

# Energia Solar e Eólica 2

Paulo Jayme Pereira Abdala  
(Organizador)

 **Atena**  
Editora

Ano 2019

**Paulo Jayme Pereira Abdala**  
(Organizador)

# Energia Solar e Eólica 2

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Karine de Lima

Revisão: Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E56 Energia solar e eólica 2 [recurso eletrônico] / Organizador Paulo Jayme Pereira Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Energia Solar e Eólica; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-067-4

DOI 10.22533/at.ed.674192201

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia eólica. 3. Energia solar. I. Abdala, Paulo Jayme Pereira.

CDD 621.042

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

As chamadas energias renováveis, também conhecidas como energias alternativas ou ainda energias limpas são três denominações possíveis para qualquer forma de energia obtida por meio de fontes renováveis, e que não produzem grandes impactos ambientais negativos. Atualmente, com a grande preocupação mundial em compensar as emissões de CO<sub>2</sub>, o consumo deste tipo de energia tem sido o foco de governos e empresas em todo globo.

Neste sentido, o Brasil possui uma matriz energética bastante limpa, onde predomina o uso de hidrelétricas, apesar do crescimento do uso de termelétricas, as quais são abastecidas por combustível fóssil. No Brasil, o setor energético é responsável por grande parte das emissões de CO<sub>2</sub>, ficando atrás somente do setor agrícola que reapresenta a maior contribuição para o efeito estufa brasileiro.

A energia proveniente do sol é a alternativa renovável mais promissora para o futuro e, por este motivo tem recebido maior atenção e também mais investimentos. A radiação solar gratuita fornecida pelo sol pode ser captada por placas fotovoltaicas e ser posteriormente convertida em energia elétrica. Esses painéis usualmente estão localizados em construções, como indústrias e casas, o que proporciona impactos ambientais mínimos. Esse tipo de energia é uma das mais fáceis de ser implantada em larga escala. Além de beneficiar os consumidores com a redução na conta de energia elétrica reduzem as emissões de CO<sub>2</sub>.

Com relação à energia eólica, o Brasil faz parte do grupo dos dez países mais importantes do mundo para investimentos no setor. As emissões de CO<sub>2</sub> requeridas para operar esta fonte de energia alternativa são extremamente baixas e é uma opção atrativa para o país não ser dependente apenas das hidrelétricas. Os investimentos em parques eólicos vem se tornando uma ótima opção para neutralização de carbono emitidos por empresas, indústrias e etc.

Neste contexto, este EBOOK apresenta uma importante contribuição no sentido de atualizar os profissionais que trabalham no setor energético com informações extremamente relevantes. Ele está dividido em dois volumes contendo artigos práticos e teóricos importantes para quem deseja informações sobre o estado da arte acerca do assunto.

Paulo Jayme Pereira Abdala

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>10</b>
ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NOS CAMPI IFG ITUMBIARA E URUAÇU	
Sergio Batista da Silva Olívio Carlos Nascimento Souto Fernando Nunes Belchior Ghunter Paulo Viajante Elias Barbosa Macedo Vera Ferreira Souza	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6741922011</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>24</b>
ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA INTEGRADA EM UM SHOPPING CENTER DE FORTALEZA - CE	
Sofia da Costa Barreto Paulo Cesar Marques de Carvalho	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6741922012</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>41</b>
ESTUDO DO COMPORTAMENTO E QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA DO ABACAXI SECADO EM SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO	
Raphaela Soares da Silva Camelo Juliana Lobo Paes Milena Araujo Silva Madelon Rodrigues Sá Braz Dhiego Santos Cordeiro da Silva Camila Lucas Guimarães	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6741922013</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>54</b>
ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS SOBRE O CUIINSE <sub>2</sub> E SUA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS	
Yuri Hamayano Lopes Ribeiro Denis Gilbert Francis David Marcus Vinícius Santos da Silva Jailton Souza de Almeida	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6741922014</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>66</b>
EXPERIÊNCIA DE CURSO GRATUITO DE INSTALADOR DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE OFERECIDO PELO IFTO CAMPUS PALMAS	
Claudio Silva dos Santos Abimael Ribeiro Martins Adail Pereira Carvalho Brunno Henrique Brito	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6741922015</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>78</b>
IMPACTO DA LEI PALMAS SOLAR NA ANÁLISE FINANCEIRA DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM PALMAS - TO	
Isamara Quirino de Castro Carlos Brunno Henrique Brito	

