



Estudo tecnológico de sistemas de cultivo de microalgas

Bruno Lindbergh Sousa

Projeto de Final de Curso

Orientadora

Prof^ª. Yordanka Reyes Cruz, D.Sc.

Co-orientador

Prof. Estevão Freire, D.Sc.

Agosto de 2018

ESTUDO TECNOLÓGICO DE SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS

Bruno Lindbergh Sousa

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Adriana dos Anjos Silva, D.Sc.

Gisel Chenard Diaz, D.Sc.

Leonard Guimarães Carvalho, D.Sc.

Orientado por:

Yordanka Reyes Cruz, D.Sc.

Estevão Freire, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Agosto de 2018

Sousa, Bruno Lindbergh.

Estudo tecnológico de sistemas de cultivo de microalgas/Bruno Lindbergh Sousa. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2018.

xiv, 68 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2018.

Orientadores: Yordanka Reyes Cruz e Estevão Freire.

1. Microalgas. 2. Tecnologias de sistemas de cultivo de microalgas. 3. Sistemas de coleta e distribuição de luz. 4. Projeto Final (Graduação UFRJ/EQ). 5. Yordanka Reyes Cruz e Estevão Freire. I. Título.

A meu finado avô Antônio, para quem fui fonte de orgulho.

“Vencer a si próprio é a maior das vitórias.”
(Platão)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por tudo o que provê.

A meus pais, por todo o esforço realizado e por terem lançado as fundações que me permitiram chegar até aqui.

A meu amor, Valesca, por todo o apoio, carinho e compreensão desde o início. Sem sua força tudo teria sido mais difícil.

A meus orientadores, pela atenção, orientação e disposição em me ajudar.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Estudo tecnológico de sistemas de cultivo de microalgas

Bruno Lindbergh Sousa

Agosto de 2018

Orientadores: Prof. Yordanka Reyes Cruz e Estevão Freire

Estudos prospectivos acerca de microalgas justificam-se devido a problemas advindos da poluição causada pelo uso em grande escala de combustíveis fósseis, a previsão da dificuldade futura para a produção alimentar agropecuária acompanhar o aumento populacional global e a busca por métodos viáveis de produção de medicamentos, cosméticos e nutracêuticos. As microalgas são microorganismos que podem ser cultivadas em ambientes impróprios para a agricultura, utilizam a luz do Sol e absorvem CO₂, características que as tornam relevantes em um cenário de redução de emissão de poluentes e eficiência energética. Este trabalho aborda um estudo tecnológico para obter um panorama do desenvolvimento de sistemas de cultivo de microalgas a partir da publicação de artigos científicos e depósitos de patentes no Brasil e no mundo. Foram utilizadas as bases de dados de patentes *Derwent Innovations Index* e *BuscaWeb*, do INPI e a base de dados científicos *Scopus*. Os dados analisados mostram que o interesse pela tecnologia de sistemas de cultivo de microalgas aumentou na década de 2010, com predominância de resultados relativos a sistemas fechados (fotobiorreatores). Métodos de coleta e distribuição de luz apresentam potencial para aumentar a eficiência de sistemas de cultivo, mas ainda são explorados por poucos grupos de pesquisa, sugerindo que ainda não há grande interesse nesta área específica. Por outro lado, o panorama atual revela oportunidades para grupos de pesquisa se dedicarem ao tema e se tornarem referência na área.

Palavras-chave: Microalgas, sistemas de cultivo, coleta e distribuição de luz.

Abstract of Final Course Project presented to the Escola de Química as part of the requirements to obtain a Degree in Chemical Engineering.

Technological study on microalgae cultivation systems

Bruno Lindbergh Sousa

August 2018

Advisors: Prof. Yordanka Reyes Cruz and Estevão Freire

Prospective studies about microalgae are justified because of problems brought by pollution generated from massive use of fossil fuels, predictions indicating future difficulties for crop and food production meeting the needs of an ever-growing global population and the search for viable ways of producing drugs, cosmetics and nutraceuticals. Microalgae are microorganisms which can be cultivated in areas unsuitable for agricultural farming, use sunlight and absorb CO₂. Those characteristics make them relevant in a scenario of reduced emissions and energetic efficiency. This work addresses a technological study to get an overview of microalgae culture systems development from scientific papers publication and patent deposits in Brazil and worldwide. The *Derwent Innovations Index*, *BuscaWeb* patent search databases and *Scopus* scientific database were used. The analyzed data show that the interest on microalgae cultivation system technologies have increased from the decade of 2010 on, with predominance of closed-system-(photobioreactor)-related results. Light collection and distribution methods could be used to increase cultivation systems efficiency, but are exploited by few research groups, which suggests that the interest in developing this specific topic of study is still small. Nonetheless, current panorama reveals opportunities for research groups to delve into this subject and become leaders in such topic.

Keywords: Microalgae, cultivation systems, light collecting and distribution.

ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO	1
I.1 Justificativa	1
I.2 Estrutura do trabalho	4
I.3 Objetivos	5
I.3.1 Objetivo geral.....	5
I.3.2 Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
II.1 Microalgas.....	5
II.2 Produtos obtidos com microalgas	7
II.3 Sistemas de cultivo de microalgas.....	8
II.3.1 Sistemas abertos	8
II.3.2 Sistemas Fechados.....	11
II.4 Sistemas de captação de luz.....	14
II.5 Prospecção tecnológica	17
II.5.1 Artigos científicos.....	18
II.5.2 Patentes	19
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.....	22
III.1 Metodologia da Análise de Patentes	22
III.2 Metodologia da Análise de Artigos	23
CAPÍTULO IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
IV.1 Patentes da base de dados do INPI.....	24
IV.2 Patentes da base de dados <i>Derwent Innovations Index</i>	28
IV.2.1 Busca simples	28
IV.2.2 Busca avançada.....	33
IV.3 Artigos publicados.....	39
CAPÍTULO V. CONCLUSÕES	47
V.1 Considerações gerais	47

V.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	49
CAPÍTULO VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DAS ABREVIATURAS

CO₂ – DIÓXIDO DE CARBONO

EPO – ESCRITÓRIO EUROPEU DE PATENTES

INPI – INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

IPC – CLASSIFICAÇÃO INTERNACIONAL DE PATENTES

LED – DIODO EMISSOR DE LUZ

NH₄⁺ – ION AMÔNIO

NO₃⁻ – NITRATO

O₂ – OXIGÊNIO

PBR – FOTOBIORREATOR

PO₄⁻ – FOSFATO

WIPO – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA PROPRIEDADE INTELECTUAL

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – SolarLeaf: Edifício com fachada recoberta por fotobiorreatores.....	3
Figura 2.1 – Lagoas naturais de cultivo de <i>Dunaliella salina</i> na Austrália para obtenção de β -caroteno.....	9
Figura 2.2 – Sistema inclinado instalado no laboratório GreenTec/EQ/UFRJ.....	10
Figura 2.3 – Lagoas tipo <i>Raceway</i> – Pacific Northwest National Laboratory.....	11
Figura 2.4 – Modelo de fotobiorreator tubular vertical desenvolvido na Espanha.....	12
Figura 2.5 – Exemplo de fotobiorreator tubular tipo <i>manifold</i>	13
Figura 2.6 – Fotobiorreator de placa plana desenvolvido na Arizona State University (EUA)....	14
Figura 4.1 – Concentradores solares parabólicos instalados em fotobiorreatores.....	37
Figura 4.2 – Fotobiorreatores de placa plana direcionáveis.....	45
Figura 4.3 – Coleta de luz com uma lente Fresnel e guia de luz.....	46
Figura 4.4 – Lentes de Fresnel lineares focalizando luz em fotobiorreatores tubulares.....	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Quantidade de patentes obtidas pela busca por Título – INPI.....	24
Tabela 4.2 - Quantidade de patentes obtidas pela busca por Resumo – INPI.....	24
Tabela 4.3 - Patentes relevantes obtidas pela busca na base de dados do INPI.....	25
Tabela 4.4 - Quantidade de patentes sobre sistemas de cultivo e iluminação na base INPI.....	26
Tabela 4.5 - Quantidade de patentes obtidas por busca simples na base Derwent Innovations Index de acordo com a palavra-chave empregada	28
Tabela 4.6 - Patentes relevantes obtidas por busca simples na base de dados Derwent Innovation Index – número, título e palavra-chave.....	30
Tabela 4.7 - Quantidade de patentes obtidas por busca simples na base Derwent Innovations Index de acordo com o tema abordado pelo pedido de depósito.....	32
Tabela 4.8 - Patentes relevantes obtidas por busca avançada na base de dados <i>Derwent Innovation Index</i>	33
Tabela 4.9 – Principais depositantes das patentes obtidas através da busca avançada na base <i>Derwent Innovations Index</i>	39
Tabela 4.10 - Quantidade de documentos relacionados a sistema de cultura de microalgas por área de estudo – base <i>Scopus</i>	39
Tabela 4.11 - Instituições com maior quantidade de artigos publicados relacionados a sistemas de cultivo de microalgas – base <i>Scopus</i>	42
Tabela 4.12 - Quantidade de documentos publicados com sistemas de coleta ou distribuição de luz para aplicação em cultivo de microalgas – base <i>Scopus</i>	44

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Quantidade de patentes por origem geográfica dos depositantes – base INPI.....	27
Gráfico 4.2 - Número de patentes obtidas em busca avançada à base <i>Derwent Innovations Index</i> em relação ao país de depósito.....	37
Gráfico 4.3 - Número de patentes obtidas em busca avançada à base <i>Derwent Innovations Index</i> em relação ao ano de depósito.....	38
Gráfico 4.4 - Evolução do número de patentes depositadas de acordo com o país de depósito ao longo do tempo. Dados de busca avançada, base <i>Derwent Innovations Index</i>	38
Gráfico 4.5 - Quantidade de artigos relacionados a sistemas de cultivo de microalgas publicados a cada ano – base <i>Scopus</i>	41
Gráfico 4.6 - Quantidade de artigos relacionados a sistemas de cultivo de microalgas publicados por país – base <i>Scopus</i>	41
Gráfico 4.7 - Evolução temporal da quantidade de artigos publicados relacionados a sistemas de cultivo de microalgas – base <i>Scopus</i>	43
Gráfico 4.8 - Comparação por país da quantidade de artigos publicados relacionados a sistema de cultivo de microalgas – base <i>Scopus</i>	43

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

I.1 Justificativa

O uso de produtos fabricados por meio de processos químicos industriais vem se tornando parte integrante da vida do ser humano nos últimos séculos de forma mais intensa, a ponto de ser considerada impraticável a sua renúncia a esses produtos. Materiais, medicamentos, alimentos, combustíveis e tantos outros produtos são produzidos, em sua maioria, por meio de processos químicos, que por vezes deixam resíduos prejudiciais à natureza.

Com foco no aumento da eficiência e na redução de emissões, alternativas são de novas matérias primas são buscadas para a obtenção de produtos já usados atualmente assim como novos produtos com potencial benéfico para a saúde humana e o meio ambiente. A busca incessante pelo desenvolvimento econômico impulsiona a demanda global por energia. De acordo com Carvalho (2015), aproximadamente 80% da energia mundial têm como origem a queima de combustíveis fósseis. A utilização desses combustíveis libera grandes quantidades de Gases de Efeito Estufa na atmosfera. Os efeitos das emissões a partir da queima de combustíveis fósseis têm sido amplamente debatidos. Graves alterações climáticas, percebidas no presente e previstas para o futuro, são consequências advindas da atual matriz energética, apontadas em diversos painéis dedicados ao impacto do homem na natureza. Mudanças de padrões climáticos, elevação do nível do mar, alagamento de vastas extensões de terras, aumento da temperatura global, morte de centenas de milhares de pessoas e extinção de até um milhão de espécies de seres vivos são algumas dessas consequências (Ahmad et al, 2011).

O impacto negativo dos combustíveis fósseis no meio ambiente revela a necessidade na redução de seu consumo. Aliado a esse fato, o crescimento da demanda global por energia aumentou o interesse na busca por fontes de energia renováveis (Quinn et al, 2015), algumas delas descobertas há mais de um século (Encarnação, 2008).

Entre as diversas alternativas de fontes de energia renováveis estudadas atualmente, os biocombustíveis são alvo de especial atenção. Os biocombustíveis são substâncias obtidas a partir de matérias-primas de origem biológica que podem ser utilizadas em substituição a combustíveis fósseis. Entre os biocombustíveis destacam-se o etanol e o biodiesel. O etanol é a fonte de energia renovável mais utilizada no Brasil (Carvalho, 2015). O biodiesel representa a principal alternativa aos combustíveis fósseis (Ahmad et al, 2011), sendo o seu uso em

substituição ao óleo diesel facilitado por não serem necessárias modificações significativas em equipamentos que já consumiam óleo diesel.

A utilização de biodiesel é promissora na busca pela redução da emissão de poluentes, pois sua cadeia de produção permite que se estabeleça um ciclo praticamente fechado de carbono (Louback, 2017), no qual o carbono emitido na queima do biodiesel é absorvido durante o cultivo da biomassa a ser utilizada em sua produção.

O biodiesel pode ser obtido a partir de diversas fontes de origem biológica, sendo as de origem vegetal as mais utilizadas. O uso de óleos vegetais apresenta vantagens econômicas e também sociais, por promover o desenvolvimento de regiões rurais. Fatores como sazonalidade, clima, disputa de espaços cultiváveis com a produção de alimentos, desmatamento, entre outros, são algumas das desvantagens do uso de fontes vegetais na produção de biodiesel.

Várias linhas de pesquisa se dedicam a elaborar novas rotas de produção e matérias-primas. Uma das fontes sustentáveis de energia mais promissoras é a produção de biodiesel a partir de microalgas (Ahmad et al, 2011). No entanto, o custo atual de produção ainda é elevado, o que dificulta a sua utilização industrial. As microalgas oferecem perspectivas promissoras devido às suas características especiais. Estes microorganismos apresentam vantagens de cultivo em relação a plantas e podem ser fonte viável de diversos produtos úteis para a indústria farmacêutica, alimentícia e cosmética (Borowitzka, 2012). A tecnologia necessária para um processo eficiente e economicamente viável, porém, tornou limitada a sua produção em comparação com o cultivo de vegetais.

A utilização de métodos comerciais de cultivo de microalgas surgiu por volta de seis décadas atrás (Borowitzka, 2013), mas o ímpeto pela utilização de fontes alternativas de combustível aumentou nos últimos anos o interesse pelo desenvolvimento de novos processos de cultivo de microalgas.

Na busca pela eficiência e baixo custo, diferentes processos para o cultivo de microalgas são estudados, desenvolvidos e aprimorados. Entre esses, a utilização de fotobioreatores é uma solução promissora, por apresentar benefícios em relação ao método mais comum de produção de algas em tanques abertos de cultivo, tais como a redução da área necessária às instalações. As tecnologias essenciais para uma produção eficiente e com custo de produção competitivo estão sendo aprimoradas continuamente.

Microalgas possuem grande potencial como fonte energética e de insumos, além de tratamento de efluentes, com vantagens em relação a processos atuais. Outras aplicações

inovadoras incluem a instalação de microlagas em edificações. Em 2014 foi construído na Alemanha um edifício residencial, chamado BIQ house, no qual foi instalado um modelo experimental denominado SolarLeaf. A fachada da construção é recoberta por fotobiorreatores de placa plana. As microalgas cultivadas recebem CO₂ proveniente do sistema de aquecimento central do edifício. A biomassa gerada é utilizada como matéria-prima em uma usina de biogás que abastece a região, incluindo o prédio. A fachada com fotobiorreatores de vidro também ajuda a controlar a luminosidade interna.



Figura 1.1 – SolarLeaf: Edifício com fachada recoberta por fotobiorreatores

Apesar dos avanços conquistados e do elevado nível de consolidação das tecnologias de cultivo de microalgas, ainda há muitos obstáculos a serem superados para uma efetiva produção em larga escala, com competitividade econômica e com uma destinação ambientalmente correta dos subprodutos gerados ou seu aproveitamento.

A propagação de luz no meio de cultivo é um aspecto limitante nas técnicas de cultivo atualmente empregadas. Microalgas necessitam de luz para seu metabolismo, mas a luz não consegue alcançar profundidades maiores que alguns centímetros. Esta característica limita o projeto de sistemas fechados e abertos, que precisam de grande área em relação a seu volume para maximizar a quantidade de luz recebida. Sistemas de rastreamento solar, captação e distribuição de luz têm o potencial de aumentar a eficiência do processo e possibilitar projetos mais compactos de sistemas de cultivo.

O desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias e dos processos produtivos necessitam de apoio continuado, seja por meio de suporte econômico e financeiro ou por

meio de políticas públicas.. Para estabelecer os rumos a serem seguidos, especialmente em meio a constantes transformações socioeconômicas e avanços em diferentes áreas do conhecimento, estudos de prospecção são de grande valia, ajudando a diminuir incertezas e riscos futuros e orientando esforços no desenvolvimento de novas tecnologias (Oliveira, 2014).

O acesso ao conhecimento tecnológico também representa potenciais oportunidades de empreendimento, fornecendo ao setor produtivo bases de informação que os ajudam a orientar investimentos e aproveitar novas possibilidades de negócios. Existem diversos métodos focados em gerenciar grandes quantidades de informação e transformá-las em conhecimento qualificado e acessível através da análise de publicações e de pedidos de depósito de patentes (Schlittler, 2012).

Análises de publicações em periódicos mostram as tendências científicas sobre uma determinada área do conhecimento. Artigos são vetores de grandes quantidades de informação, com grande dinamismo. Pedidos de depósito de patente, por outro lado, precisam se enquadrar em certos requisitos e são rigorosamente analisados para serem concedidos. Por serem onerosos, são usados como proteção a tecnologias consideradas promissoras. Com isso, pedidos de patente podem indicar o nível de desenvolvimento tecnológico e de inovação de um país (Schlittler, 2012).

