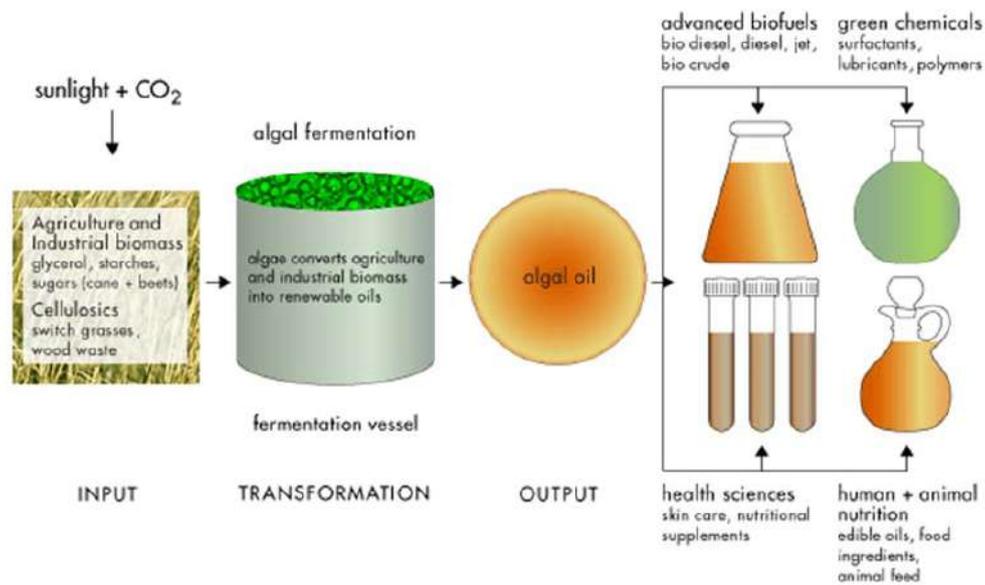


Figura 34: Esquema de produção da empresa Solazyme

Fonte: www.solazyme.com

No grupo classificado como “Outros” com 16%, estão equipamentos que não se enquadram nos grupos anteriores, por ter alguma peculiaridade, como o Helix BioReactor™ da OriginOil, que apresenta um eixo vertical de rotação com luzes de baixa energia dispostas em um padrão espiral ou hélice. Este ambiente de crescimento das algas permite que a cultura se replique de forma exponencial, multiplicando a colônia inteira em apenas algumas horas, sendo um processo muito eficiente e de baixo custo, de acordo com a empresa.

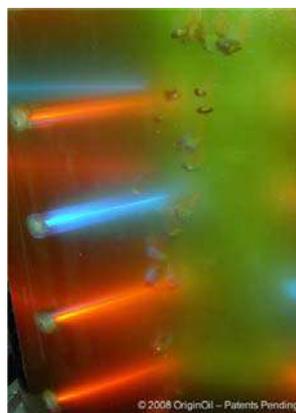


Figura 35: Cultura dentro do bioreator

Fonte: www.originoil.com

7. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros:

7.1. Conclusões:

Um mapeamento ou monitoramento tecnológico consiste em coletar, analisar e validar informação sobre desenvolvimentos científicos em uma área de interesse definida, para dar suporte a uma ação ou decisão específica.

Este trabalho visou à coleta e análise de informações, a partir de artigos científicos localizados na base de dados SCOPUS e de material público (relatórios anuais, publicações, páginas na *internet*) de empresas que de alguma forma estivessem envolvidas com o cultivo de microalgas.

A partir do levantamento de informações realizado com os 431 artigos científicos selecionados a partir das buscas, foi possível concluir que, após uma breve queda entre 2002 e 2003, o número de publicações atingiu níveis crescentes nos anos seguintes com maior concentração no ano de 2008 e, com a análise feita do ano de 2009, pode-se perceber a possibilidade deste ultrapassar o ano de 2008 em publicações. Esta análise temporal mostra o interesse nas microalgas desde o ano 2000.

Após levantamento dos periódicos onde foram publicados todos os artigos encontrados através da busca, pode-se observar que o periódico de maior destaque foi o “Journal of Applied Phycology”. Esta informação é útil no sentido de direcionar qualquer indivíduo que tenha interesse no assunto. Ao invés de buscar aleatoriamente alguma publicação, poderá buscar diretamente material dos periódicos em destaque, aumentando a chance de satisfazer a sua leitura, diminuindo o tempo de pesquisa.