Felipe Tozzi Bittencourt  
DOI 10.22533/at.ed.6741922016

**CAPÍTULO 7 ..... 91**

IMPACTOS DOS INCENTIVOS DOS GOVERNOS DO ESTADO E DO MUNICÍPIO NA MICROGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM PALMAS - TO

Allan Carlos do Nascimento Silva  
Brunno Henrique Brito

DOI 10.22533/at.ed.6741922017

**CAPÍTULO 8 ..... 104**

IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE DOIS GERADORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS DIRETAMENTE NO BARRAMENTO C.C. DO LABORATÓRIO DE SISTEMAS HÍBRIDOS/MINIRREDES (GEDAE/UFPA)

Jorge Augusto Leal Corrêa  
Claudomiro Fábio de Oliveira Barbosa  
Marcos André Barros Galhardo  
João Paulo Alves Veríssimo  
Israel Hidai Lobato Lemos  
Edinaldo José da Silva Pereira  
João Tavares Pinho

DOI 10.22533/at.ed.6741922018

**CAPÍTULO 9 ..... 121**

INFLUÊNCIA DA SUJEIRA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Elismar Ramos Barbosa  
Merlim dos Santos Ferreira de Faria  
Fabio de Brito Gontijo

DOI 10.22533/at.ed.6741922019

**CAPÍTULO 10 ..... 132**

INFLUÊNCIA DO ESPECTRO SOLAR EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CÉU LIMPO, CÉU PARCIALMENTE NUBLADO E CÉU NUBLADO

Guilherme Marques Neves  
Waldeir Amaral Vilela  
Enio Bueno Pereira  
Luiz Angelo Berni

DOI 10.22533/at.ed.67419220110

**CAPÍTULO 11 ..... 146**

INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA ATRAVÉS DE GERADOR DE VÓRTICE LONGITUDINAL DO TIPO DELTA

Felipe Augusto Santos da Silva  
Leandro Oliveira Salviano

DOI 10.22533/at.ed.67419220111

**CAPÍTULO 12 ..... 161**

METODOLOGIA COMPUTACIONAL DE CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR

Marcus Vinícius Contes Calça  
Matheus Rodrigues Raniero  
Alexandre Dal Pai  
Carlos Roberto Pereira Padovani  
Domingos Mario Zeca Fernando

**CAPÍTULO 13 ..... 174**

PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ABRIGOS DE PONTOS DE ÔNIBUS NA AV. ALMIRANTE BARROSO – BELÉM/PA

Ana Laura Pinheiro Ruivo Monteiro  
Edinaldo José da Silva Pereira  
Everton Leandro Santos Amaral  
Ítalo de Sousa  
Magda Tayane Abraão de Brito

**DOI 10.22533/at.ed.67419220113**

**CAPÍTULO 14 ..... 191**

PROJETO PRELIMINAR DE UM RADIÔMETRO ABSOLUTO PARA MEDIR A IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL

Franciele Carlesso  
Jenny Marcela Rodriguez Gomez  
Luiz Angelo Berni  
Graziela da Silva Savonov  
Luis Eduardo Antunes Vieira  
Waldeir Amaral Vilela  
Edson Luiz de Miranda

**DOI 10.22533/at.ed.67419220114**

**CAPÍTULO 15 ..... 200**

PROJETO, DESENVOLVIMENTO E TESTE DE FOGÕES SOLARES

Diego Lopes Coriolano  
Erico Diogo Lima da Silva  
Iraí Tadeu Ferreira de Resende  
Vanina Cardoso Viana Andrade  
Denilson Pereira Gonçalves  
Renan Tavares Figueiredo  
Odésia Leonor Sanchez de Alsina

**DOI 10.22533/at.ed.67419220115**

**CAPÍTULO 16 ..... 213**

PROPOSTA DE RETROFIT NO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO E ESTUDO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM UM DOS BLOCOS DA UTFPR EM CURITIBA