A utilização de microalgas como fonte de energia e de substratos úteis à indústria apresenta vantagens, notadamente ambientais, mas ainda carece de aprimoramentos em sua produção, para reduzir seus impactos e custos de produção. Levando em conta o cenário socioeconômico e ambiental, as perspectivas de crescimento da demanda energética elevam a necessidade de investimentos e da pesquisa científico e o conseqüente desenvolvimento tecnológico. Para dar os próximos passos, planejamento e informação são fundamentais. Desse modo, o presente trabalho apresenta um estudo no qual se analisa a produção científica e patentária em relação aos sistemas de cultivo utilizados para a produção de biomassa de microalgas e sistemas de coleta e distribuição de luz associados, fonte promissora de matéria-prima.

I.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. É apresentada a seguir uma breve descrição sobre cada capítulo.

CAPÍTULO I – Introdução ao tema abordado, organização do texto e objetivos.

CAPÍTULO II – Revisão bibliográfica. Apresenta conceitos e fundamentos teóricos sobre o tema deste trabalho, com informações sobre microalgas, sistemas de cultivo, sistemas de coleta e distribuição de luz e prospecção tecnológica.

CAPÍTULO III – Metodologia. Aborda a metodologia empregada no desenvolvimento do presente trabalho.

CAPÍTULO IV – Resultados e discussões. São abordados os resultados do mapeamento tecnológico, com a apresentação de gráficos/tabelas e a sua análise crítica.

CAPÍTULO V – Conclusões. Apresenta considerações finais sobre o trabalho.

CAPÍTULO VI – Referências bibliográficas. Apresenta as fontes de informação utilizadas no trabalho.

I.3 Objetivos

I.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo identificar o estágio atual de desenvolvimento tecnológico e tendências dos sistemas de cultivo utilizados para a produção de biomassa de microalgas atrelados a métodos de coleta ou distribuição de luz.

I.3.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos enumeram-se os seguintes:

- 1) Identificar os sistemas de cultivo utilizados na produção de biomassa de microalgas;
- 2) Analisar o panorama atual de desenvolvimento de sistemas abertos e fechados de cultivo de microalgas;
- 3) Analisar a evolução dos cenários científico e patentário, nacionais e internacionais, relacionado com o tema proposto;
- 4) Identificar tendências mundiais para o cultivo de microalgas com emprego de tecnologias de coleta ou distribuição de luz.

CAPÍTULO II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 Microalgas

O termo “microalga” define um conjunto diversificado de microorganismos capazes de realizar fotossíntese e produzir oxigênio, podendo ser procarióticos (cianobactérias) ou eucarióticos (algas verdes e diatomáceas, por exemplo) (Richmond, 2007), capazes de se multiplicar rapidamente e se adaptar a ambientes adversos graças à sua estrutura unicelular ou multicelular simples (Mata et al, 2010).

Microalgas formam um grupo de organismos com características muito diversas entre si em relação à sua estrutura celular, à sua morfologia, ciclos reprodutivos, funções ecológicas, entre outros. Tal diversidade também se apresenta a nível bioquímico, refletida na produção, através da fotossíntese, de uma gama extensa de carboidratos, lipídeos e proteínas; produtos com potencial valor comercial (Andersen, 2013). Apesar da diversidade, são fisiologicamente parecidos, com metabolismo similar com o das plantas (Leonett, 2016).

Microalgas não apresentam estruturas como raízes, caule ou folhas e se desenvolvem predominantemente em ambiente aquático, podendo ser também encontradas em ecossistemas terrestres, sob diversas condições ambientais. Há espécies de algas que se desenvolvem em ambientes desérticos, outros crescem na neve, outros, associados a líquens, sobrevivem em rochas (Da Ponte, 2016). Segundo Mata et al (2009), em torno de 30.000 espécies de microalgas já foram estudadas, mas há estimativas de que existam mais de 50.000 espécies.

Microalgas podem obter energia e nutrientes de diversas formas: autotrófica, heterotrófica, mixotrófica, fotoheterotrófica. De acordo com Mata et al (2009), o metabolismo autotrófico utiliza luz como fonte de energia para a realização de fotossíntese e CO₂ como fonte de carbono. O heterotrófico faz uso de compostos orgânicos como fonte de energia e carbono. O mixotrófico realiza fotossíntese para obter energia, mas necessita de compostos orgânicos assim como CO₂. O fotoheterotrófico requer luz quando utiliza compostos orgânicos como fonte de carbono (Leonett, 2016). Neste caso, a energia provém somente da luz. Mudanças no meio de crescimento influenciam no metabolismo das microalgas, que podem mudá-los para se adaptar às condições em que se encontram.

A simplicidade morfológica das microalgas em relação às plantas superiores reflete-se em uma resposta mais rápida para a adaptação às alterações de características do meio no

qual os microorganismos se encontram. Essa característica contribui significativamente para o estudo e desenvolvimento de técnicas de cultivo e novas utilidades.

II.2 Produtos obtidos com microalgas

Os produtos bioquímicos que podem ser obtidos a partir de microalgas possuem aplicações nas indústrias de cosméticos, suplementos alimentares, químicas e farmacêuticas, além de servir como fonte energética (Oncel, 2013). Extensa pesquisa vem sendo realizada desde os primórdios, no século XIX, com cultivos de microalgas realizados em laboratório para análise (Borowitzka, 2013). Nos anos 1940 foi feita a proposição, por Harder e von Witsch, que microalgas, tais como diatomáceas, poderiam ser fontes de lipídeos, utilizados como combustíveis ou alimentação (Borowitzka, 2013). Desde então, várias linhas de pesquisa mundo afora se dedicam a desenvolver tecnologias para aumentar a produtividade aprimorando meios de cultivo e extração, isolando espécies e selecionando cepas, estudando os processos bioquímicos, os aspectos fisiológicos e as condições ideais (pH, temperatura, nutrientes, intensidade luminosa) para maximizar a produção dos bioprodutos desejados e solucionando os problemas encontrados no decorrer desses estudos.

O cultivo de microalgas em larga escala para aplicações comerciais teve início nos anos 1960 no Japão (Borowitzka, 1999). A produção de alimentos, ração animal e biocombustível a partir de microalgas apresenta diversas vantagens (Viêgas, 2015). A possibilidade de uso de terras impróprias à agricultura e de água marinha, cujo uso no cultivo de plantas é inviável, são aspectos que favorecem a utilização de microalgas. Há também uma menor dependência em relação à sazonalidade, com menor variação dos níveis de produção em relação à época do ano (Mata et al, 2010). O curto ciclo de vida da maioria das espécies, da ordem de horas, favorece a seleção de cepas e a produtividade.

O tratamento de efluentes contaminados com NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^- utilizando microalgas é vantajoso, pois tal processo de tratamento gera subprodutos comercializáveis (Viêgas, 2015). Diversos biocombustíveis podem ser obtidos, incluindo o biodiesel, bioetanol, biohidrogênio e biometano (Oncel, 2013). O impacto ecológico do uso de tais biocombustíveis é reduzido pela absorção de CO_2 pelas microalgas durante sua produção. O processo pode utilizar gases de combustão industriais e efluentes líquidos, o que, combinado com a utilização de luz solar, contribui para a sustentabilidade ambiental de seu uso (Cuellar-Bermudez et al, 2015). A oferta de combustíveis de origem vegetal renovável é muito menor

que a demanda atual, sendo a produção por microalgas uma fonte promissora para ajudar a suprir as necessidades energéticas atuais e reduzir a dependência por combustíveis fósseis (Chisti, 2007).

A partir de microalgas também são comercializados produtos químicos de alto valor agregado, como carotenóides (β -caroteno, astaxantina), pigmentos de uso alimentar, cosmético e terapêutico (ficobiliproteínas), ácidos graxos e outros lipídeos, suplementos nutricionais e farmacêuticos, alimentos funcionais, fitoesteróis, poliidroxialconatos (para produção de plásticos biodegradáveis), polissacarídeos, entre outros (Borowitzka, 2012). Nem todos esses produtos estão inseridos em larga escala no mercado, devido à concorrência de outras fontes com custos de produção mais baixos nas condições atuais (macroalgas, plantas), como os polissacarídeos, por exemplo. O processo de aprovação da comercialização de aditivos alimentares e farmacêuticos por órgãos reguladores também é um fator que pode influenciar o sucesso comercial de produtos obtidos através de microalgas.

Apesar do potencial que apresenta, a produção de bioprodutos derivados de microalgas depende, entre outras coisas, da otimização dos meios de cultivo para alcançar maiores níveis de produtividade e redução de custos.

II.3 Sistemas de cultivo de microalgas

Diversos parâmetros influenciam o metabolismo celular das microalgas autotróficas, tais como: luz, temperatura, pH, concentração de CO_2 e O_2 dissolvido, disponibilidade de nutrientes, competição por patógenos ou outras algas, agitação, diluição do meio, frequência de colheita (Mata et al, 2010; Pires et al, 2017). Os meios de cultivo devem oferecer as condições ideais que favoreçam o crescimento das culturas de microalgas para obter a maior quantidade de biomassa possível.

O cultivo de microalgas pode ser realizado em sistemas abertos ou fechados. Sistemas abertos são aqueles cujas culturas são expostas ao ambiente. Sistemas fechados as culturas são totalmente confinadas no interior do vaso de cultivo, sem contato direto com o ambiente externo.

II.3.1 Sistemas abertos

Os sistemas abertos, construídos como tanques ou lagoas de diferentes tipos, apresentam maior simplicidade de construção e operação. Apresentam diferentes formas e tamanhos; costumam ser utilizados em grandes escalas de produção. São rasos, não

apresentam grande profundidade para permitir que a luz solar seja melhor absorvida pelas microalgas. Sistemas do tipo *raceway ponds*, nos quais a água é constantemente agitada e passa por chicanas, são mais eficientes. Por estar exposto ao ambiente, o cultivo em sistemas abertos está sujeito a contaminação por vírus, bactérias e outros microorganismos (Leonett, 2016), o que pode levar à competição pelos recursos disponíveis ou predação das microalgas e diminuir o rendimento em biomassa. Para prevenir a contaminação, pode-se manter o meio alcalino (Bahadar e Khan, 2013). No entanto, o alto pH do meio de cultivo limita o número de espécies de microalgas que podem ser cultivadas. Sistemas abertos não permitem o controle efetivo de parâmetros como temperatura e iluminação. A baixa concentração de CO₂ no ar pode dificultar sua absorção pelas microalgas e, conseqüentemente, seu crescimento (Mata et al, 2010). Sistemas de agitação, adição de CO₂ e colheita da biomassa aumentam a eficiência e a produtividade.

Lagos naturais são as formas mais simples de ambientes de cultivo de microalgas. Quando as condições naturais são favoráveis, com clima adequado e nutrientes em abundância, o crescimento de microalgas pode ocorrer espontânea e profusamente (Fortes, 2015). Borowitzka e Moheimani (2013) citam registros de cultivo de *Arthrospira* (*Spirulina*) em lagos naturais pelos povos astecas no México. Nos tempos atuais, há o cultivo comercial de microalgas em Mianmar (*Arthrospira*) e na Austrália (*Dunaliella salina*). Como poucos lugares oferecem condições ideais de cultivo, incluindo as que inibem a disputa de outras espécies de microorganismos, este método de cultivo é pouco utilizado.



Figura 2.1 - Lagos naturais de cultivo de *Dunaliella salina* na Austrália para obtenção de β -caroteno (Borowitzka e Moheimani, 2013).

Sistemas inclinados são montagens abertas nas quais a cultura de algas em suspensão flui pela ação da gravidade da parte mais alta para a mais baixa. A cultura retorna para a parte superior através de bombeamento. Sistemas inclinados são também conhecidos por modelo cascata ou filme descendente. A camada fina de cultivo permite uma boa absorção de luz em cultivos concentrados, mas o sistema apresenta grandes perdas por evaporação e dessorção de CO₂, além do gasto energético pelo bombeamento contínuo (Fortes, 2015).



Figura 2.2 – Sistema inclinado de cultivo de microalgas instalado no laboratório GreenTec/EQ/UFRJ (Aranda et al, 2016).

Lagoas circulares são utilizadas no Japão, na Indonésia e em Taiwan para o cultivo de *Chlorella* (Borowitzka e Moheimani, 2013). No entanto, a construção em concreto e a operação cara são características que as tornam desvantajosas em relação a outros sistemas de cultivo (Fortes, 2015).

Sistemas tipo *Raceway* são tanques que formam circuitos fechados pelos quais o meio de cultivo circula com a ajuda de agitadores com pás, sendo possível a agitação por outros meios. O nome *Raceway* faz alusão ao formato dos circuitos fechados, que remetem a pistas de corrida. Lagoas *Raceway* são sistemas eficientes (Bahadar e Khan, 2013), com construção e operação relativamente baratos (Borowitzka e Moheimani, 2013). Podendo ser construídos com concreto ou escavados na terra com cobertura plástica, lagoas *Raceway* possuem baixo gasto energético e manutenção e limpeza fáceis (Brennan et al, 2010). Perdas por evaporação,

contaminação por outras espécies e falta de controle de temperatura são desvantagens inerentes aos sistemas abertos (Fortes, 2015).

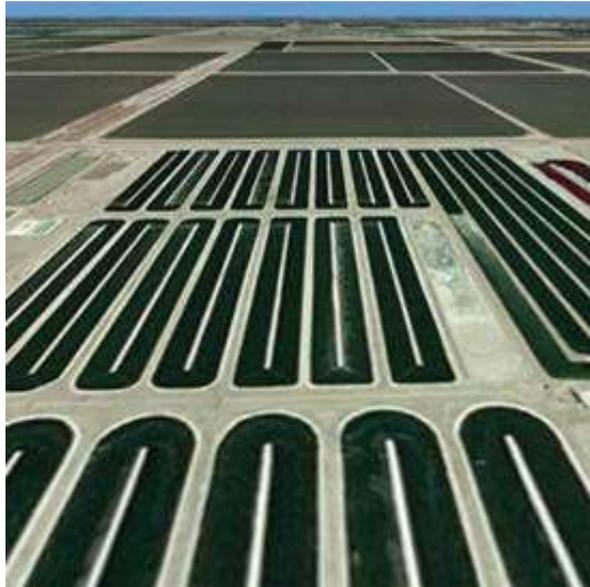


Figura 2.3 – Lagoas de cultivo de microalgas do tipo *Raceway* – Pacific Northwest National Laboratory, EUA

II.3.2 Sistemas fechados

Os sistemas fechados de cultivo de microalgas se constituem nos fotobiorreatores. Sistemas fechados permitem maior controle dos parâmetros e condições de cultivo, o que favorece uma maior produtividade de biomassa (Cuellar-Bermudez et al, 2015). Fotobiorreatores ocupam espaços menores em relação a sistemas abertos, reduzem a perda de água por evaporação e estão menos sujeitos à contaminação. O cultivo de microalgas em fotobiorreatores permite a utilização de gases de combustão ou resíduos líquidos, contribuindo com o tratamento destes rejeitos e reduzindo o impacto ambiental. De projeto mais elaborado, fotobiorreatores são mais caros para construir e operar em relação a sistemas abertos (Bahadar e Khan, 2013).

Fotobiorreatores podem apresentar diferentes configurações. Os mais comuns são os tipos tubulares, os de coluna vertical e os de placa plana (Pires et al, 2017). No entanto, há uma diversidade muito grande de projetos, fruto de pesquisa continuada na busca por maior eficiência e produtividade, reduzindo os custos de instalação e operação.

Modelos tubulares são utilizados em ambientes externos, dispostos de forma a maximizar a área iluminada pela luz solar. Construídos com material transparente, apresentam grande área de superfície por unidade de volume (Leonett, 2016). Podem ser

instalados de forma horizontal, vertical ou inclinada (Pires et al, 2017). Segundo Bahadar e Khan (2013), fotobiorreatores tubulares são os tipos mais utilizados. A eficiência do cultivo depende em grande parte de trocas gasosas e fluxo otimizados, além da área exposta à iluminação ser a maior possível (Bahadar e Khan, 2013).

Em modelos tubulares em serpentina, uma malha formada por tubos transparentes ligados entre si são dispostos de forma a permitir a exposição ao Sol, com as trocas de insumos (nutrientes, gases) acontecendo em compartimento separado. Modelos tubulares tipo manifold consistem de séries de tubos paralelos interligados a coletores nas pontas, projetados de forma a reduzir a perda de carga durante o escoamento do meio de cultivo (Fortes, 2015). Fotobiorreatores helicoidais têm como característica uma maior razão área superficial/volume, aumentando a penetração de luz, limitando a contaminação, permitindo controle mais fácil da temperatura e maior transferência de CO_2 no meio de cultivo (Bahadar e Khan, 2013). Modelos tubulares não podem ser escalonados indefinidamente, pois em tubos de grande comprimento pode haver acúmulo de O_2 , deficiência de CO_2 e variações no pH (Brennan et al, 2010).

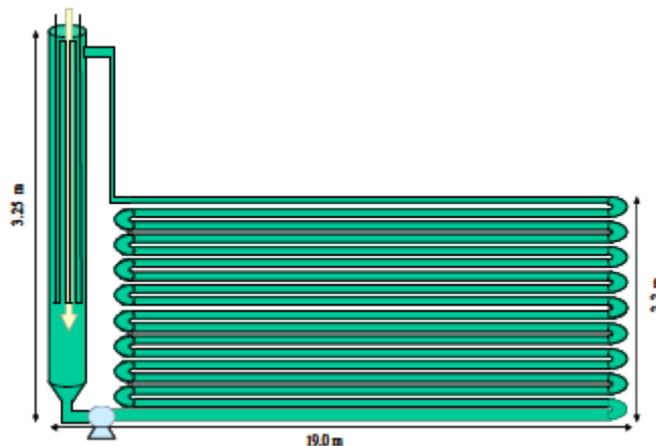


Figura 2.4 - Modelo de fotobiorreator tubular vertical desenvolvido na Espanha.