Outro fator importante a ser observado para um nível prospectivo é a distribuição das publicações pelo mundo. Mapearam-se os países de onde se originaram as publicações estudadas e como foi obtido um número grande de países, decidiu-se agrupá-los por continente. A Europa ficou em primeiro lugar, seguida da Ásia e da América. A participação da Oceania foi expressiva, visto que é um continente com um número pequeno de países, e a África deteve o último lugar, com o menor número de publicações.

É relevante ressaltar que no continente americano o Brasil ficou em segundo lugar com 23%, atrás dos Estados Unidos que ficou em primeiro com 50%. Isso mostra o interesse e o investimento que vem sendo realizado na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias voltadas ao cultivo de microalgas dentro do país.

Na segunda etapa da prospecção, se decidiu restringir o número de artigos para que fosse possível uma análise de um a um com o propósito de levantar informações contidas somente no texto de cada um deles. Foram analisados os artigos publicados em 2008 e 2009. Com esta análise mais refinada, foi possível mostrar que o gênero de microalga *Chlorella* tem sido o mais utilizado no geral. Quanto ao setor de atuação onde

as microalgas foram empregadas, de acordo com o levantamento dos artigos, o setor “Ambiental” teve destaque, que engloba tratamento de água, tratamento de efluentes, impacto ambiental (como toxicidade de microalgas e o fenômeno da maré vermelha) e captura de CO₂ pelas microalgas. Com relação ao produto final, o destaque foi para as publicações que abordavam a geração de biomassa algal para fins diversos. Em segundo lugar tem-se a produção de biocombustíveis a partir das algas, deixando para as posições seguintes a extração de carotenóides e proteínas, por exemplo.

No item 4 foi detalhado todo o levantamento realizado das empresas no mundo que estão envolvidas com a questão das microalgas. Foi possível perceber o destaque das empresas que desenvolvem tecnologias em equipamentos e sistemas voltados para o cultivo e extração de substâncias das microalgas. Em segundo lugar ficaram as empresas de cunho biotecnológico, voltadas mais para pesquisas das espécies e as empresas pertencentes à Indústria Farmacêutica e Nutracêutica, que são as produtoras de fármacos e suplementos alimentares. Cabe salientar o interesse de empresas voltadas para o ramo petrolífero como a “Shell”, “Chevron”, “PetroSun” e “Petrobras”, na produção de biocombustíveis a partir de uma fonte renovável que tem se mostrado capaz de desempenhar uma produção mais eficiente e com menos impacto ao meio ambiente. A América do Norte detém a maioria das empresas estudadas e a Europa fica em segundo lugar. A Ásia aparece em terceiro, mas é possível que a barreira do idioma (chinês e japonês, principalmente) tenha dificultado a localização de informações.

Com relação aos equipamentos utilizados, os fotobioreatores ficaram em destaque. Apesar do custo deste tipo de cultivo ser maior do que as lagoas abertas, os fotobioreatores proporcionam alta eficiência e alto rendimento em óleo. Ou seja, esta desvantagem inicial no custo é dissipada no médio e longo prazo com o funcionamento do sistema.

A partir dos dados obtidos em ambos os levantamentos (artigos científicos e empresas), é possível concluir que a utilização das microalgas para a produção de fármacos é algo já instituído em vários países, tendo empresas como a “Mera Pharmaceuticals” e a “Cyanotech” já estabelecidas no mercado. Quanto à produção de biocombustíveis, pode-se dizer que é algo extremamente promissor, visto que pesquisas mostram que o rendimento do óleo é bem superior do que o extraído da soja, milho, palma, dentre outras fontes.

Como conclusão final, é possível considerar este trabalho satisfatório, pois se atingiu as expectativas que era a realização de um monitoramento das atuais utilizações das microalgas no mundo. Foi possível perceber que, apesar do custo de produção ainda ser o gargalo, existe um empenho das empresas em “driblar” este obstáculo, investindo em inovação de equipamentos e sistemas. Os benefícios ao meio ambiente acabam sendo trazidos junto naturalmente, pois como já foi dito, as microalgas auxiliam na fixação do CO₂, podem ser cultivadas em qualquer tipo de água e por não utilizarem a terra, como a soja, por exemplo, não competem com a produção de alimentos.