Larissa Barbosa Krasnhak  
Jair Urbanetz Junior

**DOI 10.22533/at.ed.67419220116**

**CAPÍTULO 17 ..... 229**

PROPOSTA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA OTIMIZAÇÃO DO GASTO PÚBLICO COM O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA UNIDADE DE ENSINO FEDERAL IMPLANTADA NA REGIÃO DO VALE DO SÃO FRANCISCO

Adriano Moraes da Silva  
Rebeca Lorena Santos Maia e Silva  
Danielle Bandeira de Mello Delgado

**DOI 10.22533/at.ed.67419220117**

**CAPÍTULO 18 ..... 246**

PLATAFORMA PORTÁTIL E DE BAIXO CUSTO PARA A AQUISIÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

Júlio César Madureira Silva  
Augusto César da Silva Bezerra  
Claudinei Rezende Calado  
Ana Luiza F. Maia  
Amanda Ribeiro Amorim

**DOI 10.22533/at.ed.67419220118**

**CAPÍTULO 19 ..... 255**

SISTEMA DE AQUISIÇÃO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO DE DADOS EM SERVIDOR REMOTO UTILIZANDO PLATAFORMAS OPEN SOURCE RASPBERRY PI E ARDUINO

José Ilton de Oliveira Filho  
Wilk Coelho Maia

**DOI 10.22533/at.ed.67419220119**

**CAPÍTULO 20 ..... 263**

SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM GOIÂNIA: MORFOLOGIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Pedro Victor Valadares Romanholo  
Bernardo Pinheiro de Alvarenga  
Enes Gonçalves Marra  
Sérgio Pires Pimentel

**DOI 10.22533/at.ed.67419220120**

**CAPÍTULO 21 ..... 275**

TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS SOLARIMÉTRICOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DA EMC/UFG

Jéssica Alice Alves da Silva  
Bernardo Pinheiro de Alvarenga  
Sérgio Pires Pimentel  
Enes Gonçalves Marra

**DOI 10.22533/at.ed.67419220121**

**CAPÍTULO 22 ..... 290**

TESTES DE SENSIBILIDADE PARA DIFERENTES PARAMETRIZAÇÕES CUMULUS DO MODELO WRF PARA MELHORAR AS ESTIMATIVAS DE VENTO

Lucia Iracema Chipponelli Pinto  
Francisco Jose Lopes de Lima  
Fernando Ramos Martins  
Enio Bueno Pereira

**DOI 10.22533/at.ed.67419220122**

**CAPÍTULO 23 ..... 303**

O ENSINO SOBRE ENERGIAS RENOVÁVEIS NOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA NAS UNIVERSIDADES BRASILEIRAS

André Barra Neto  
Ana Paula Pinheiro Zago  
Márcia Helena da Silva  
Mirian Sousa Moreira  
José Eduardo Ferreira Lopes

**DOI 10.22533/at.ed.67419220123**

<b>CAPÍTULO 24</b> .....	<b>317</b>
POTENCIALIDADE DO BIOGÁS GERADO PELA CODIGESTÃO ENTRE DEJETO BOVINO E SUÍNO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Juliana Lobo Paes</li> <li>Camila Ferreira Matos</li> <li>Gabriel Araújo e Silva Ferraz</li> <li>Giancarlo Bruggianesi</li> <li>Camila Kelly de Queiroz</li> <li>Caroline Stephanie Gomes de Castro Soares</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.67419220124</b>	
<b>CAPÍTULO 25</b> .....	<b>333</b>
SIMULAÇÃO DE UMA PLANTA OTEC DE CICLO FECHADO OPERANDO NO BRASIL	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Marcus Godolphim de Castro Neves</li> <li>Hélio Henrique Rivabene Ferreira Dias</li> <li>Cassio Roberto Macedo Maia</li> <li>Ricardo Alan Verdú Ramos</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.67419220125</b>	
<b>CAPÍTULO 26</b> .....	<b>344</b>
ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE 24 MESES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE NO ESTADO DO TOCANTINS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Brunno Henrique Brito</li> <li>Thálisson Câmara Belém</li> <li>Márcio Serafim de Almeida</li> <li>Felipe Tozzi Bittencourt</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.67419220126</b>	
<b>CAPÍTULO 27</b> .....	<b>359</b>
ESTUDO TECNOLÓGICO DE SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Robson de Souza Santiago</li> <li>Bruno Lindbergh Sousa</li> <li>Yordanka Reyes Cruz</li> <li>Estevão Freire</li> <li>Suely Pereira Freitas</li> <li>Gisel Chenard Díaz</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.67419220127</b>	
<b>CAPÍTULO 28</b> .....	<b>376</b>
INFLUÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM AEROPORTOS SOBRE A SEGURANÇA DAS OPERAÇÕES AERONÁUTICAS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Francisco Wilson Falcão Júnior</li> <li>Paulo Cesar Marques de Carvalho</li> <li>Wilson Cabral de Sousa Júnior</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.67419220128</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>390</b>