Figura 2.5 – Exemplo de fotobiorreator tubular tipo *manifold*.

Fotobiorreatores de coluna vertical oferecem como característica uma agitação mais eficiente do meio de cultivo (Brennan et al, 2010), através de bolhas de ar ou outros sistemas de aeração. Podem ser iluminados através de material transparente ou internamente. Modelos de coluna vertical podem ser projetados com design compacto e permitem um melhor controle dos parâmetros de cultivo. A exposição ao sol não é tão eficiente em comparação com outros modelos, pois a luz solar incide de forma oblíqua e parte da radiação é refletida para fora (Fortes, 2015). Sistemas de concentração ou distribuição de luz podem ser usados para corrigir esta deficiência. Segundo Fortes (2015), modelos de cilindro vertical iluminados internamente podem atingir maior eficiência da utilização da luz.

Fotobiorreatores de placa plana apresentam consumo mais baixo de energia e grande capacidade de transferência de massa e não têm áreas escuras (onde a luz não alcança), o que aumenta a eficiência fotossintética em relação a modelos tubulares (Brennan et al, 2010; Pires et al, 2017). Nestes modelos pode-se obter maior densidade celular (Cuellar-Bermudez et al, 2015). As placas com o meio de cultivo podem ser inclinadas de modo a aumentar a exposição à luz solar em diferentes latitudes e estações do ano, assim como reduzi-la caso haja excesso de luz solar (Zittelli et al, 2013). Os modelos possuem facilidade de escalonamento e de controles de temperatura e circulação. Modelos de placa plana podem ser agrupados para conseguir maiores produtividades em uma determinada área. Zittelli et al (2013) citam sistemas de cultivo de baixo custo, fabricados com filmes plásticos e instalados verticalmente dentro de tanques de água, como piscinas, para sustentação e controle da temperatura.



Figura 2.6 – Fotobiorreator de placa plana desenvolvido na Arizona State University (EUA)

O desenvolvimento de novos tipos de fotobiorreatores busca aprimorar cada um dos aspectos que possa influenciar na viabilidade do cultivo de microalgas em larga escala. Os materiais utilizados na construção de um sistema fechado, por exemplo, são foco de atenção. Materiais transparentes são empregados para permitir o aproveitamento da luz solar. No entanto, tais materiais podem oferecer riscos aos operadores em caso de quebra, como o vidro. A exposição prolongada ao sol pode reduzir sua transparência, como é o caso de alguns polímeros, diminuindo a produtividade e a eficiência. O custo também é um fator importante, pois materiais transparentes são mais caros do que similares opacos.

Cada espécie de microalga possui necessidades fisiológicas específicas, assim como a obtenção de produtos diferenciados exige condições distintas de cultivo. Por isso, um modelo único de sistema de cultivo, com características ideais, não pode ser desenvolvido (Masojidek et al, 2009).

II.4 Sistemas de captação de luz

Métodos de coleta, concentração e direcionamento de luz têm sido estudados para aumentar a eficiência de captação luminosa e permitir a construção de fotobiorreatores com materiais opacos, mais resistentes e baratos. Um sistema de cultivo de microalgas opaco, com distribuição interna de luz, não precisa ter grande área superficial por unidade de volume. Com isso, reduz-se a necessidade de grandes espaços e o projeto do fotobiorreator pode ser otimizado para atender outros requisitos, como a agitação e aeração. Sistemas para coletar a luz disponível também são úteis com fotobiorreatores transparentes instalados em regiões do planeta com menor disponibilidade de luz solar, como as áreas de maior latitude.

Sistemas de cultivo de microalgas podem fazer uso de fontes de luz natural ou artificial. A luz solar é uma das fontes energéticas com maior disponibilidade de uso, o que torna a sua utilização vantajosa em relação a fontes artificiais. No entanto, a sua disponibilidade não é constante, variando de acordo com diversos fatores. Dias nublados reduzem a quantidade de luz que chega ao solo. Regiões de clima temperado e com histórico de nebulosidade limitam a produtividade de sistemas de cultivo, sendo necessário o uso de métodos para concentrar a luz do sol. Regiões de alta latitude têm por característica grandes variações sazonais do período diário de luminosidade. No inverno o Sol nasce mais tarde e se põe mais cedo, deixando os dias com menos horas com luminosidade disponível. A exposição à luz solar também interfere no projeto de fotobiorreatores, pois a luz não consegue penetrar muito fundo em um meio com maior densidade de algas, deixando parte da cultura no escuro e limitando a produtividade. Assim os sistemas fechados devem ser construídos com uma relação área/volume maior, para que a luz possa ser melhor aproveitada.

Sistemas com fontes artificiais de luz são independentes em relação ao clima, sazonalidade e localização. Com disponibilidade luminosa constante, podem ser facilmente controlados e expandidos. Ciclos de iluminação em sistemas de cultivo podem seguir o padrão circadiano (no qual períodos claros e escuros são alternados a cada 12 horas), ou podem apresentar outras durações, com o objetivo de maximizar a produção de bioprodutos específicos.

A intensidade da fonte de luz à qual a cultura é exposta afeta o metabolismo das microalgas. Luz em excesso pode inibir o crescimento celular (fotoinibição) e até a morte da cultura (Richmond, 2004). Pigmentos presentes no metabolismo de seres autotróficos requerem a absorção de determinados comprimentos de onda. Mas como há vários pigmentos, capazes de absorver energia luminosa em praticamente toda a extensão do espectro da luz visível, a característica de espectro da fonte luminosa não interfere no crescimento das células (da Ponte, 2016). Ainda assim, lâmpadas com grande gama de espectro são mais adequadas para uso, como as fluorescentes do tipo *daylight* (luz do dia). A exposição das células à luz composta de comprimentos de onda específicos pode aumentar a produção de determinados bioprodutos em ambientes de cultivo.

Lâmpadas fluorescentes são muito utilizadas em laboratórios de cultivo de microalgas, por serem econômicas e de grande vida útil. O desenvolvimento da tecnologia de diodos emissores de luz (LEDs) avançou muito em anos recentes. Em relação a outras fontes

artificiais de luz, LEDs possuem grande eficiência energética, podem emitir luz em diversos comprimentos de onda, emitem luz direcional e não apresentam degradação do ciclo de vida se forem ligados e desligados muitas vezes (da Ponte, 2016).

Sistemas de iluminação artificial apresentam como desvantagem o custo energético, além da menor eficiência em relação ao uso direto de luz solar. Ambientes de cultivo de pequena escala, como os de inoculação e cultivo inicial de microalgas fazem uso de luz artificial para manter condições ideais de iluminação.

Para aproveitar a energia vinda do Sol, os sistemas de cultivo de microalgas mais utilizados atualmente precisam ser instalados em áreas externas. Sistemas fechados necessitam ser fabricados com materiais transparentes para que a luz possa entrar e ser captada pelas microalgas. Materiais transparentes apresentam custo maior de aquisição, como o policarbonato, ou podem ser frágeis, como o vidro, o que traz riscos de acidente com possível perda de produção.

Sistemas de concentração de luz solar para fotobiorreatores de microalgas oferecem a possibilidade de alcançar grande eficiência de distribuição de luz e eficiência energética (Ono e Cuello, 2003). A concentração de luz solar permite o cultivo de microalgas em condições menos favoráveis, como nebulosidades. Recursos de captação e distribuição de luz possibilitam a montagem de fotobiorreatores opacos, com materiais mais resistentes e baratos, além de design mais compacto, ocupando área menor para um mesmo volume.

Sistemas de concentração de luz podem ser compostos por lentes de Fresnel, peças ópticas que têm por vantagem o tamanho reduzido em relação a lentes convencionais de capacidade similar. Lentes de Fresnel são muito utilizadas como lentes de aumento, em lanternas e faróis de navegação litorânea. Sistemas de concentração de luz solar com lentes de Fresnel já são utilizados para a geração de energia elétrica e aquecimento de água (van Riesen et al, 2011).

Lentes de Fresnel lineares foram utilizadas por Masojídek et al (2003, 2009) no projeto de fotobiorreatores tubulares com o objetivo de concentrar a luz do sol e focalizá-la sobre o cultivo de microalgas. Um sistema de rastreamento solar foi instalado para reposicionar as lentes de acordo com o deslocamento aparente do sol pelo céu.

Sistemas desenvolvidos por empresas japonesas em parceria com a NASA (agência espacial norte-americana) para uso em câmaras de crescimento de plantas foram citados por Ono e Cuello (2003) como viáveis para uso em fotobiorreatores voltados para a fixação de CO₂ de gases de rejeito por microalgas. Estes sistemas utilizam conjuntos de lentes de

Fresnel agrupados como favos de mel (*honeycomb*) e protegidos por um domo acrílico transparente, concentrando a luz solar em cabos de fibra óptica. Sistema similar foi utilizado em pesquisas por Ogbonna et al (1999). Outros sistemas desenvolvidos nos Estados Unidos utilizam espelhos parabólicos, de vidro ou metal polido, para focalizar a luz em pontos de coleta com fibra óptica. A eficiência de tais sistemas aprimorou-se com o passar dos anos devido ao uso de fibras ópticas com melhor eficiência de transmissão (Ono e Cuello, 2003).

A distribuição uniforme de luz no interior de um fotobiorreator é um aspecto de grande importância para um bom aproveitamento da energia luminosa pelas microalgas e para a viabilidade técnica de fotobiorreatores opacos. Com este objetivo são empregadas fibras ópticas, que podem conduzir a luz para lugares que não estão necessariamente ao alcance de uma linha reta a partir de uma fonte pontual (da Ponte, 2016).

A penetração de luz no interior do meio de cultivo é afetada pela densidade celular, diminuindo exponencialmente com o aumento da concentração de células (Richmond, 2004). Assim, formam-se zonas escuras, onde a luz disponível não é suficiente para sustentar a fotossíntese. Um sistema de distribuição de luz eficiente deve levar a energia luminosa a todos os cantos do fotobiorreator, evitando a formação dessas zonas escuras. Consequências negativas de eventual excesso de luz, como a fotoinibição e morte celular, podem ser evitadas por intermédio de um controle da densidade celular e da turbulência do meio. Em maiores densidades, as células fariam sombra às outras mutuamente e reduziriam a exposição à luz forte a um padrão intermitente (Richmond, 2004).

Sistemas híbridos de iluminação contém lâmpadas LED para complementar a luz solar, especialmente quando a sua disponibilidade é insuficiente, como por exemplo em dias nublados (Ono e Cuello, 2003). Um sensor monitora a intensidade de luz solar recebida pelo sistema de coleta para controlar a iluminação artificial de forma a manter a intensidade de luz constante para a cultura de microalgas (Ogbonna et al, 1999).

II.5 Prospecção tecnológica

O desenvolvimento tecnológico de qualquer área de estudo é um trabalho contínuo, no qual passos incrementais são dados na busca por mais eficiência ou melhorias em processos e produtos. A inovação tecnológica surge a partir de novas visões, abordagens ou descobertas que levam a um avanço sobre aspectos de um determinado tópico de estudo. O levantamento

de informações sobre a área de interesse de uma pesquisa é, portanto, a etapa inicial de qualquer trabalho de desenvolvimento, seja acadêmico ou corporativo (Madeira, 2013).

O trabalho de prospecção tecnológica engloba o estudo e mapeamento do estágio atual de desenvolvimento de uma determinada área de pesquisa. Pode-se assim determinar o que já foi feito e as tendências futuras para aquela tecnologia. Estudos de prospecção tecnológica também são úteis para identificar gargalos e dificuldades técnicas, oferecendo oportunidades para elaborar soluções inovadoras.

Dados e informações sobre trabalhos de pesquisa e desenvolvimento já realizados são acessíveis publicamente por meio de teses e artigos científicos e documentos de patente.

II.5.1 Artigos científicos

Artigos científicos, publicados em revistas especializadas, descrevem de forma objetiva trabalhos acadêmicos de pesquisa realizados sobre determinado assunto, sendo avaliados por um grupo de especialistas na mesma área antes de sua publicação. A divulgação de artigos pode ocorrer também em eventos científicos, como congressos ou simpósios (Madeira, 2013).

A publicação de trabalhos de pesquisa dá o devido crédito aos autores e possibilita a verificação dos dados pela comunidade científica. A divulgação dos métodos de trabalho realizados permite a sua reprodutibilidade, para que outras pessoas também possam seguir os mesmos passos e chegar ao mesmo resultado.

Em instituições de ensino superior, linhas de pesquisa são conduzidas por professores que orientam alunos de pós-graduação, formando grupos de pesquisa. Os trabalhos realizados pelos alunos são publicados em teses e dissertações, avaliados por pares em defesas. Tópicos e desdobramentos elaborados pelos grupos são publicados em artigos e em eventos, como congressos e simpósios, nos quais são divulgados os avanços mais recentes em determinada área do conhecimento e neles pode-se ter um panorama do progresso atual.

Por vezes, etapas do desenvolvimento de pesquisas de alunos de doutorado não podem ser divulgadas antes da defesa de suas teses, o que só acontece depois de anos de estudo. Uma tese de doutorado deve conter uma descoberta, uma novidade. Se os aspectos fundamentais do trabalho do aluno forem divulgados antes da defesa de sua tese, pode-se perder o teor de novidade do trabalho. Assim, é possível que, em uma área de pesquisa, possa haver um avanço já conquistado que ainda não foi publicado. O patrocínio de empresas particulares em projetos de pesquisa acadêmica também pode implicar na não divulgação

prévia dos resultados, para proteger o conhecimento adquirido e garantir os direitos da instituição que financia o projeto.

II.5.2 Patentes

Patentes são documentos que descrevem projetos de produtos ou processos desenvolvidos por uma pessoa ou instituição. O trabalho de pesquisa e desenvolvimento tecnológico de um novo produto ou processo é oneroso e exige investimentos financeiros para ser realizado. A patente evita que concorrentes comerciais, que não tiveram gastos com a pesquisa, possam copiar e vender o mesmo produto a um preço mais baixo e prejudiquem comercialmente o inventor.

Uma patente confere ao inventor direitos de exclusividade sobre o produto descrito, auferidos pelo Estado. A sua produção, comercialização e uso por outras empresas só é permitido com uma licença concedida pelo detentor dos direitos, o que costuma ser realizado mediante pagamento de *royalties*. O conteúdo técnico de uma invenção precisa ser detalhado no relatório descritivo do documento de patente para que a mesma seja concedida. (Madeira, 2013).

Uma patente tem prazo determinado de vigência. Após esse prazo, o inventor perde os direitos de exclusividade e outras empresas podem fazer uso livremente da tecnologia descrita, a partir de então considerada como de domínio público. No Brasil, patentes protegem os direitos do inventor por 20 anos. Com a longa duração dos prazos, considera-se que após o período de vigência da patente, a tecnologia já terá evoluído para um nível superior de desenvolvimento. Algumas empresas deixam de entrar com pedidos de patente para seus produtos para evitar o livre uso de suas invenções por concorrentes ao final do prazo de vigência da patente. Essa forma de manter exclusividade sobre o fruto de seu trabalho de desenvolvimento, entretanto, exige cuidado especial para manter segredo e evitar o roubo de informações por meio de espionagem industrial, especialmente em grandes corporações, nas quais trabalham muitos funcionários.

Uma patente somente é concedida quando a invenção para a qual solicita-se proteção atende aos requisitos de novidade, atividade inventiva e aplicação industrial (Linhares, 2017). Com o requisito de novidade, é exigido que a invenção não tenha sido divulgada publicamente antes da data de depósito, podendo estar incluído neste caso o chamado “período de graça”. A atividade inventiva é característica de invenção que não seja fruto de modificação ou alteração óbvia do que já se conhece publicamente. Com o requisito de

aplicação industrial, o invento deve ser capaz de ser produzido por qualquer tipo de indústria (Brasil, 1996), não sendo apenas um conceito abstrato (Linhares, 2017).

Institutos governamentais de propriedade industrial são organizações que recebem os pedidos de depósito e os avaliam, podendo deferir ou negar a patente, de acordo com os requisitos contidos em legislação própria. Cada país tem um escritório de patentes, havendo também escritórios que abrangem vários países simultaneamente, como por exemplo, o Escritório Europeu de Patentes (EPO). No Brasil, o órgão responsável por depósitos de patentes é o Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI). Uma mesma patente pode ser depositada em diversos países, para aumentar a proteção contra potenciais concorrentes estrangeiros. Depósitos em diferentes países, no entanto, aumentam os custos para o inventor e são avaliados de forma independente, podendo prosseguir sob regulamentos diferentes, em prazos distintos (Madeira, 2013). As patentes depositadas na Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO) ou no Escritório Europeu de Patentes (EPO) podem oferecer proteção internacional, mas a abrangência é definida pelo inventor, que escolhe em quais países a patente terá vigor e arca com os custos da proteção de acordo com o número de países.

As informações contidas em patentes descrevem o que já se conhece sobre determinada área de estudo. Dessa forma, patentes representam um estoque de dados muito útil na etapa inicial de qualquer trabalho de pesquisa tecnológica.

A pesquisa em documentos de patentes identifica o ponto atual de desenvolvimento, a partir do qual uma nova tecnologia pode ser gerada. Informações prévias também podem evitar o desperdício de tempo e dinheiro no desenvolvimento de trabalhos já realizados por outras pessoas. O investimento em pesquisa em um ramo específico pode ser perdido caso haja tecnologia já patenteada. A verificação de anterioridades permite verificar se um projeto já está sendo estudado e o que já se conhece sobre determinado assunto (Linhares, 2017).

Patentes emitidas no mundo inteiro são classificadas por códigos de acordo com o ramo tecnológico que aborda. A lista de códigos forma a Classificação Internacional de Patentes (IPC, na sigla em inglês), sistema organizado pela Organização Mundial da Propriedade Intelectual. A IPC provê uma base de catalogação para permitir a busca pelo *estado da arte* na área de estudo antes da solicitação de depósito de patente. A IPC divide a tecnologia em oito seções com aproximadamente 70.000 subdivisões (WIPO, 2018). Para corresponder aos contínuos avanços tecnológicos, a lista IPC é atualizada anualmente.