7.2. Sugestão para trabalhos futuros:

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que complementaríamos este trabalho. São elas:

- Realizar uma descrição mais aprofundada da utilização das microalgas em cada uma das áreas de atuação citadas no item 5.4.1.
- Desenvolver uma análise dos artigos científicos, destacando o número de publicações realizadas por empresas.
- Destacar a existência de plantas em escala piloto e industrial no mundo, bem como suas atividades e produtos.
- Realizar um estudo de prospecção tecnológica em uma base de patentes, por ser uma fonte rica em informação de inovações, para que os dados obtidos sejam cruzados com aqueles gerados pela análise de artigos. É importante cruzar palavras-chave como *microalgae*, *biofuel* e *bioproducts* com os nomes das principais empresas.

8. Referências Bibliográficas:

A2BE Carbon Capture LLC, <http://www.algaeatwork.com> (visitado em 15 Julho de 2009).

ABALDE, J. et al. **Microalgas: cultivo e aplicaciones**. España: Universidade da Coruña, 1995. 210p. (Monografías n.26).

Algae Biotecnologia, <http://www.algae.com.br> (visitado em 20 de Julho de 2009).

AlgaeLink, <http://www.algaelink.com> (visitado em 20 de Julho de 2009).

AlgaFuel, <http://www.algafuel.pt> (visitado em 20 de Julho de 2009).

Algatech, <http://www.algatech.com> (visitado em 20 de Julho de 2009).

Aquaflow Bionomic Corporation, <http://www.aquaflowgroup.com> (visitado em 21 de Julho de 2009).

Aquatic Energy LLC, <http://www.aquaticenergy.com> (visitado em 18 de Julho de 2009).

Aurora Biofuels, <http://www.aurorabiofuels.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

BARBOSA, M.J.G.V. **Microalgal photobioreactors: scale-up and optimisation**. 2003, 166f. Tese (Doutorado em Ciências) - Wageningen University.

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

BEN-AMOTZ, A. Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products – major industrial species: *Dunaliella*. In: RICHMOND, A. (Ed). **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. Oxford: Blackwell Science, 2004. p.273–280.

BENEMANN, J. R. – **CO₂ Mitigation with microalgae systems**. *Energy Conversion Management*, **38**, S475-479, 1997.

Bionavitas, <http://www.bionavitas.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

- BodegaAlgae, <http://www.bodegaalgae.com> (visitado em 17 de Julho de 2009).
- BORGES, L.; FARIA, B.M.; ODEBRECHT, C.; ABREU, P. Potencial de absorção de carbono por microalgas usadas na aquicultura, **Atlântica**, Rio Grande, 29(46 1): 35-46, 2007.
- BRUNO, J.J. Edible microalgae: a review of the health research. **Pacifica: Center for Nutritional Psychology**, 2001.V.3, 56p.
- CÂMARA, G. M. S.; HEIFFIG, L. S. - *Agronegócio de Plantas Oleaginosas: Matérias-Primas para Biodiesel*. **Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, Dep. De Produção Vegetal, Piracicaba, São Paulo, 2006.
- CAMPO, J.A. et al. Carotenoid content of chlorophycean microalgae: factors determining lutein accumulation in *Muriellopsis* sp. (Chlorophyta). **Journal of Biotechnology**, v.76, n.1, p.51-59, 2000.
- Celanese/Nutrinova, <http://www.celanese.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).
- Center of Excellence for Hazardous Materials Management (CEHMM), <http://www.cehmm.org> (visitado em 18 de Julho de 2009).
- CERTIK, M.; SHIMIZU, S. Biosynthesis and regulation of microbial polyunsaturated fatty acid production. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v.87, n.1, p.1-14, 1999.
- Chevron, <http://www.chevron.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).
- CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances** 25, 294–306, 2007.
- Circle Biodiesel & Ethanol Corporation, <http://www.circlebio.com> (visitado em 17 de Julho de 2009).
- COATES, V. et al. On the future of technological foresight. **Technological Forecasting and Social Change**, New York, v.67, 2001.
- Cognis, <http://www.cognis.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).
- COLLA, L.M. et al. Fatty acids of *Spirulina platensis* grown under different temperatures and nitrogen concentrations. **Zeitschrift für Naturforschung**, v.59c, p.55-59, 2004.
- Community Fuels, <http://www.communityfuels.com> (visitado em 18 de Julho de 2009).