## ESTUDO TECNOLÓGICO DE SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS

### **Robson de Souza Santiago**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química  
Rio de Janeiro – RJ

### **Bruno Lindbergh Sousa**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química  
Rio de Janeiro – RJ

### **Yordanka Reyes Cruz**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química  
Rio de Janeiro – RJ

### **Estevão Freire**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química  
Rio de Janeiro – RJ

### **Suely Pereira Freitas**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química  
Rio de Janeiro – RJ

### **Gisel Chenard Díaz**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química  
Rio de Janeiro – RJ

a partir de alimentos e oleaginosas, são limitados quanto a capacidade de atingir metas de produção de biocombustíveis, mudanças climáticas e crescimento econômico. Estes fatores aumentaram o interesse no desenvolvimento de biocombustíveis de terceira geração produzidos a partir de matérias-primas alternativas e não convencionais (alimentos), como as microalgas, que apresentam maiores potencialidades no setor.

As microalgas são microrganismos que podem ser cultivadas em ambientes impróprios para a agricultura, utilizam a luz do Sol e absorvem CO<sub>2</sub>, características que as tornam relevantes em um cenário de redução de emissão de poluentes e eficiência energética.

O presente capítulo revisa o panorama atual do uso de microalgas para produção de biodiesel, incluindo seu cultivo, colheita, sistema de cultivo e sistema de captação da luz.

**PALAVRAS-CHAVES:** Microalgas. Tecnologias de sistemas de cultivo de microalgas, Sistemas de coleta e distribuição de luz, Fotobioreator, Biodiesel, Fibras ópticas, Tanque fechado opaco, LED , Iluminação.

**RESUMO:** A produção sustentável de energia renovável é um assunto amplamente discutido mundialmente, uma vez que é cada vez mais compreendido que os biocombustíveis de primeira geração, principalmente os produzidos

### 1 | INTRODUÇÃO

O uso de produtos fabricados por meio de processos químicos 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. O ser humano já não sabe viver sem tais itens. Materiais, medicamentos, alimentos, combustíveis e tantos outros 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 procuradas para a obtenção de produtos já usados atualmente assim como novos produtos com potencial benéfico para a saúde humana e o meio ambiente.

Neste aspecto, microalgas oferecem perspectivas promissoras devido às suas características. Estes microrganismos 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.

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.

Na busca pela eficiência e baixo custo, diferentes processos para o cultivo de microalgas são estudados, desenvolvidos e aprimorados. Entre esses, a utilização de fotobiorreatores 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 CO<sub>2</sub> 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 através de suporte econômico e financeiro, ou seja, a partir de políticas públicas que fomentem e incentivem os trabalhos rumo a objetivos bem definidos. 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 a certos requisitos e são rigorosamente analisados para serem aceitos. 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 desenvolvimento científico. 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.

## **2 | BIOMASSA ALGAL DE ORIGEM MARINHA**

### **2.1 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 (2010), 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 (2010), o metabolismo autotrófico utiliza luz como fonte de energia para a realização de fotossíntese e  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ . 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.

## 2.2 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  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^-$  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<sub>2</sub> pelas microalgas durante sua produção. O processo pode utilizar gases de combustão industriais e efluentes líquidos, os quais, combinados com a luz solar, contribuem 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 ( $\beta$ -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.