Um código IPC é formado por uma letra representando a seção, um número representando a classe e letras seguintes sinalizando subclasses. Dígitos adicionais representam grupos e subgrupos. Essas subdivisões foram concebidas de forma a representar a variedade de temas possíveis para a busca por inovação. As seções são listadas a seguir:

- Seção A – Necessidades humanas
- Seção B – Operações de processamento; transporte
- Seção C – Química; metalurgia
- Seção D – Têxteis; papel
- Seção E – Construções fixas
- Seção F – Engenharia mecânica; iluminação; aquecimento; armas; explosão
- Seção G – Física
- Seção H - Eletricidade

Como exemplo, a classe C12 refere-se a “Bioquímica; Cerveja; Álcool; Vinho; Vinagre; Microbiologia; Enzimologia; Engenharia genética ou de mutação”. Dentro dessa classe, a subclasse C12M aborda “Aparelhos para enzimologia ou microbiologia”.

Os escritórios de depósito de patentes mantêm bases de dados para consulta pública, com acesso disponível através da rede mundial de computadores – Internet. Buscas de patentes também podem ser realizadas por meio de bases de dados de documentos de patentes depositadas e concedidas, tais como o *Derwent Innovation Index*, uma base de dados virtual com acesso pago que reúne informações sobre patentes coletadas com 41 autoridades emissoras de patente em todo o mundo (The Thomson Corporation, 2008).

Estudos de prospecção tecnológica de patentes fornecem diversos dados não apenas sobre o estado da técnica de determinada tecnologia, mas também sobre os inventores. Uma análise de patentes pode ser feita para revelar qual empresa detém certa tecnologia, ou qual país está em estágio mais avançado de desenvolvimento em uma área de estudo específica.

Avaliações de trabalhos de pesquisa financiados por instituições públicas mostram qual área está sendo priorizada, além das interações entre centros acadêmicos. O grau de interesse em determinado campo tecnológico em um período delimitado pode ser medido pelo número de pedidos de patente feitos no intervalo de tempo analisado (Louback, 2017). Trabalhos de pesquisa e desenvolvimento são frequentemente motivados por um interesse aquecido do mercado em certa tecnologia. Da mesma forma, um número menor de patentes em certo período de tempo reflete o desinteresse em determinada área de estudo.

CAPÍTULO III. METODOLOGIA

O presente trabalho avaliou a situação mais recente em relação à produção patentária que envolve sistemas de coleta e distribuição de luz em sistemas de cultivo de microalgas.

Para abranger a maior quantidade de documentos pertinentes ao assunto, foram escolhidas as bases de dados de patentes do INPI em nível nacional e a *Derwent Innovations Index* em nível internacional.

III.1 Metodologia da Análise de Patentes

A busca por informações de patentes referentes a sistemas de coleta e distribuição de luz para cultivo de microalgas foi realizada através de consulta a bases de dados de patentes com acesso disponível pela *internet*.

O processo de captação de luz solar para uso em cultivos de microalgas pode ser realizado com o emprego de soluções tecnológicas bastante distintas. Com isso, a seleção de palavras-chave para a busca de patentes precisa considerar a diversidade de termos que descrevem técnicas com uso potencial no ramo a ser estudado.

No presente estudo, diferentes combinações de palavras-chave foram pesquisadas de forma a obter dados mais abrangentes em relação às tecnologias utilizadas.

As patentes válidas depositadas no Brasil são custodiadas pelo Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), cuja base de dados, chamada *BuscaWeb*, pode ser acessada livremente e sem custo em seu *site*.¹ Em sua ferramenta de busca, foi realizado o levantamento por palavras específicas nos campos “Título” e “Resumo”.

A pesquisa por patentes concedidas fora do Brasil foi elaborada através da ferramenta *Derwent Innovations Index*, que agrega informações coletadas com 41 autoridades emissoras de patentes em todo o mundo (THE THOMSON CORPORATION, 2008). O acesso à base foi realizado através do portal Capes, do Ministério da Educação, disponível para uso irrestrito em universidades públicas. A ferramenta oferece opções de pesquisa básica e avançada de patentes, com uso de operadores booleanos (AND, OR, NOT, SAME) e pesquisa por título, tópico, nome do inventor, código de classificação, entre outros, assim como combinações entre estes. A ferramenta também permite a busca por termos que podem sofrer variações de escrita, com o uso de asteriscos (*). A busca, por exemplo, do termo

¹ <https://gru.inpi.gov.br/pePI/>

“concentra*” traz como resultados patentes com os termos “concentrador(a)”, “concentração” e “concentrado(s)”. Essa possibilidade de inserção de palavras-chave também ajuda na obtenção de resultados mais abrangentes.

Os dados obtidos com o levantamento de patentes foram avaliados de acordo com o período e país de procedência.

III.2 Metodologia da Análise de Artigos

O levantamento de artigos sobre o tema foi feito com o uso da base de dados *Scopus*, da Elsevier, com acesso através do Portal Capes, disponível nas universidades públicas. A base *Scopus* reúne resumos e citações de artigos acadêmicos publicados em periódicos, livros e anais de eventos. Os artigos disponíveis para consulta foram publicados após passarem por uma revisão por pares, o que confere maior confiabilidade às informações divulgadas. A base aborda diversas áreas do conhecimento, como ciências sociais, exatas e biológicas. A maioria dos artigos publicados é escrita em inglês, por isso o uso da ferramenta com palavras-chave nesse idioma traz resultados mais abrangentes. A base *Scopus* possui ferramentas para analisar e filtrar os dados obtidos por data, país, autor, periódico, instituição vinculada, entre outros.

Os dados obtidos para termos distintos foram avaliados e puderam ser comparados entre si, com informações que podem indicar a abrangência e o interesse, ou a sua falta, em um campo de pesquisa específico, assim como a sua evolução temporal.

As palavras-chave utilizadas foram escolhidas de forma a abranger diferentes técnicas, como “coleta de luz” e “captação de luz”. O uso principal de sistemas de coleta de luz é em fotobiorreatores, mas para também abranger sistemas abertos, os termos “cultivo de microalgas” foram utilizados. Foram levantados dados de patentes com menos de 20 anos desde o seu depósito.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de dados obtidos através do levantamento realizado são mostrados de acordo com a metodologia utilizada.

IV.1 Patentes da base de dados do INPI

A tabela 4.1 mostra a quantidade de patentes obtidas na base de dados brasileira a partir do uso de diferentes palavras-chave para a busca por Título de patente.

Tabela 4.1 – Quantidade de patentes obtidas pela busca por Título - INPI

Palavras-chave no título	Quantidade de patentes obtidas
Coleta + luz	6
Captação + luz	4
Luz + fotobiorreator	4
Captação + fotobiorreator	0
Cultivo + microalga	0
Cultivo + microalgas	16
Fotobiorreator	28

A tabela 4.2 mostra a quantidade de patentes obtidas na base de dados brasileira a partir do uso de diferentes palavras-chave para a busca por Resumo de patente.

Tabela 4.2 – Quantidade de patentes obtidas pela busca por Resumo - INPI

Palavras-chave no resumo	Quantidade de patentes obtidas
Cultivo + microalga	18
Cultivo + microalgas	38
Captação + luz	87
Coleta + luz	89
Luz + fotobiorreator	7
Luz + microalga	0

Fotobiorreator + opaco	0
Fotobiorreator	22

A busca por patentes através de palavras-chave distintas no título ou no resumo trouxe resultados que abrangem diversos aspectos de inovação tecnológica. De 70 patentes avaliadas, 43 não apresentaram relevância com o tema proposto, enquanto que 27 têm algum aspecto relacionado com o tema.

A tabela a seguir mostra as patentes consideradas relevantes.

Tabela 4.3 – Patentes relevantes obtidas pela busca na base de dados do INPI

Número	Título da patente	País de origem
BR 11 2017 010997 2	ELEMENTO INJETOR DE LUZ E FOTOBIORREATOR	França
BR 11 2017 010991 3	ELEMENTO INJETOR DE LUZ E FOTOBIORREATOR	França
BR 10 2015 007793 9	FOTOBIORREATOR TUBULAR VERTICAL DE MEMBRANAS	Brasil
BR 10 2014 028650 0	CONCENTRADOR DE ENERGIA DOS RAIOS DE LUZ SOLAR OU ARTIFICIAL	Brasil
BR 10 2014 021567 0	FOTOBIORREATOR TUBULAR E VERTICAL EM POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE PARA CULTIVO DE MICROALGAS	Brasil
BR 10 2014 017697 7	ADSORÇÃO DE CO2 EM PELLETS DE CINZAS PARA CULTIVO MICROALGAL	Brasil
BR 10 2013 033383 2	PROCESSO DE TRATAMENTO SEQUENCIAL DO EFLUENTE DA INDÚSTRIA ABATEDOURA AVIÁRIA UTILIZANDO A MICROALGA H. PLUVIALIS E PROCESSO DE OBTENÇÃO DA BIOMASSA DA MICROALGA H. PLUVIALIS	Brasil
BR 11 2015 008979 8	NOVO FOTOBIORREATOR PARA CULTIVO FECHADO HORIZONTAL DE MICROALGAS	EUA
BR 10 2013 026395 8	FOTOBIORREATOR TUBULAR MODULAR PARA TRATAMENTO INTEGRADO DE EFLUENTES LÍQUIDOS E EMISSÕES	Brasil
BR 10 2013 020387 4	ARRANJO DE MÓDULOS DE CULTIVO EM MALHA HEXAGONAL PARA UM FOTOBIORREATOR ESCALONÁVEL DE CULTIVO INDUSTRIAL DE MICROALGAS A ALTAS CONCENTRAÇÕES	Brasil
BR 10 2012 024395 4	SISTEMAS COMPACTOS PARA CULTIVO MASSIVO DE MICROALGAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS	Brasil
BR 11 2013 032011 7	MÉTODO DE CULTIVO E COLHEITA DE BIOMASSA DE ALGAS, APARELHO PARA CULTIVO DE MICROALGAS, SISTEMA PARA O CULTIVO E A COLHEITA DE BIOMASSA DE MICROALGAS	Canadá
BR 10 2012 011807 6	SISTEMA DE CULTIVO DE MICROALGAS	Chile
BR 11 2013 028481 1	FOTOBIORREATOR EM MEIO FECHADO PARA A CULTURA DE MICRO-ORGANISMOS FOTOSSINTÉTICOS	França
BR 10 2012 004620 2	SISTEMA E PROCESSO PARA CULTIVO E EXTRAÇÃO DE MICROALGAS E CIANOBACTÉRIAS PARA FINS COMERCIAIS	Brasil
PI 1103639-7	EQUIPAMENTO E MÉTODO DE OBTENÇÃO DE MICROALGAS, SPIRULINA	Brasil
BR 11 2012 033050 0	MÉTODO E SISTEMA PARA CULTIVO DE MICROALGAS EM UM REATOR DE FLUXO DE TAMPÃO EXPANDIDO	EUA
PI 1102195-0	FOTOBIORREATOR TUBULAR VERTICAL PARA PRODUZIR MICROALGAS	Brasil
BR 11 2012 016437 6	FOTOBIORREATOR EM MEIO FECHADO PARA A CULTURA DE MICRO-	França

	ORGANISMOS FOTOSSINTÉTICOS	
PI 1005782-0	CULTIVO DE MULTI-ESPÉCIES DE MICROALGAS PARA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO	Argentina
PI 1013474-3	MÉTODOS E SISTEMAS PARA A PRODUÇÃO DE LIPÍDIOS A PARTIR DE MICROALGAS	Argentina
PI 1000925-6	FOTOBIOREATOR PARA ABSORÇÃO DE CARBONO	Brasil
PI 0822482-0	FOTOBIOREATOR COM DISTRIBUIDOR DE LUZ E MÉTODO PARA A PRODUÇÃO DE UMA CULTURA FOTOSSINTÉTICA	Países Baixos
PI 0802511-8	SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR DUPLO FOTOVOLTAICO E DE AQUECIMENTO DE FLUÍDOS COM CONCENTRADOR DE RAIOS SOLARES PARA CALDEIRA DE AQUECIMENTO E ALTERNATIVA COM SISTEMA DE CONTROLE MICROBIOLÓGICO DE ULTRAVIOLETA DOS RAIOS SOLARES CONCENTRADOS	Brasil
PI 0303757-6	RASTREADOR SOLAR	Brasil
PI 0203201-5	RASTREADOR SOLAR I	Brasil
PI 0009764-0	FOTOBIOREATOR COM UM MELHOR APROVEITAMENTO DE LUZ ATRAVÉS DE UMA AMPLIFICAÇÃO DE SUPERFÍCIE, DE DESLOCADOR DE COMPRIMENTO DE ONDA OU DE TRANSPORTE DE LUZ	Alemanha

As patentes consideradas sem relevância com o estudo foram assim classificadas por trazer características como utilização para geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos, sistemas de agitação ou itens tão diversos como fluidos, alimentos produzidos a partir de microalgas ou mesmo a descrição de microorganismos modificados geneticamente. Ainda há as patentes que descrevem processos que utilizam microalgas, mas não detalham as características dos equipamentos, e sim descrevem as operações unitárias para a obtenção dos produtos desejados.

As patentes consideradas relacionadas com o tema podem ser divididas em duas categorias: as que descrevem sistemas de cultivo e as que descrevem sistemas de coleta de luz. 23 patentes se dedicam a descrever sistemas de cultivo de microalgas.

Tabela 4.4 – Quantidade de patentes sobre sistemas de cultivo e iluminação na base INPI

Patentes - sistemas de cultivo	Quantidade
Não definem sistema de iluminação	10
Uso de luz solar ou LED	3
Uso de luz artificial	5
Elementos ópticos de distribuição de luz	3
Sistemas abertos	2
Patentes – sistemas de iluminação	Quantidade
Rastreador solar	2
Sistemas parabólicos	2

Sistemas estáticos de coleta de luz natural exclusivamente para iluminação de ambientes não foram incluídas por não apresentar aplicação viável em sistemas de cultivo. Caso fossem aplicadas em tanques ou fotobiorreatores, a iluminação não seria distribuída adequadamente de forma a otimizar a absorção de luz além da superfície do meio de cultivo.

As patentes contabilizadas na tabela anterior contemplam sistemas de concentração ou rastreamento da luz solar, basicamente para complementação de iluminação de ambientes ou geração de eletricidade e aquecimento de fluidos, buscando maior eficiência energética.

Não foi encontrado na base de dados do INPI patente descrevendo sistema de rastreamento e captação de luz solar voltado especificamente para o cultivo de microalgas.

A quantidade de patentes por país de origem pode ser vista no seguinte gráfico.

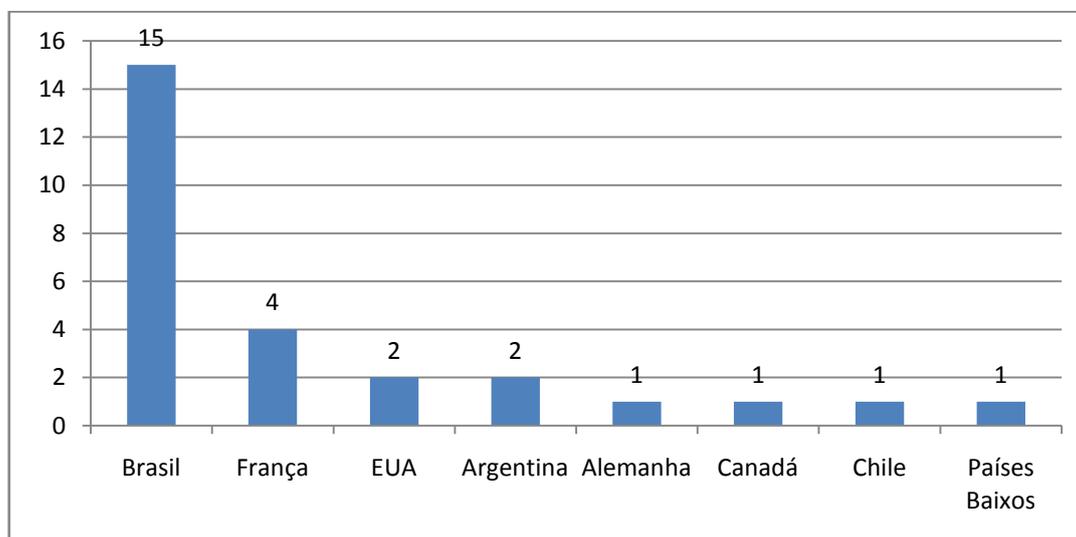


Gráfico 4.1 – Quantidade de patentes por origem geográfica dos depositantes– base INPI

A maioria das patentes prospectadas aborda tecnologias desenvolvidas no Brasil. Um pedido de depósito de patente pode ser protocolado em vários países, de acordo com a abrangência da proteção requerida por seu inventor, garantindo seus direitos de exploração. Um depósito de patente é feito por não residentes, ou seja, por pessoas ou empresas estrangeiras, quando há o interesse de exploração comercial no mercado brasileiro. Um depósito de patente também pode ser realizado em apenas um país, limitando sua abrangência geográfica e reduzindo custos. Entretanto, o depósito da patente de uma tecnologia em um país específico ajuda a impedir a concessão da patente a algum requerente em outro país que queira proteger a mesma tecnologia, pois a divulgação da primeira patente a torna “estado da

arte” e pedidos subsequentes não atenderiam ao requisito de novidade. Assim, poucos inventores estrangeiros teriam interesse em depositar suas patentes no Brasil.

Os dados obtidos indicam tendência inversa à observada na literatura. Garcez Júnior et al. (2015) mostram que há uma predominância de não residentes nos depósitos de patentes realizados no INPI.