CORDERO-ESQUIVEL, B. et al. Astaxanthin production from the green alga *Haematococcus pluvialis* with different stress conditions. **Biotechnology Letters**, v.2,n.18, p.213-218, 1996.

Cyanotech, <http://www.cyanotech.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

CYSEWSKI, G.R.; LORENZ, R.T. Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products – species of high potential: *Haematococcus*. In: RICHMOND, A. (Ed). **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. Oxford: Blackwell Science, 2004. p.281-288.

DARZINS, A. The promises and challenges of algal biofuels – Biodiesel Collective Conference – National Renewable Energy Laboratory – NREL (2008)

DERNER, Roberto Bianchini et al. **Microalgas, produtos e aplicações**. *Cienc. Rural* [online]. 2006, vol.36, n.6, pp. 1959-1967. ISSN 0103-8478.

Diversified Energy, <http://www.diversified-energy.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

DU PREEZ, G. T.; CARL, W. I. P. **Technological threat and opportunity assessment**. New York: Elsevier Science, 1999. p. 215-234. (Technological Forecasting and Social Change, 61).

Earthrise, <http://www.earthrise.com> (visitado em 13 Julho de 2009).

Energetix (The Victor Smorgon Group), <http://www.energetix.net> (visitado em 21 de Julho de 2009).

Enhanced Biofuels & Technologies, <http://www.ebtplc.com> (visitado em 20 de Julho de 2009).

FAUST, U. Production of microbial biomass. In: PRAVE, P.; FAUST, U.; SITTIG, W.; SUKATSCH, D. A. **Fundamentals of biotechnology**. Weinheim: VCH Publishers, 1987.

Fuji Chemical Industry Co, <http://www.fujichemical.co.jp/english> (visitado em 20 de Julho de 2009).

General Atomics, <http://www.ga.com> (visitado em 18 de Julho de 2009).

GILL, I.; VALIVETY, R. Polyunsaturated fatty acids, part1: occurrence, biological activities and applications. **Trends in Biotechnology**, n.15, p.401-409, 1997.

Global Green Solutions, <http://www.globalgreensolutionsinc.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

Green Star, <http://www.greenstar.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

GreenFuel, <http://www.greenfuelonline.com> (visitado em 17 de Julho de 2009).

GreenShift, <http://www.greenshift.com> (visitado em 18 de Julho de 2009).

GROBBELAAR, J.U. Algal biotechnology: real opportunities for Africa. **South African Journal of Botany**, v.70, n.1,p.140-144, 2004.

HEJAZI , M.A.; WIJFFELS, R.H. Milking of microalgae, *Trends Biotechnol.* **22** (2004), pp. 189–194

HR BioPetroleum, <http://www.hrbp.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

IGV (Institut für Getreideverarbeitung), <http://www.igv-gmbh.de> (visitado em 15 de Julho de 2009).

Imperium Renewables, <http://www.imperiumrenewables.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

International Power, <http://www.ippc.com> (visitado em 20 de Julho de 2009).

Inventure Chemical, <http://www.inventurechem.com> (visitado em 17 de Julho de 2009).

KIRK, E.A.; Behrens, P.W. Commercial developments in microalgal biotechnology. **Journal of Phycology**, n.35, p.215–226, 1999.

Live Fuels Inc, <http://www.livefuels.com> (visitado em 18 de Julho de 2009).

Martek Biosciences, <http://www.martek.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

Menova Energy Inc, <http://www.power-spar.com> (visitado em 16 de Julho de 2009).

Mera Pharmaceuticals, <http://www.merapharma.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

MOLINA GRIMA, E. et al. Downstream processing of cell-mass and products. In: RICHMOND, A. (Ed). **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. Oxford:Blackwell Science, 2004. p.215-251.

MPX, <http://www.mpx.com.br> (visitado em 20 de Julho de 2009).

Nature Beta Technologies, <http://www.wondercare.co.in/nature.html> (visitado em 20 de Julho de 2009).

Necton, <http://www.necton.pt> (visitado em 20 de Julho de 2009).

Nikken Sohonsa Co., <http://www.wondercare.co.in/nikken.html> (visitado em 20 de Julho de 2009).

Ocean Nutrition, <http://www.oceannutrition.com> (visitado em 16 de Julho de 2009).