IV.2 Patentes da base de dados *Derwent Innovations Index*

Na busca por patentes relevantes, foi feito o uso de combinações de palavras-chave para obter dados mais abrangentes. Uma mesma técnica ou equipamento pode ser descrito por diferentes termos. A busca por uma única descrição traria resultados incompletos, deixando de considerar patentes relevantes ao tema cuja redação incluiu termos distintos porém sinônimos ou com significados semelhantes. Por ser uma base internacional, o inglês foi o idioma usado para a inserção de palavras-chave. Por ser uma *língua franca* de fato, utilizada no meio técnico-científico em todo o mundo, os registros de patentes são traduzidos para o inglês, mesmo que tenha sido depositado em outro idioma.

IV.2.1 Busca simples

A busca foi feita inicialmente com combinações de termos no campo “Tópico”, pois a referida diversidade de termos pode deixar de revelar resultados se o levantamento for feito apenas no campo “Título”. Asteriscos (*) foram utilizados para pesquisar diversos termos semelhantes com variações em suas terminações.

A tabela 3.4 mostra a quantidade de patentes obtidas na base de dados internacional a partir do uso de diferentes palavras-chave para a busca por patentes.

Tabela 4.5 – Quantidade de patentes obtidas por busca simples na base *Derwent Innovations Index* de acordo com a palavra-chave empregada

Palavras-chave utilizadas	Quantidade de patentes obtidas
Microalgae light	15
Microalgae collect*	41
Photobioreactor collect*	2
Solar concentrat*	1.584

Alga* light reactor	7
Solar reactor	51
Alga* track*	2

Não foram encontradas patentes usando as seguintes expressões:

- Microalgae solar tracking
- Microalgae track*
- Photobioreactor track*
- Microalgae light collect*
- Microalgae solar collect*
- Microalga* solar concentrat*
- Alga* solar concentrat*
- Alga* light concentrat*
- Alga* solar reactor
- Alga* solar track*
- Alga* Fresnel

Sistemas de coleta e distribuição de luz para cultivos de microalgas são usados principalmente em sistemas de cultivo fechados (PBR), mas também podem ser aplicados em sistemas abertos. Assim, a maior parte das combinações de palavras-chave pesquisadas usou o termo “alga*” ou “microalga*”, em vez de “photobioreactor”, para definir o objeto de interesse.

A busca por palavras-chave fez uso de termos que pudessem referir a diversas formas de nomear especificamente os sistemas de coleta e distribuição de luz para o cultivo de microalgas, mas os termos também podem se referir a outros sistemas ou processos, sem relação com o escopo do trabalho.

O uso da palavra-chave “collect*” poderia trazer resultados para as expressões “collector”, “collecting” e “collection” (coletor, coletando, coleta), junto aos termos “microalga*” e “photobioreactor”. O termo, no entanto, também trouxe resultados referentes a sistemas de coleta de microalgas, ou seja, a sua retirada de um sistema de cultivo.

As palavras-chave “solar reactor” foram usadas com o objetivo de se referir a um reator de cultivo de microalgas que emprega a luz solar. Entre os resultados, no entanto, havia

patentes de reatores fotoquímicos, sem agentes biológicos. O uso da expressão “solar concentrat*” trouxe grande quantidade de patentes, mas as tecnologias descritas possuem vasta abrangência de utilização sem necessária relação com microalgas, incluindo a geração de energia elétrica, a iluminação de ambientes e métodos de análise química. A expressão “alga* Fresnel” foi utilizada no trabalho porque uma das formas de concentração de luz é o emprego de lentes de Fresnel. No entanto, neste caso o resultado não trouxe patentes.

Das patentes obtidas, 32 foram consideradas tendo alguma relevância com o tema proposto. A tabela abaixo lista as patentes e as palavras-chave usadas.

Tabela 4.6 – Patentes relevantes obtidas por busca simples na base de dados *Derwent Innovation Index* – número, título e palavra-chave

Número	Título da patente	Palavra-chave
CN203668367-U	Micro-algae light biological reactor has bubble box which is arranged on upper cavity of transparent glass tank, and pneuma pump which is connected with air box through air tube	microalgae light
CN204727884-U	Film bioreactor of high density culture coupling pre micro-algae, comprises light bioreaction device, illumination device, gas supply device, membrane osmosis device, filter groove, liquid collecting device, and micropore aeration tube	microalgae light
CN203904331-U	Lower intensive mode bucket bait microalgae light biological reactor device, has pH value regulating port fixed with liquid outlet, lamp tube mounted with outer part of bucket, and control box fixed with LCD screen and circuit plate	microalgae light
CN106957790-A	Pipeline useful for cultivating microalgae photo-biological reaction comprises e.g. a straight pipe, elbow, where many of straight pipe through joint connected to form a serpentine pipe, and straight pipe made of transparent guide	microalgae light
CN205590421-U	Light reaction experimental device for microalgae sewage treatment, has water inlet pipe that is connected with inlet of microalgae light reaction tube, and water outlet pipe that is set with outlet of microalgae lightreaction tube	microalgae light
KR2016056737-A	Carbon dioxide reduction effect enlargement operating system has photo-bioreactor to which carbon dioxide is supplied is converted to biomass or carbon dioxide which is melted in culture medium	microalgae light
CN104862207-A	Suspension bag-type microalgae light reactor of suspension bag type microalgae cultivation system, has separating line that is used for dividing internal space of transparent thin film bag having closed end into several space portions	microalgae light
CN204097480-U	Tube for microalgae light biological reactor, has inner pipe wall surface, in which liquid stir bulge is equipped, where support rib that is equipped with spiral bump, in which thread pitch is formed, and is equipped with circular pipe	microalgae light
CN203999590-U	Microalgae light biological reactor comprises reactor frame, pedestal flange provided with cylinder, spring, cylindrical lamp holder, upright post, upper flange cover, ventilation hole, and mounting lamp tube at center of cylindrical lamp	microalgae light
CN203877974-U	Micro-algae based biogas purification photo-bioreactor has liquid storage tank whose bottom portion is set with lighting device, while inner portion of tank is set with sterilizing device, pH sensor, and illumination sensor	microalgae light
KR1469828-B1	Method for light culturing and harvesting microalgae, involves culturing microalgae in culture solution, irradiating, harvesting rough microalgae, utilizing light source followed by	microalgae light

	subjecting into tank, adding flocculant and harvesting	
CN103885468-A	Controller for regulating microalgae and aerobic fermentation gas in ecosystem, has light biological reactor and fermenting reactor that are controlled so that concentration of gas in closed artificial ecosystem is set in nominal level	microalgae light
CN102297842-A	Method for fast detecting grease content of microalgae e.g. salt algae, involves utilizing suitable dyeing program and detecting method for detecting oil content of microalgae, and centrifuging and collecting microalgae in culture solution	microalgae light
CN105602850-A	Semi continuous culturing large-scale desert oil producing microalgae comprises e.g. inoculating oil producing micro-algae growing to logarithm period into track pool culture medium, stirring and brushing floor for every 4 hours	alga* track*
CN205616876-U	Ladder differential microalgae reactor comprises multiple ladder system and trench system, where each ladder system comprises multiple steps which are arranged in layers, and each two adjacent ladders are provided with overflow port	alga* light reactor
CN205590527-U	Micro-algae sewage treatment system has primary settling tank, pre-processing tank, pump, micro-algae light reactor, carrier separation device, pump and separating machine which are connected in turn	alga* light reactor
CN205295351-U	Microalgae photobioreactor comprises tube light, light reaction tube bracket, light source plate, light source plate bracket, air-blowing system, algae solution circulation system, culture medium supply system and power control module	alga* light reactor
CN203820761-U	Hanging bag type micro-algae light reactor for photosynthetic micro-algae cultivation system, has main portion provided with transparent thin film bag whose inner space is provided with strip separating line	alga* light reactor
CN103954747-A	River phytoplankton and algae primary productivity measuring device, has sample reactive unit provided with algae light reactor, which is provided with floating and epitaxy algae light reactors, and power supply fixed with oxygen sensor	alga* light reactor
CN103109752-A	Device for experimenting minitype biological regeneration life safeguard system, has compression pump that is connected with membrane contactor and movable chamber of connecting pipe which is connected with air pump	alga* light reactor
WO2015179888-A1	Photochemical process e.g. photocatalytic and/or photosynthetic process for culturing and producing phototrophic microorganisms, comprises e.g. guiding reaction medium into reactor element, and connecting with bio-solar reactor	solar reactor
FR2945033-A1	Device for implementing a gasification process of a substrate containing carbon to produce a syngas composed of carbon monoxide and hydrogen, comprises a solar microwave reactor for pyrolysis/torrefaction, and a cyclonic reactor	solar reactor
US4415339-A	Gasification using solar reactor - with recycle of pyrolysis gases to give prod. free from hydrocarbon	solar reactor
MX3324-B	Photoelectrochemical solar reactor used for decontaminating sewage, comprises solar photoelectro-fenton, compound parabolic concentrators coupled to electrolyzer with filter type diamond electrodes doped with boron	solar reactor
DE102014210482-A1	Performing two sequential reversible chemical reactions in cyclic process, comprises e.g. reducing solid reactant in first reaction chamber by absorbing heat, oxidizing solid reactant by heating, and transferring heat into solid reactant	solar reactor
DE202005001733-U1	Solar reactor comprises a light-permeable photosynthesis tubular unit, a pressure raising unit having an inlet connected to the outlet of the tubular unit, and an oxygen outlet and regulating module having a hollow oxygen outlet unit	solar reactor
WO2008027980-A1	Method of partially reacting biomass particles to form product containing carbon monoxide and hydrogen used as fuel, involves flowing gas stream comprising entrained biomass particles at inlet of reaction shell and heating particles	solar reactor

WO2013096813-A1	Solar reactor e.g. solar thermo chemical reactor, useful for producing synthetic gas, comprises inner member disposed within outer member that has aperture for receiving solar radiation, where cavities are formed by members	solar reactor
US2013266502-A1	Splitting gas-phase reactant involves reducing and oxidizing active redox material at first and second temperatures and using first and second gases, respectively, in reactor under isothermal conditions	solar reactor
WO2014100134-A1	Non-sintering composite particle useful in reactor beds (fluidized and stabilized) and in beds employed in solar reactors, comprises a first non-metallic particle in which is dispersed a second non-metallic particle	solar reactor
DE19644992-C1	Solar cell with temperature control for optimum photochemical reaction or photosynthesis conditions - has multi-web plate with spaces containing functional layer of reaction medium and spaces containing temperature control medium, useful for solar reactor	solar reactor
US3998205-A	Solar reactor steam generator - has electrical generator to power electrolysis cell and burns electrolysis products to provide peak power	solar reactor

Das 32 patentes avaliadas, pôde-se obter informações sobre as técnicas abordadas, de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 4.7 – Quantidade de patentes obtidas por busca simples na base Derwent Innovations Index de acordo com o tema abordado pelo pedido de depósito

Tema ou característica	Quantidade de patentes
Concentrador de luz solar	1
Célula solar	1
Sistema de cultivo. Iluminação LED	6
Sistema de cultivo. Não define iluminação	13
PBR transparente	3
Controlador de processo	1
Método analítico	1
Descrição de reações químicas	4
Descrição de processo	1
Gerador de vapor	1

Um breve comentário pode ser feito acerca das patentes encontradas. A patente WO2008027980-A1 aborda um concentrador de luz solar, mas seu objetivo é descrever um processo. A patente DE19644992-C1 trata de células solares, mas sem sistema de rastreamento. 13 patentes citam o uso de sistemas de iluminação para cultivo fototrófico, mas não os definem. 6 patentes especificam a iluminação artificial por LED em seus sistemas de cultivo. 3 patentes descrevem fotobiorreatores transparentes, a serem expostos à luz do sol.

IV.2.2 Busca avançada

O levantamento com uso da ferramenta de busca avançada foi realizado utilizando entradas inseridas em formato próprio para tal ferramenta, da seguinte forma:

TS=(solar AND alga*) AND IP=(C12M* OR C12N*)

TS representa pesquisa por tópico, IP representa pesquisa por código IPC. Os termos “solar” e “alga*” foram usados, assim como os códigos IPC C12M e C12N, e suas subdivisões. O código IPC C12M abrange equipamentos para uso em microbiologia e enzimologia. O código C12N aborda microorganismos, enzimas e métodos de propagação ou preservação de microorganismos.

A seleção dos termos da busca avançada procurou obter registros de patentes de tecnologias que abordassem o uso da luz solar por algas. A inserção dos códigos IPC restringiu os resultados a técnicas relativas a cultivo de microorganismos, notadamente as microalgas.

O levantamento trouxe como resultado 215 patentes. Ainda assim, muitos registros se dedicam a descrever sistemas de cultivo sem definição detalhada de sistemas de iluminação. 54 patentes foram avaliadas por apresentarem termos relevantes ao assunto do presente trabalho.

Tabela 4.8 - Patentes relevantes obtidas por busca avançada na base de dados *Derwent Innovation Index*

Número	Título da patente	Obs.
WO2009018498-A2	Illumination system useful in biomass reactor for cultivating photosynthetic organisms e.g. prokaryotic algae, comprises an optical transparent waveguide, a solar energy collector coupled to the waveguide, and light sources including LEDs	Sem rastreamento
WO2007070452-A1	New bioreactor comprising lighting system having light-emitting substrates, useful for cultivating photosynthetic organisms	Com concentrador solar
WO2010138657-A1	Bioreactor apparatus for biofuel production comprises light collector is mounted adjacent gap between containers for receiving incident light and conveying light through optical waveguides to distributors mounted near lower end of substrate	Com concentrador solar
WO2010115944-A1	Apparatus for removing carbon dioxide, comprises photosynthetic organisms for converting carbon dioxide, envelope for accommodation of the organisms in inner space of the envelope, and unit for introducing sun light into the inner space	Sem rastreamento
WO2013078106-A1	Enhancing-the growth of a plant, involves growing the plant in the presence of light reflecting/light refracting member such that the light reflecting/light refracting member redistributes light toward, the plant	Sem rastreamento
WO9711154-A1	Solar photo-bio-reactor algae prodn. assembly - has substrate on wind powered frame, regularly rotated away from sun, minimises algae photo-inhibition, enhancing efficiency of the prodn. Process	Sem rastreamento
WO2010132955-A1	Photosynthetic growth apparatus for performing photosynthesis comprises at least one solar collector, at least one growth area, a wavelength converter, and a light modulator	Com concentrador solar

	configured to control irradiation of the photosynthetic material	
WO2009149519-A1	Cultivating phototropic microorganisms, e.g. microalgae or diatoms in bioreactor, by entraining microorganism culture in tenuous, gelated, thixotropic carrier medium, providing and selectively varying process parameter control units	Sem rastreamento
US2015053366-A1	Method for optimizing energy within dissipative structure, involves managing exchanges of energy and mass over time, simple diffusion and microclimates, concentrating solar energy, storing and transporting mass utilizing building system	Sem rastreamento
US2014345341-A1	Converting biomass to liquid fuels and cyanobacteria based biofertilizer involves liquefying biomass feed by hydroprocessing feed to form hydrocarbon liquids; producing biochar and algae; and incorporating biochar and algae	Processo
EP2883950-A1	Light system for aquatic photosynthetic organisms growth, has computer that is configured to combine three colors with each other to obtain wide range of different colors in visible spectrum	Sistema de controle da luz
WO2010086310-A2	Device for culturing algae with natural light, comprises enclosure with culture medium and algae, substrate for receiving solar radiation to perform photoconversion, carbon dioxide source, and concentrator of incident solar energy	Sem rastreamento
FR2978159-A1	Photo-bioreactor, useful for the production of concentrated algal solution e.g. photosynthetic biomass fuel in closed circuit, comprises container containing algal solution, and algal solution exposing unit comprising first sleeve	Sem rastreamento
US2011174730-A1	System for purifying wastewater such as sewage from municipal, agricultural and industrial sources, comprises movable wastewater container, active and/or passive sun trackers, fluid inlet and outlet pair, and gas inlet	Placas com rastreamento
JP6062691-A	Culturing system for algae, providing carbon dioxide, for algal photosynthesis in region receiving insufficient solar energy - has light transmitted through optical fibre having plastic clad layer of decreasing thickness in light travelling direction	Distribuição de luz
FR3033799-A1	Bioreactor, used to produce biomass from algal cell culture, comprises light source and container comprising culture medium dispersed with cell culture of algal cells, and each algal cell has minimal absorption at specific light wavelengths	Distribuição de luz
WO2009091827-A2	Static asymmetric compound parabolic concentrator for use in algae bioreactor for e.g. bio-diesel generation, has two reflective surfaces whose top edges are parallel with one another and bottom edges are parallel with one another	Concentrador de luz estático
WO2008151373-A1	Algal oil production by control growing, farming algae using primarily sunlight, and processing algae, where at least one of steps includes use of bag to be interconnected to gas/liquid flows of water, carbon dioxide, oxygen, and/or air	Processo
WO2009002772-A2	Bioreactor for producing biomass product comprises container for culturing photoautotrophic organism; light source configured to emit wavelengths; light conducting channel; harvest port; energy converter for production of electrical energy	Com concentrador solar
JP2001269162-A	Direct light reception and condensing type culture apparatus for algae cultivation, has solar light beam condensing device provided above a dome-shaped wall	Rastreamento solar
WO2007118223-A2	Generation of electricity for growth and stress phase of algae and for driving turbine, by concentrating sunlight to first level of solar flux, selecting portion of spectrum of light resulting from it, and using it to photostress organism	Com concentrador solar
DE3922656-A	Light-radiator for controlled re-radiation of sunlight - has spirally grooved probe fed by fibre optic cable providing effective distribution in poorly transparent media	Lentes de Fresnel (Himawari)
DE102009015925-A1	Photobioreactor to cultivate and reproduce phototrophic organisms in liquid phase by reacting with gaseous, solid and/or liquid additive during illumination with sun- and/or artificial light, comprises controlling device and solar elements Photobioreactor to cultivate and reproduce phototrophic organisms in liquid phase by reacting with gaseous, solid	Sem rastreamento

	and/or liquid additive during illumination with sun- and/or artificial light, comprises controlling device and solar elements	
JP2000060533-A	Culture tank with sun light-guide optical system - comprises condenser and light-guide plate to focus sun light to bottom of culture tank	Distribuição de luz
WO2016080932-A1	Solar bioreactor useful for growing photosynthetic organisms, has heliostats, concave mirror, column type bioreactor (photobioreactor), open pond type bioreactor, illumination/heating system, and fiber optical wires	Fresnel - sist. aberto e fechado
CN107118953-A	Solar thermo-chemical conversion system used in biological and chemical fields, has waste heat recovery heat exchanger that is connected with solar heat collector, fermentation device and oil extracting device	Coletor de calor
CN105462816-A	Runway pool micro-algae reactor for realizing uniform sunlight frequency distribution, has nano-light guide plate that is arranged with runway middle partition, and aeration pipes that are arranged between light paths	Com concentrador solar
WO2016060650-A1	Method for autotrophic algal growth, involves irradiating reaction medium in light reactor zone with photosynthetically active radiation for absorption by algae in algae-containing medium for algalphotosynthesis	Sem rastreamento
CN205137337-U	Leading-in system for micro-algae culturing in sunlight room, has filter device which is located on upper end or lower end of high energy light spot transmitting device which is mainly composed of colors	Com concentrador solar
WO2015015372-A1	Integrated system useful for cultivation of algae or plants and production of electric energy, comprises luminescent solar concentrator in which photovoltaic cell is positioned on its outer sides and cultivation area	Com concentrador solar
CN204022811-U	Open track pool for increasing microalgae cultivation efficiency, has cover wall that is set up with multiple holes, and air pump and liquid level meter that are connected to central controller	Sistema aberto
JP2014154871-A	Solar-energy collection based multi-purpose automatic roof installed in vehicle, has subservo-motor that is set in photoelectric conversion element group panel in which movable control of solar panel is carried out	Rastreador solar – eletricidade
US2014342443-A1	Cover over growing tubes that shades tubes from excessive heat in summer, used in production of algae, comprises roof panels that slope upward towards south, to provide shade during hot summer days and admit full sunlight during winter days	Cobertura p/ regular luz
US2014123552-A1	Sun-tracking light distributor system for closed photo-bioreactor for photosynthetic culture in water to produce algae, has displacement system for changing orientation of system walls to track solar position with respect to system axis	Distribuição de luz
CN203290025-U	Algae farming equipment has transparent housing whose upper portion includes illumination device and inner portion comprises funnel type culture device that is equipped with developing device, stirring device and power supply	Com concentrador solar
US2013323713-A1	Sun-tracking light distributor system, useful in e.g. closed photo-bioreactor for photosynthetic culture for producing algae, comprises light distribution walls made of transparent material, and a displacement system connected to the walls	Com concentrador solar
CN102816699-A	Light-harvesting method for cultivating algae, carried out in a hollow cylindrical culture system, which is installed with a reflecting plate	Sem rastreamento
US2013219781-A1	Sun-tracking light distributor system for use in open-ended photo-bioreactor, has displacement system that changes orientation of light entry surface of concentrator supporting section to track solar position with respect to one axis	Distribuição de luz
WO2013019330-A1	Solar-redshift module e.g. photovoltaic solar-redshift module, for converting incident solar radiation into wavelengths, comprises collecting target comprising growth vessel, photovoltaic plate, quantum dot vessel and focusing device	Conversor de radiação solar

US2012156762-A1	Photobioreactor system to grow algae comprises bioreactor including bioreactor tubes having ends joined by connector units; solar concentrator; light guide to illuminate hollow portion of connector unit; and LED to illuminate connector unit	Concentrador de luz
WO2012067995-A2	Optofluidic photobioreactor for optically exciting photosynthetic microorganism to generate biofuel, biofuel pre-cursor or biomass from optically-excited photosynthetic microorganism, comprises optical waveguides, and light inputting unit	Com concentrador solar
CN202193783-U	Microorganism culturing system comprises optical bioreactor in which microorganism is cultured in bioreactor; and solar cell device for adjusting solar radiation reaching bioreactor, where device is solar cell panel covered above bioreactor	Placa solar
WO2012016208-A1	Collection of solar energy, comprises providing algal culture contained within first photobioreactor, exposing surface of first photobioreactor to first light source, and estimating algal mass algal culture exposed to first quantity	Luz solar ou LED
CN201751415-U	Algae culturing device comprises light collecting cup for collecting light, dispersing cup, light guiding pipe for connecting the light collecting cup and hollow continuous S-shaped culturing tube for containing algae and culturing solution	Sem rastreamento
WO2010030953-A2	Algaculture system for generating biofuel, comprises a pump/tank assembly having a mixer, a solar collector comprising interconnected tubes, axial vortex flow generators, a continuous harvester, a nutrient replenisher and pH adjuster	Sem rastreamento
CN1341707-A	Application technique of solar collector in microfine algae cultivation	Sem rastreamento
EP181622-A	Fish breeding plant - with algae cultivating device using photo synthesis process fed by solar ray collector	Cultivo de algas para alimentação de peixes
JP2001231538-A	Photosynthesis culture apparatus for phototroph such as micro algae for production of fertilizer, comprises culture tank with optical dispersion support, and retractable separation mechanism for dividing tank	Distribuição de luz
JP5244932-A	Culture of algae using smaller scale equipment - comprises piling up algae culture vessels on shelves in room held at optimum temp. then distributing solar light focussed on receiving plate using optical fibres	Distribuição de luz
WO2014191939-A1	Sun-tracking light distributor system for use in photosynthetic culture in aqueous liquid, has pivot assembly that causes change in inclination of light distributor in tank in response to change of level of aqueous liquid in tank	Distribuição de luz
US2014356931-A1	Culturing of microalgae involves providing consortium of living species of microalgae, culturing consortium under illumination in controllable bioreactor under non-sterile aqueous culture conditions, and controlling culture conditions	Com concentrador solar
AU2010201428-B2	Solar cell used to convert solar energy into electricity comprises asymmetric compound parabolic concentrator; photovoltaic cell positioned near exit aperture such that light incident at concentrator is directed toward photovoltaic cell	Energia elétrica
WO2003038348-A1	Adaptive full spectrum solar energy system, useful for capturing incident solar radiation, comprises hybrid solar concentrator(s), hybrid luminaire(s), hybrid photobioreactor(s), light distribution system, and control	Com concentrador solar
US2014123552-A1	Sun-tracking light distributor system for closed photo-bioreactor for photosynthetic culture in water to produce algae, has displacement system for changing orientation of system walls to track solar position with respect to system axis	Distribuição de luz

Das 54 patentes avaliadas, 14 não possuem sistema de rastreamento solar, 16 possuem sistema de concentração de luz, 9 descrevem sistemas específicos de distribuição de luz, 4 tratam de sistemas diversos, como a coleta de calor emitido pelo Sol ou cobertura para

regular a luz incidente na cultura de microalgas. Cinco patentes abordam sistemas de rastreamento do Sol para a distribuição interna de luz ou para geração de energia elétrica para alimentação do sistema, com aparelhagem fixa (JP2001269162-A) ou com uso de lentes de Fresnel (DE3922656-A, WO2016080932-A1). Três patentes abordam processos, sem descrever equipamentos em detalhes. Uma patente (AU2010201428-B2) aborda concentradores parabólicos para a concentração de luz em células fotovoltaicas. Uma patente (CN204022811-U) descreve sistemas abertos de cultivo de microalgas. Uma patente (CN202193783-U) apresenta sistemas de cultivo de microalgas montado em placas direcionais expostas ao Sol. Uma patente (EP181622-A) trata de um sistema de cultivo de algas para alimentação de peixes.

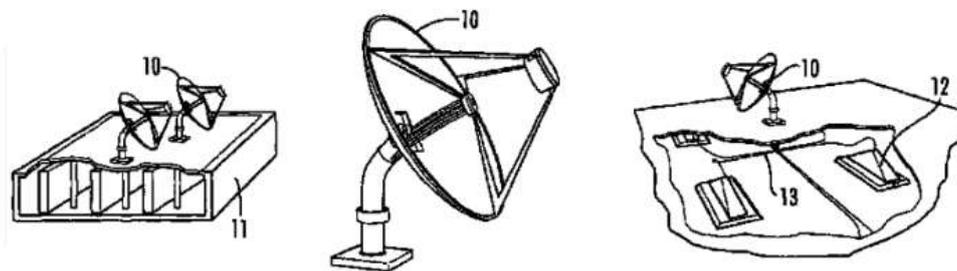


Figura 4.1 – Concentradores solares parabólicos instalados em fotobiorreatores (Patente WO2003038348-A1)

A origem geográfica dos inventores das patentes, a evolução temporal geral e a dos países com maior número de patentes são descritas nos gráficos abaixo.

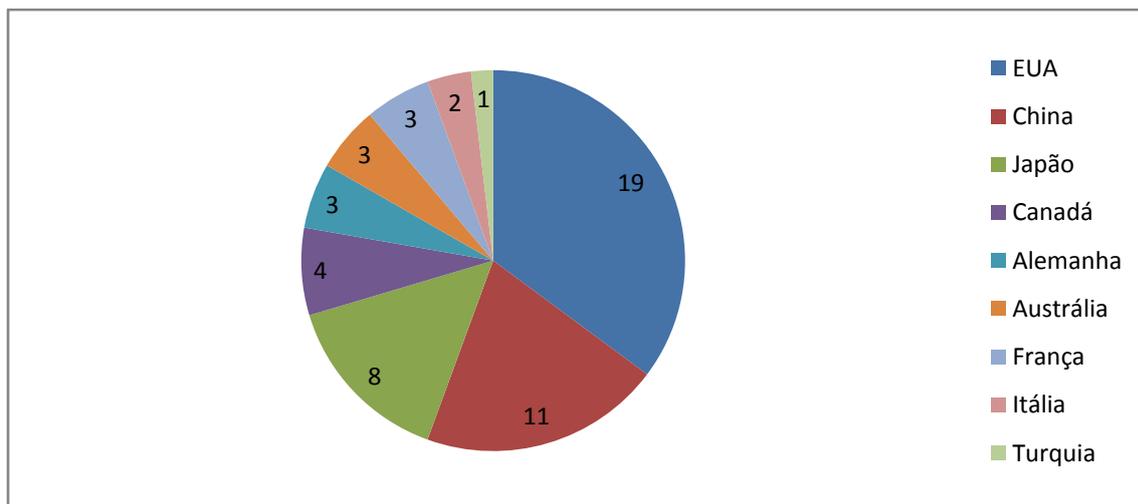


Gráfico 4.2 – Número de patentes obtidas em busca avançada à base *Derwent Innovations Index* em relação ao país de depósito.

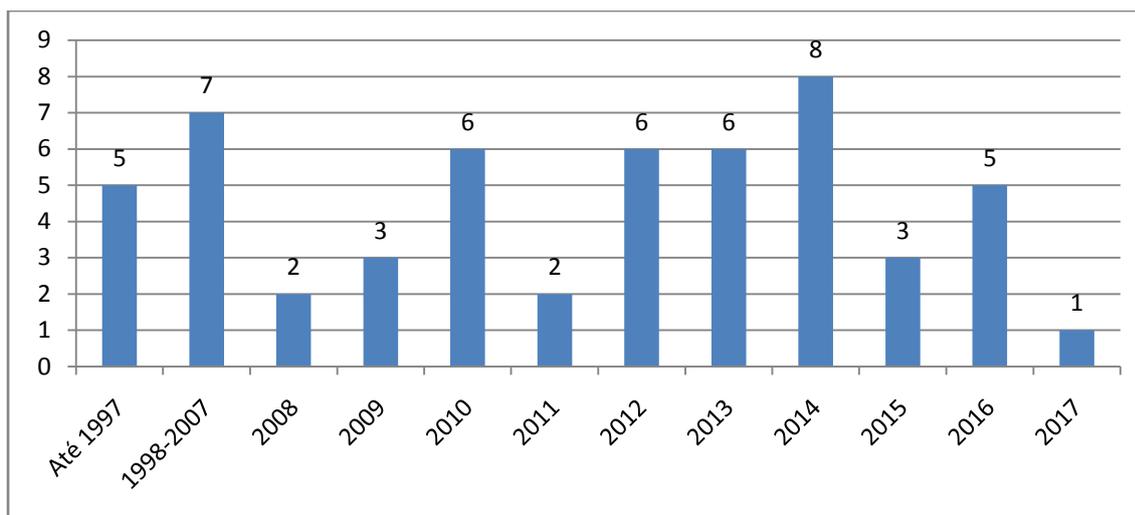


Gráfico 4.3 – Número de patentes obtidas em busca avançada à base *Derwent Innovations Index* em relação ao ano de depósito.

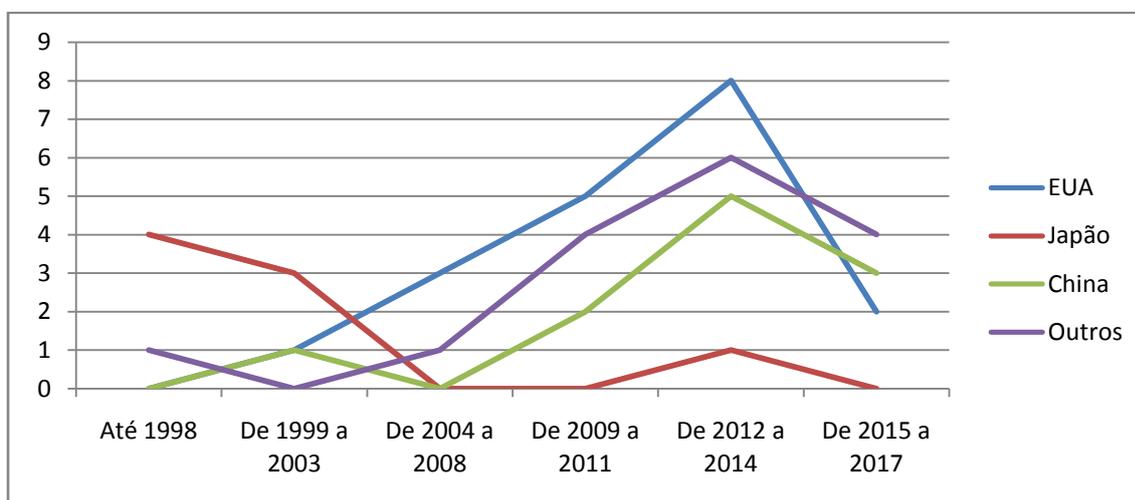


Gráfico 4.4 – Evolução do número de patentes depositadas de acordo com o país de depósito ao longo do tempo. Dados de busca avançada, base *Derwent Innovations Index*.

O maior número de patentes (19) vem dos Estados Unidos, o que reflete um grande interesse por pesquisa e desenvolvimento nessa área. A China possui 11 patentes, mostrando o esforço crescente nos últimos anos para desenvolver suas próprias soluções tecnológicas no ramo. O Japão foi pioneiro no desenvolvimento tecnológico de sistemas de cultivo de microalgas, o que justifica o alto número de patentes comparado com outros países, mas sua produção reduziu drasticamente nos tempos recentes.

Informações sobre os depositantes das 54 patentes estudadas foram avaliadas. Os principais titulares são mostrados a seguir.

Tabela 4.9 – Principais depositantes das patentes obtidas através da busca avançada na base *Derwent Innovations Index*.

Depositantes	Quantidade de patentes
Institut National d'Optique (Canadá)	6
Bionavitas Inc. (EUA)	2
Chikyu Kankyo Sangyo Gijitsu Kenkyu (Japão)	2
Mori, K. (Japão)	2
Universidade de Chongqing (China)	2

As 54 patentes avaliadas foram depositadas por 45 titulares diferentes. A tabela 4.9 mostra apenas os depositantes com mais de uma patente registrada, tendo os outros titulares apenas uma patente depositada. Entre os inventores, não há quem tenha mais de duas patentes de sua autoria entre os registros obtidos na busca avançada.

IV.3 Artigos publicados

A busca realizada na base *Scopus* foi feita através do emprego de palavras-chave em inglês relacionadas com o tema.

Para obter resultados sobre sistemas relacionados a culturas de microalgas, foi utilizado o termo “microalgae culture system”, presente no título, resumo ou palavra-chave. A busca não foi realizada somente em um dos campos para permitir a obtenção de resultados mais abrangentes devido às diversas formas possíveis de descrição de um objeto de estudo específico. Foram obtidos 1.461 documentos como resultado.

Tabela 4.10 – Quantidade de documentos relacionados a sistema de cultura de microalgas por área de estudo – base *Scopus*

Área de estudo	Quantidade de artigos
Ciências Biológicas e Agricultura	476
Ciências Ambientais	431
Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	404
Engenharia química	391
Energia	212
Imunologia e Microbiologia	211

Engenharia	190
Química	121
Medicina	60
Ciências da Terra e Planetárias	56
Física e Astronomia	53
Ciência dos Materiais	39
Ciências da Computação	35
Farmacologia, Toxicologia e Farmacêutica	22
Matemática	21
Multidisciplinar	16
Ciências Sociais	6
Negócios, Gerenciamento e Contabilidade	4
Veterinária	3
Economia, Econometria e Finanças	2
Ciências da Saúde	2
Neurociência	2
Artes e Humanidades	1
Enfermagem	1
Não definido	4

Os tópicos aos quais os artigos foram associados abordam variadas áreas do conhecimento, mas a soma dos artigos na tabela 4.9 dá o total de 2.763, maior que a quantidade de artigos encontrados. A discrepância ocorre porque muitos dos artigos foram classificados tendo em vista mais de um tópico de interesse. Isso mostra que, segundo seus pesquisadores, o estudo sobre sistemas de microalgas não é algo restrito a um campo tecnológico.