OilFox, <http://www.oilfox.com.ar> (visitado em 15 de Julho de 2009).

OILGAE REPORT; (www.oilgae.com), visitado em agosto de 2009.

OLIVEIRA, D.P.R. Estratégia empresarial e vantagem competitiva: como estabelecer, implementar e avaliar. São Paulo: Atlas, 2001.

OriginOil , <http://www.originoil.com> (visitado em 13 Julho de 2009).

Panmol/Madaus, <http://www.panmol.com> (visitado em 20 de Julho de 2009).

Parry Nutraceuticals, <http://www.parrynutraceuticals.com> (visitado em 20 de Julho de 2009).

PÉREZ, H.B. Biodiesel de microalgas – parte 1, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), 2007.

PetroAlgae, <http://www.petroalgae.com> (visitado em 18 de Julho de 2009).

Petrobras, <http://www.petrobras.com.br> (visitado em 20 de Julho de 2009).

PetroSun, <http://www.petrosun.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

PharmaMar, <http://www.pharmamar.com> (visitado em 20 de Julho de 2009).

PhycoBiologics, <http://www.phycotransgenics.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

PORTER, A. et al. Forecasting and management of technology. New York: J.Wiley, 1991.

PORTER, A. et al. Technology futures analysis: toward integration of the field and new methods. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 71, n. 3, p. 287-303, mar. 2004.

PULZ, O.; GROSS, W. Valuable products from biotechnology of microalgae. **Applied Microbiology Biotechnology**, v.65, p.635-648, 2004.

RATLEDGE, C. Microorganisms as source of polyunsaturated fatty acids. In: GUNSTONE, F.D. (Ed). **Structured and modified lipids**. New York: Marcel Dekker, 2001. p.351-399.

RICHMOND, A. **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycolgy**. Oxford: Blackwell Science, 2004. 566 p.

ROBLES MEDINA, A. et al. Downstream processing of algal polyunsaturated fatty acids. **Biotechnology Advances**, v.16, n.13, p.517-580, 1998.

ROSEMBERG, J. N., Oyler, G. A., Wilkinson, L. Betenbaugh, M. J.. A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution. *Current Opinion in Biotechnology* 19 (2008) 430–436.

Royal Dutch Shell, <http://www.shell.com> (visitado em 20 de Julho de 2009).

SCOPUS; (www.scopus.com), consultado em agosto, 2009.

Seambiotic, <http://www.seambiotic.com> (visitado em 15 de Julho de 2009).

SIMOPOULOS, A.P. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v.56, n. 8, p.365-379, 2002.

SKUMANICH, M.; SILBERNAGEL, M. **Foresighting around the world: a review of seven bent-unkind programs**. Seattle: Battelle, 1997.

Solazyme Inc, <http://www.solazyme.com> (visitado em 17 de Julho de 2009).

Solazyme, <http://www.solazyme.com> (visitado em 16 de Julho de 2009).

Solena Group, <http://www.solenagroup.com> (visitado em 18 de Julho de 2009).

Solix Biofuels, <http://www.solixbiofuels.com> (visitado em 13 Julho de 2009).

Subitec GmbH, <http://www.subitec.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

Texas Clean Fuels, <http://www.texascleanfuels.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

Trident Exploration Corporation, <http://www.tridentexploration.ca> (visitado em 16 de Julho de 2009).

TRIPATHI, U. et al. Production of astaxanthin in *Haematococcus pluvialis* cultured in various media. **Bioresource Technology**, n.68, p.197-199, 1999.

University of Winnipeg, <http://io.uwinnipeg.ca> (visitado em 15 Julho de 2009).

Valcent Products, <http://www.valcent.net> (visitado em 13 Julho de 2009).

VOLKMAN, J.K. et al. Fatty acid and lipid composition of 10 species of microalgae used in mariculture. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v.128, p.219-240, 1989.

WANG B., Li Y., Wu N., Lan C.Q. CO₂ bio-mitigation using microalgae (2008) **Applied Microbiology and Biotechnology**, 79 (5), pp. 707-718.

XL Renewables, <http://www.xldairygroup.com> (visitado em 19 de Julho de 2009).

ZHUKOVA, N.V.; AIZDAICHER, N.A. Fatty acid composition of 15 species of marine microalgae. **Phytochemistry**, v.39, n.2, p.351-356, 1995.