A presença de um documento entre os resultados obtidos com a busca por sistemas de microalgas não implica necessariamente que o assunto abordado naquele texto é o desenvolvimento do sistema de cultivo. Os termos podem fazer parte de trabalhos focalizados no estudo de uma microalga específica ou de uma nova aplicação para a biomassa, por exemplo. Nesses casos, a menção aos sistemas de cultivo seria feita na descrição da forma de obtenção das microalgas, sem inovação particular dedicada a tais sistemas.

Os dados da análise temporal dos artigos são exibidos a seguir.

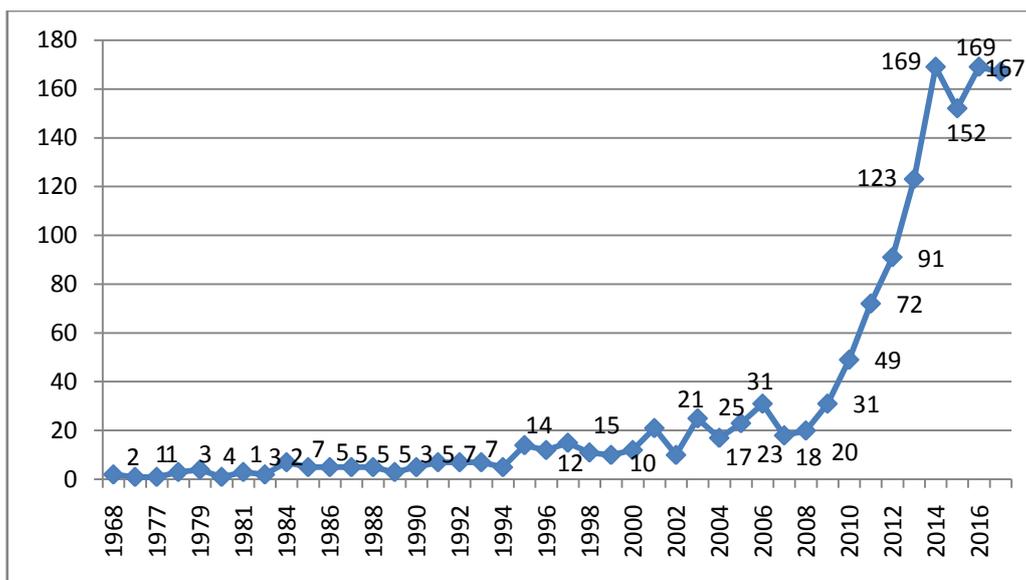


Gráfico 4.5 – Quantidade de artigos relacionados a sistemas de cultivo de microalgas publicados a cada ano – base *Scopus*

Considerando o número de artigos publicados como reflexo do interesse por determinada área de pesquisa, percebe-se um pequeno crescimento durante os anos 1980 em relação aos estudos iniciais. A partir de 1995 começaram a ser divulgados mais textos, com uma acentuada curva de crescimento depois do ano 2008, com um máximo em 2014. Nos anos 2016 e 2017 o número de textos publicados permaneceu praticamente constante. Os dados de 2018 não foram mostrados, por estarem incompletos.

Os dados também foram avaliados de acordo com sua origem geográfica. O gráfico 4.6 mostra os 15 países com a maior quantidade de artigos divulgados.

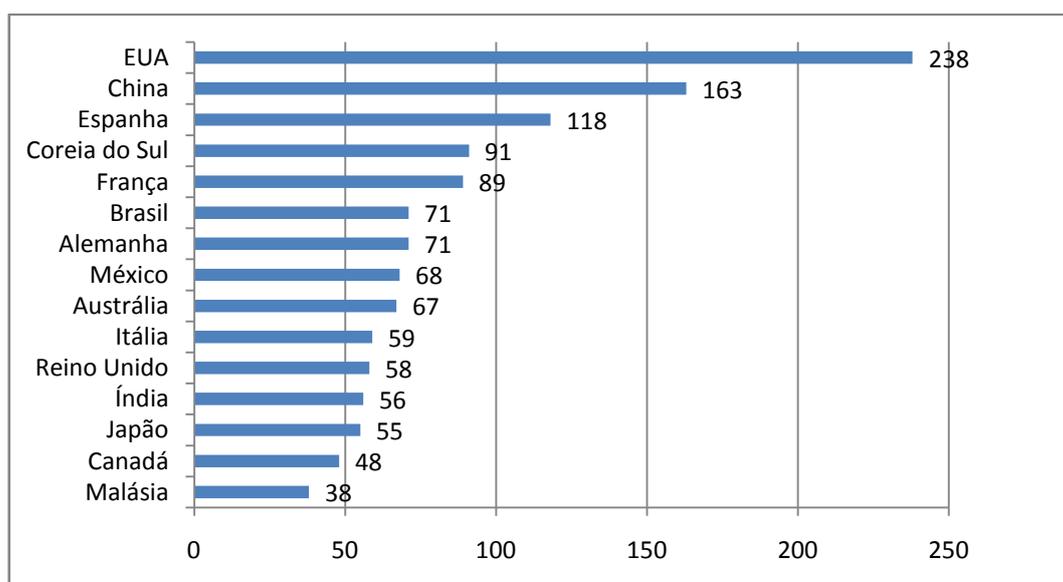


Gráfico 4.6 – Quantidade de artigos relacionados a sistemas de cultivo de microalgas publicados por país – base *Scopus*

A liderança na publicação de textos científicos pertence aos Estados Unidos, com 238 resultados. A China é a segunda maior produtora de conhecimento relacionado a sistemas de cultivo de microalgas. O Brasil aparece em sexto lugar, empatado com a Alemanha, com 71 textos cada.

As instituições aos quais os autores dos documentos publicados são afiliados também foram alvo de análise. As treze principais estão listadas a seguir.

Tabela 4.11 – Instituições com maior quantidade de artigos publicados relacionados a sistemas de cultivo de microalgas – base *Scopus*

Instituição	Número de artigos
Universidad de Almería	39
Chinese Academy of Sciences	38
CNRS Centre National de la Recherche Scientifique	28
Wageningen University and Research Centre	22
National Cheng Kung University	20
INRIA Sophia Antipolis	19
Murdoch University	18
Korea Advanced Institute of Science & Technology	17
Korea University	16
Universiteit Gent	16
Consiglio Nazionale delle Ricerche	15
University of Queensland	14
Universidad Nacional Autonoma de Mexico	14

A Universidad de Almería é a instituição com maior número de textos publicados, apesar de a Espanha estar em terceiro na lista de países com maior produção científica.

A busca na base de dados *Scopus* pela expressão “microalgae photobioreactor” teve como resultado 1.765 documentos, um número maior em relação à pesquisa com as palavras “microalgae culture system”, com 1.461 títulos como resultado. A pesquisa pelos termos “microalgae open culture” obteve 351 textos em retorno. A quantidade menor reflete o baixo interesse pela pesquisa em sistemas abertos de cultivo em comparação com fotobiorreatores.

A utilização das palavras-chave “microalgae culture system” teve como objetivo obter informações sobre sistemas nos quais há culturas de microalgas, sem especificar o tipo aberto ou fechado de cultivo. Para avaliar o interesse em pesquisas para os dois métodos, foi realizada uma comparação entre os resultados das buscas por fotobiorreatores e sistemas abertos.

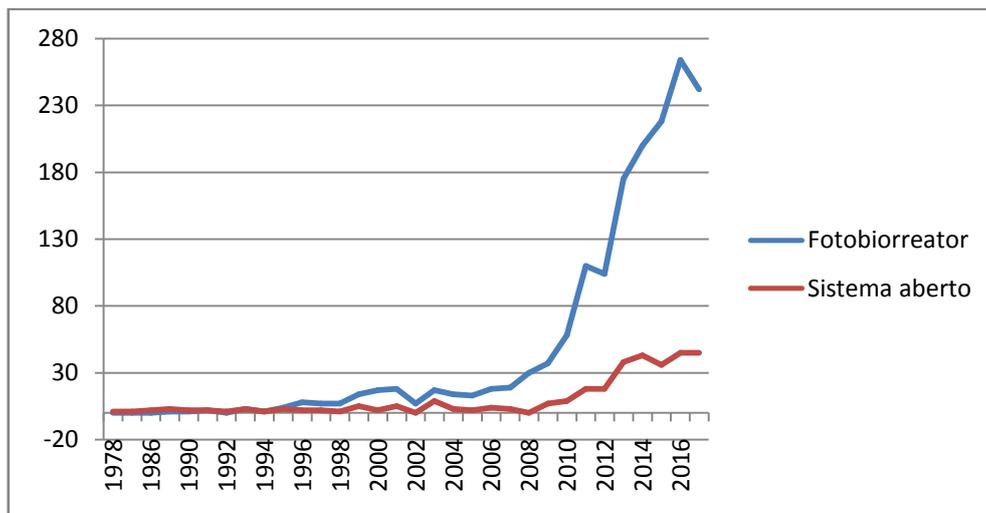


Gráfico 4.7 – Evolução temporal da quantidade de artigos publicados relacionados a sistemas de cultivo de microalgas – base *Scopus*

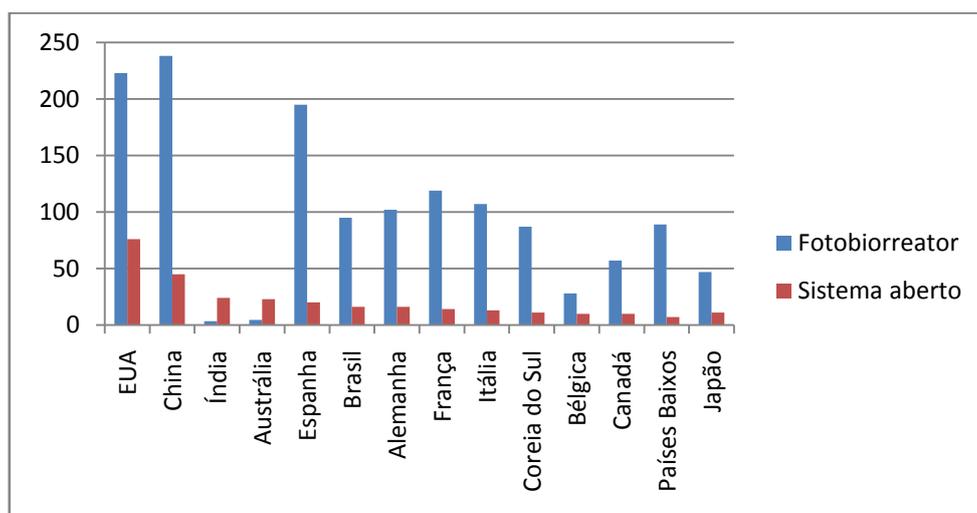


Gráfico 4.8 – Comparação por país da quantidade de artigos publicados relacionados a sistemas de cultivo de microalgas – base *Scopus*

Há registro de artigos sobre sistemas abertos publicados desde 1978, enquanto que o termo “fotobiorreator” só começou a ser utilizado a partir de 1988. A diferença de números de artigos entre os dois só começou a se acentuar a partir de 1995, sendo que desde então a divulgação científica sobre sistemas fechados passou a ser muito mais prolífica. Os dados apontam um maior interesse pelo desenvolvimento de sistemas fechados de cultivo por suas vantagens em relação a sistemas abertos, notadamente: melhores condições para controle dos parâmetros de cultivo, menor risco de contaminação, maiores eficiência e produtividade.

A grande quantidade de artigos relacionados a fotobiorreatores indica que a tecnologia de sistemas de cultivo fechados possui maior potencial de desenvolvimento, com avanços a serem realizados. Estes dados também sugerem que tal potencial já foi identificado e está sendo explorado.

Considerando todos os sistemas de cultivo juntos, os Estados Unidos são o país com o maior número de artigos publicados. A China, no entanto, lidera a divulgação de informações de desenvolvimento científico de fotobiorreatores, revelando o seu foco nas pesquisas sobre este tipo específico de sistema. A Espanha é outro país que tem se dedicado bastante aos estudos de sistemas fechados de cultivo. A tendência inversa, ou seja, uma maior quantidade de textos sobre sistemas abertos em comparação com modelos fechados é observada em alguns países, em especial a Índia e a Austrália, países com condições geográficas mais favoráveis a esses tipos de cultivo. Neste último país há plantas comerciais de exploração de microalgas cultivadas em tanques abertos.

No presente estudo foi dada particular atenção a trabalhos dedicados a sistemas de cultivo de microalgas com sistemas de coleta ou distribuição de luz. Foi realizada a procura por textos com combinações de palavras-chave mais específicas.

Tabela 4.12 – Quantidade de documentos publicados com sistemas de coleta ou distribuição de luz para aplicação em cultivo de microalgas – base *Scopus*

Tópico	Palavras-chave	Quantidade de documentos
Rastreador solar	“microalgae sun tracker”	3
Distribuidor de luz	“microalgae light distributor”	1
Uso de lentes de Fresnel com microalgas	“microalgae Fresnel”	8

A expressão “microalgae sun tracker” trouxe três resultados. O texto divulgado por Alil et al. em 2017 na 26ª Conferência Internacional em Fibras Ópticas Plásticas descreve um sistema de rastreamento composto por uma lente de Fresnel circular, que concentra os raios solares em fibras ópticas. A luz coletada é transportada através de fibras ópticas até um

fotobiorreator de modelo novo. Segundo os autores, o sistema de coleta de luz também pode ser utilizado para auxiliar na iluminação de ambientes. Este sistema está em desenvolvimento na Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE e Escola de Química).

O artigo de autoria de Hindersin et al. (2013), da Alemanha, e o artigo publicado em 2012 por Talbiez et al. (Polônia) descrevem fotobiorreatores de placa plana para a obtenção de produtos com aplicações farmacêuticas. As instalações possuem sistemas de rastreamento solar nos quais o próprio meio de cultivo é móvel e pode ser direcionado para a posição mais favorável em relação ao Sol, de modo similar a placas fotovoltaicas. O intuito é aumentar a quantidade de luz incidente e, por conseguinte, a produtividade. Os sistemas também podem reduzir a exposição à luz para evitar fotoinibição.



Figura 4.2 – Fotobiorreatores de placa plana direcionáveis (Hindersin et al, 2013)

A expressão “microalgae light distributor” trouxe um único resultado: um artigo publicado em 2008 na Chemical Engineering Journal, de autoria de Zijffers et al. (Países Baixos) no qual é descrito a simulação do caminho percorrido pela luz em um sistema de fotobiorreatores instalados com aparatos de coleta e distribuição de luz. A luz do Sol é coletada por lentes de Fresnel lineares reposicionáveis e distribuída através de guias transparentes com extremidades triangulares projetadas de tal forma a permitir a sua refração e reflexão internamente.

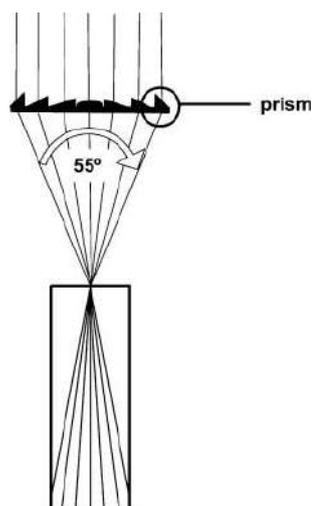


Figura 4.3 – Coleta de luz com uma lente Fresnel e guia de luz (Zijffers et al, 2008)

A utilização dos termos “microalgae Fresnel” trouxe oito documentos como resultado, sendo seis artigos, um capítulo de livro e uma publicação em anais de eventos. Este último não apresentava relevância, por mencionar lentes de Fresnel para painéis fotovoltaicos e cultivo de microalgas sem relação direta entre os termos.

Dos seis artigos obtidos, dois deles (Allil et al, 2017; Zijffers et al, 2008) já foram citados acima. Da Ponte et al. (2014) realiza estudos com fibras ópticas para a sua utilização em fotobiorreatores com luz solar concentrada por uma lente de Fresnel. Masojídek et al. (2009) explora fotobiorreatores tubulares com lentes de Fresnel instaladas de forma a manter a luz focalizada sobre o cultivo. Os outros dois artigos são publicações mais antigas descrevendo etapas anteriores dos trabalhos de desenvolvimento de Zijffers et al (2008) e Masojídek et al (2003).

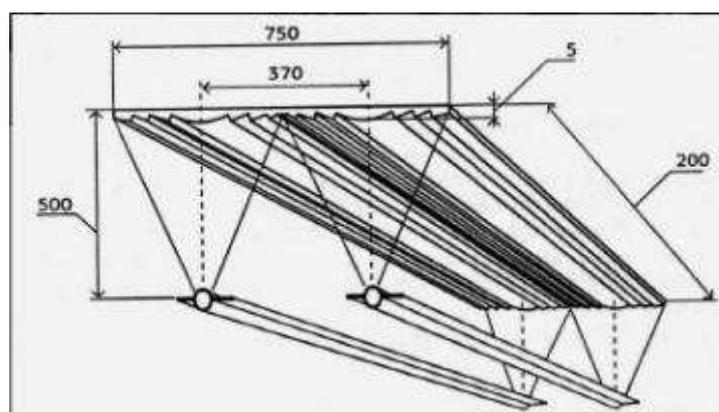


Figura 4.4 – Lentes de Fresnel lineares focalizando luz em fotobiorreatores tubulares (Masojídek et al, 2003)

CAPÍTULO V. CONCLUSÕES

O presente trabalho procurou fornecer uma breve visão geral sobre o ímpeto dos esforços de desenvolvimento de sistemas de cultivo de microalgas e métodos para aprimorar a quantidade de luz disponível nos meios de cultura. A busca por palavras-chave, entretantes, traz em meio aos resultados itens que não condizem com o tema proposto, apesar de estarem de alguma forma relacionados com os termos utilizados no levantamento. Assim, um grande número de documentos obtidos na pesquisa não traduz, necessariamente, uma quantidade expressiva de trabalhos dedicados a mitigar desvantagens dos sistemas em uso atualmente.

V.1 Considerações gerais

No âmbito das patentes com depósito protocolado no Brasil, a menção a sistemas de cultivo de microalgas ocorre em proporção baixa em comparação com registros em outros países. A maior produção científica e patentária é realizada, de forma geral, nos Estados Unidos e na China.

Na base de dados do INPI, os resultados variaram de acordo com o item avaliado. Nos títulos de patentes, há uma maior quantidade de registros com referências a fotobiorreatores, figura inversa à encontrada na avaliação de resumos de depósitos de patentes, na qual as menções a sistemas de cultivo de microalgas, sem especificação de tipo, são mais numerosas. O termo “fotobiorreator” é mais restrito e, por isso, mais utilizado no título, que precisa descrever de forma mais concisa a novidade tecnológica. A maioria das patentes encontradas foi depositada por solicitantes brasileiros. Não foram localizados registros de patentes no Brasil sobre aparatos de coleta ou distribuição de luz acoplados a sistemas de cultivo de microalgas.

A busca a nível mundial com uso da base de dados *Derwent Innovations Index* mostrou a liderança norte-americana e chinesa na iniciativa de aperfeiçoamento de inovações relacionadas a cultivos de microalgas. Nos primórdios do desenvolvimento deste nicho tecnológico, o Japão começou à frente, mas diminuiu drasticamente a produção patentária. Em relação à evolução temporal, os primeiros depósitos começaram a ser feitos nos anos 1980, com um aumento expressivo da quantidade a partir de 2010.

Foram encontradas mais de mil patentes dedicadas a aspectos inovadores aplicáveis a métodos de cultivo de microalgas. Não obstante, poucos registros abordam, especificamente, técnicas para aprimorar a disponibilidade luminosa no meio de cultivo. A maioria das patentes não detalha o sistema de iluminação empregado. Com a utilização da ferramenta de busca avançada, foram encontradas patentes específicas sobre sistemas de concentração de luz via espelhos parabólicos, lentes de Fresnel lineares e esféricas reposicionáveis e outros métodos mais simples. Do mesmo modo, os sistemas de distribuição luminosa atualmente desenvolvidos fazem uso de guias condutores de luz em forma de prisma ou fibras ópticas para aumentar a disponibilidade luminosa dentro do meio de cultivo e permitir projetos de fotobiorreatores compactos, com maior razão de volume por área, um conceito diferente do usual.

A avaliação, através da base *Scopus*, de artigos científicos publicados mundialmente sobre o tema, mostrou maior atenção dedicada a fotobiorreatores em detrimento de sistemas abertos de cultivo. Assim como nas patentes, nos artigos também houve um crescimento considerável do número de publicações a partir de 2010, revelando o aumento de interesse pelas tecnologias de cultivo, abertas e fechadas, sem sinal de arrefecimento recente.

O país com maior número de patentes e artigos sobre sistemas de cultivo são os Estados Unidos, com a China em segundo lugar. No entanto, o país asiático lidera os esforços de desenvolvimento de fotobiorreatores. Outros países na Europa, Ásia e América Latina também demonstram interesse na área, mas em um patamar aquém da capacidade atingida pelos dois países. Dentre as instituições, a que mais publica artigos sobre o assunto é a Universidad de Almería, na Espanha.

O crescimento do interesse por sistemas de cultivo de microalgas nos anos recentes é reflexo da busca por fontes promissoras de energia limpa, alimentos e produtos de alto valor agregado. Os meios atuais de cultivo de microalgas ainda não competem em larga escala com as fontes usuais, mas o esforço contínuo de aprimoramento científico e tecnológico prenuncia que, brevemente, a tecnologia necessária terá amadurecido e permitirá a expansão de seu uso. Possivelmente, a ponto de substituir os meios tradicionais por meios de produção mais eficientes, baratas e menos poluentes.

O número relativamente baixo de documentos dedicados a sistemas de coleta ou distribuição de luz em sistemas de cultivo sugere que tal tecnologia ainda possui desafios

técnicos a serem vencidos, como o aumento da eficiência do processo e a redução dos custos de construção e operação, entre outros. Os dados também sugerem que ainda não há grande interesse de grupos de pesquisa nesta área específica. Por outro lado, esta área de estudo possui potencial de desenvolvimento ainda não explorado, o que se traduz em oportunidades de avanço e perspectivas de liderança em um segmento que pode trazer grandes benefícios aos detentores dos conhecimentos técnicos específicos, podendo se tornarem referência na área. No Brasil, os esforços de pesquisa são liderados por equipes de trabalho de universidades públicas.

Os limites do conhecimento estão sendo expandidos, em parte por pesquisadores brasileiros, para novos horizontes, com novas perspectivas despontando a cada passo dado no aprimoramento tecnológico de sistemas de cultivo de microalgas. Patentes protegem inventos para garantir que aqueles que se dedicaram a esse esforço possam ser recompensados. Ainda assim, os benefícios da utilização de processos mais limpos e energeticamente eficientes serão sentidos por toda a sociedade.

V.2 Sugestões para trabalhos futuros

Atualizar continuamente as informações expostas. A área de estudo é abrangente e está em constante evolução.

Reformular termos e palavras-chave utilizadas nas bases de dados para reduzir o número de registros não condizentes com o tema entre os resultados de pesquisa de patentes e artigos.

Avaliar o mercado atual, tendências e perspectivas futuras, no Brasil e no exterior, para determinar o potencial de crescimento do uso de microalgas e, por conseguinte, de métodos inovadores de cultivo e sistemas de aprimoramento, como mecanismos de coleta de luz, em substituição a processos atuais e em novas aplicações. Nesta avaliação, aprofundar a análise sobre os titulares dos depósitos e autores de artigos, para obter um panorama relativo às instituições e empresas que estão à frente no desenvolvimento tecnológico do setor. As informações podem auxiliar a tomada de decisões em relação a iniciativas futuras de pesquisa.

Estudar as tecnologias de coleta e distribuição de luz para determinar os modelos aplicáveis a sistemas de cultivo de microalgas.

CAPÍTULO VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASZAADEH, Ahmad; GHOBADIAN, Barat; OMIDKHAN, Mohammad R., NAJAFI, Gholamnassam. Current Biodiesel production technologies: A comparative review. **Energy Conversion and Management**. v.63 pp.138-148, 2012.

AHMAD, A.L; MAT YASIN, N.H; DEREK C.J.C; LIM, J.K. Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15 pp.584-593, 2011.

ALLIL, A.S; MANCHEGO, A.O.C; RODRIGUES, I.V; ALLIL, R.C.S.B; WERNECK, M.M. Solar tracker development applied to ambientes illumination and microalgae cultivation. **26th International Conference on Plastic Optical Fibers, POF 2017 – Proceedings**. 2017

AMARO, H.M; CATARINA GUEDES, A; XAVIER MALCATA, F. Advances and prespectives in using microalgae to produce biodiesel. **Applied Energy**, v.88 pp.3402-3410, 2011.

ANDERSEN, R.A. The Microalgal Cell. In: Richmond, A; Hu, Q. (editores) **Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology**. Capítulo 1. Wiley, 2013.

ARANDA, D.A.G; CRUZ, Y.R; HAKALIN, N.L.S. Biodiesel de microalgas. In: MIRANDA, J.L; DE MOURA, L.C. (organizadoras) **BOA –Biodiesel. Obtenção e análise de qualidade**. Capítulo III. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

ARANSIOLA, E.F; OJUMU, T.V; OYEKOLA, O.O; MADZIMBAMUTO, T.F; IKHU-OMOREGEBE, D.I.O. A review of current technology for biodiesel production: State of the art. **Biomass and Bioenergy** v.61 pp.276-297, 2014.

BAHADAR, A; KHAN, M.B. Progress in energy from microalgae: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v.27 pp.128-148, 2013.

BENEVENUTI, C.S.J. **Prospecção Tecnológica da Produção de Ácido Lático no Contexto de Biorrefinaria: Tendências e Oportunidades**. 86 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2016.

BOROWITZKA, M.A. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. **Journal of Biotechnology** v.70 pp.313-321, 1999.

BOROWITZKA, M.A. High-value products from microalgae – their development and commercialisation. **J. Appl. Phycol.** v.25 pp.743-756, 2013.

BOROWITZKA, M.A; MOHEIMANI, N.R. Open Pond Culture Systems. In: BOROWITZKA, M.A; MOHEIMANI, N.R. (editores) **Algae for Biofuels and Energy**. Capítulo 8. Springer, Dordrecht, 2012.

BRENNAN, L; OWENDE, P. Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 14 pp.557-577, 2010.

CARVALHO, C.M. **A expansão sustentável do cultivo da palma para a produção de biodiesel no Brasil: o caso do estado do Pará.** 105 p. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2015.

CARVALHO, A.P; SILVA, S.O; BAPTISTA, J.M; MALCATA, F.X. Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. **Appl. Microbiol. Biotechnol.** v. 89 pp.1275-1288, 2011

CHEN, C-Y; YEH, K-L; AISYAH, R; LEE, D-J; CHANG, J-S. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. **Bioresour. Technol.** v.102, pp.71-81, 2011.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advance** v. 25 pp. 294-306, 2007

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol, **Trends in Biotechnology**, v. 26 n.3 pp. 126-131, 2008.

CHISTI, Y. Constraints to commercialization of algal fuels. **Journal of Biotechnology** v.167 pp.201-214, 2013.

CONCEIÇÃO, R.C. da. **Análise Técnica e Ambiental de Processo de Produção de Biodiesel de Microalga.** 119 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2014.

CUELLAR-BERMUDEZ, S.P; GARCIA-PERWZ, J.S; RITTMANN, B.E; PARRA-SALDIVAR, R. Photosynthetic bioenergy utilizing CO₂: an approach on flue gases utilization for third generation biofuels. **Journal of Cleaner Production**, v.98 pp. 53-65, 2015.

DA PONTE, D.A.P et al. Microalgae cultivation by solar concentration in a modified POF bundle. **POF 2014 – 23rd International Conference on Plastic Optical Fibers, Proceedings.** Pp. 190-194, 2014.

DE QUADROS, D.P.C; CHAVES, E.S; SILVA, J.S.A; TEIXIRA, L.S.G; CURTIUS, A.J; PEREIRA, P.A.P. Contaminantes em Biodiesel e Controle de Qualidade. **Rev. Virtual Quim.**, 3 (5) pp. 376-384, 2011.

DIXON, R.K. Algae based biofuels. **Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change** v.18 p.1-4, 2013

ENCARNAÇÃO, A.P.G. **Geração de Biodiesel pelos Processos de Transesterificação e Hidroesterificação, Uma Avaliação Econômica.** 144 p. Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. 2007

FORTES, M.M. **Fotobiorreatores para o cultivo de microalgas destinadas à produção de biodiesel.** 159 p. Tese (doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2015.

GARCEZ JÚNIOR, S.S; SANTOS, R. de M; de SOUZA, V.M; SILVA, N.G. de A; RUSSO, S.L. Sistema patentário brasileiro: correlação entre os depósitos de residentes e não residentes de 1980 a 2012. **Cad. Prospec.** v.8 n.4 pp. 638-647. Salvador, 2015.

GONZÁLEZ, L.E. **Gargalos na produção de microalgas associado ao conceito de biorrefinaria.** 207 p. Tese (doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2016.

HINDERSIN, S; LEUPOLD, M; KERNER, M; HANELT, D. Irradiance optimization of outdoor microalgal cultures using solar tracked photobioreactors. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v.36(3), pp. 345-355, 2013.

JANSSEN, M; TRAMPER, J; MUR, L.R; WIJFFELS, R.H. Enclosed outdoor photobioreactors: light regime, photosynthetic efficiency, scale-up, and future prospects. **Biotechnology and Bioengineering** v.81 n.2 pp.193-210, 2003.

LEONETT, A.Z.F. **Biofixação de CO₂ e produção de hidrocarbonetos renováveis a partir da biomassa de microalgas.** 139 p. Dissertação (mestrado profissional) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2016.

LINHARES, F.R. A importância de se fazer busca de anterioridades. **Cad. Prospec.**, Salvador, v. 10, n. 4, p. 696-705, out./dez. 2017

LOUBACK, F.A. **Mapeamento tecnológico de tecnologias alternativas de produção de biodiesel.** 96 p. (projeto final) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

MADEIRA, L.S. **Prospecção tecnológica através de depósitos de patentes para produção de proteínas terapêuticas de interesse brasileiro.** 237 p. Tese (doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013.

MASOJÍDEK, J; PAPÁČEK, Š; SERGEJEVOVÁ, M; JIRKA, V; ČERVENÝ, J; KUNC, J; KOREČKO, J; VERBOVIKOVA, O; KOPECKÝ, J; ŠTYS, D; TORZILLO, G. A closed solar photobioreactor for cultivation of microalgae under supra-high irradiance: basic design and performance. **Journal of Applied Phycology** v.15, pp. 239-248, 2003.

MASOJÍDEK, J; SERGEJEVOVÁ, M; ROTTNEROVÁ, K; JIRKA, V; KOREČKO, J; KOPECKÝ, J; ZAT'KOVÁ, I; TORZILLO, G; ŠTYS, D. A two-stage solar photobioreactor for cultivation of microalgae based on solar concentrators. **J. Appl. Phycol.** v. 21 pp.55-63, 2009.

MATA, T.M; MARTINS, A.A; CAETANO, N.S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14 pp. 217-232, 2010.

OGBONNA, J.C; SOEJIMA, T; TANAKA, H. An integrated solar and artificial light system for internal illumination of photobioreactors. **Journal of Biotechnology**, v.70 p.289-297, 1999.

OLIVEIRA, S.D. **Prospecção tecnológica da produção de ácido succínico a partir de fontes renováveis: perspectivas e desafios.** 263 p. Tese (doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2014.

ONCEL, S.S. Microalgae for a macroenergy world. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.26 pp. 241-264, 2013.

ONO, E; CUELLO, J.L. Design parameters of solar concentrating systems for CO₂-mitigating algal photobioreactors. In: GALE, J; KAYA, Y. (editores) **Greenhouse Gas Control Technologies** volume II. Elsevier, 2003.

OOMS, M.D; DINH, C.T; SARGENT, E.H; SINTON, D. **Photon management for augmented photosynthesis**. Nature Communications 7:12699, 2016.

PIRES, J.C.M; ALVIM-FERRAZ, A.C.M; MARTINS, F.G. Photobioreactor design for microalgae production through computational fluid dynamics: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.79 pp. 248-254, 2017.

QUINN, J.C; DAVIS, R. The potentials and challenges of algae based biofuels: A review of the techno-economic, life cycle, and resource assessment modeling. **Bioresource Technology**, v.184 pp. 444-452, 2015.

RICHMOND, A. Principles for attaining maximal microalgal productivity in photobioreactors: an overview. **Hydrobiologia** v.512 pp.33-37, 2004.

RICHMOND, A (editor) Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. Blackwell Publishing, 2007

SCHLITTLER, L.A.F.S. **Mapeamento do conhecimento tecnológico da cadeia produtiva do etanol de segunda geração por rota bioquímica**. 239 p. Tese (doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2012.

SINGH, R.N; SHARMA, S. Development of suitable photobioreactor for algae production – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.16 pp. 2347-2353, 2012.

SLEGGERS, P.M; WIJFFELS, R.H; van STRATEN, G; van BOXTEL, A.J.B. Design scenarios for flat panel photobioreactors. **Applied Energy**, v.88 pp. 3342-3353, 2011.

TALBIERZ, S; KUJAWSKA, N; LATAŁA, A. Patented photobioreactor to commercial production of new drugs and nutraceuticals from microalgae. **Przegląd lekarski** v.69 (10) pp. 1031-1034, 2012

THE THOMSON CORPORATION. Derwent Innovations Index® Quick Reference Card. 2008. Disponível em:
<https://www.periodicos.capes.gov.br/images/documents/DII_qrc_port_dec08.pdf>
Acesso em 28 jun. 2018.

VAN RIESEN et al. Concentrix Solar's progress in developing highly efficient modules. **AIP Conference Proceedings** 1407, p. 235. American Institute of Physics (AIP), 2011.

VASUMATHI, K.K; PREMALATHA, M; SUBRAMANIAN, P. Parameters influencing the design of photobioreactor for the growth of microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.16, pp.5443-5450, 2012.

VIÊGAS, C.V. **Produção de biodiesel e de coprodutos a partir de microalgas comerciais: abordagem de biorrefinaria**. 155 p. Tese (doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2015.

WANG, B; LAN, C.Q; HORSMAN, M. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. **Biotechnology Advances**, v. 30 pp. 904-912, 2012.

WOLFF, T; BRINKMANN, T; KERNER, M; HINDERSHIN, S. CO₂ enrichment from flue gas for the cultivation of algae – a field test. **Greenhouse Gases Science and Technology**, v.5 pp. 505-512, 2015.

WURM, J; PAULI, M. SolarLeaf: The world's first bioreactive façade. **arq: Architectural Research Quarterly**, v.20 n.1 pp. 73-79, Cambridge, 2016.

ZIJFFERS, J-W.F; JANSSEN, M; TRAMPER, J; WIJFFELS, R.H. Design process of an area-efficient photobioreactor. **Mar. Biotechnol.** v. 10, pp. 404-415, 2008

ZIJFFERS, J-W.F; SALIM, S; JANSSEN, M; TRAMPER, J; WIJFFELS, R.H. Capturing sunlight into a photobioreactor: Ray tracing simulations of the propagation of light from capture to distribution into the reactor. **Chemical Engineering Journal**, v.145 pp.316-327, 2008.

ZITTELLI, G.C; RODOLFI, L; BASSI, N; BIONDI, N; TREDICI, M.R. Photobioreactors for Microalgal Biofuel Production. In: BOROWITZKA, M.A; MOHEIMANI, N.R. (editores) **Algae for Biofuels and Energy**. Capítulo 7. Springer, Dordrecht, 2012.