## 2.3 Sistemas de cultivo de microalgas

Diversos parâmetros influenciam o metabolismo celular das microalgas autotróficas, tais como: luz, temperatura, pH, concentração de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> 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.

### 2.3.1 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 CO<sub>2</sub> no ar pode dificultar sua absorção pelas microalgas e, conseqüentemente, seu crescimento (Mata et al, 2010). Sistemas de agitação, adição de CO<sub>2</sub> e colheita da biomassa aumentam a eficiência e a produtividade.

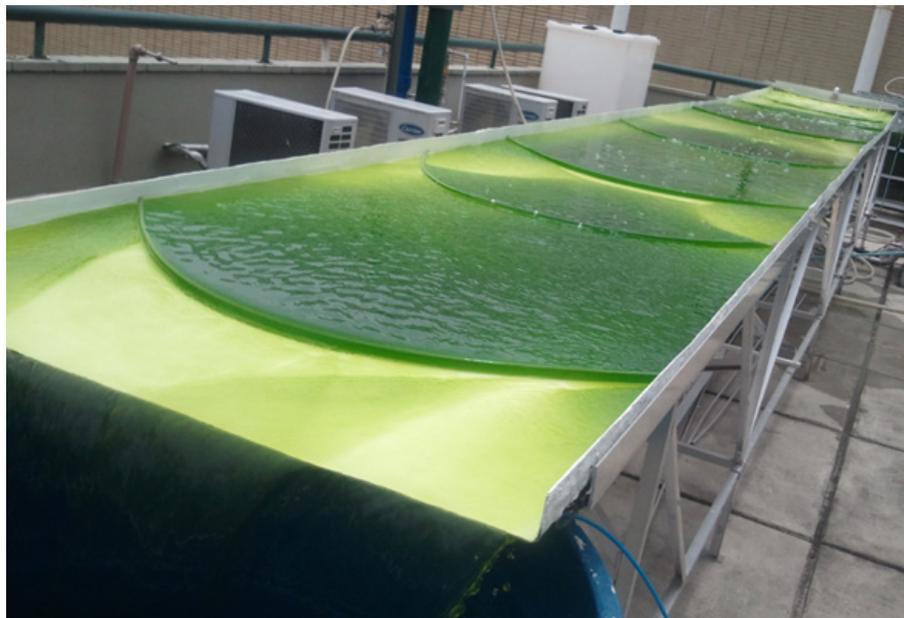
Lagos naturais são as formas mais simples de ambientes de cultivo de microalgas. Quando as condições naturais são favoráveis, com clima adequado e nutrientes em abundância, o crescimento de microalgas pode ocorrer espontânea e profusamente (Fortes, 2015). Borowitzka e Moheimani (2013) citam registros 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** - Lagoas naturais de cultivo de *Dunaliella salina* na Austrália para obtenção de  $\beta$ -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

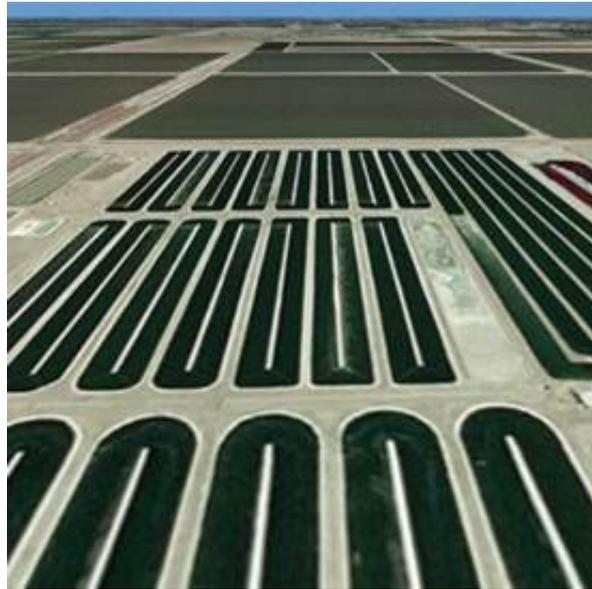
também conhecidos por modelo cascata ou filme descendente. A camada fina de cultivo permite uma boa absorção de luz em cultivos concentrados, mas o sistema apresenta grandes perdas por evaporação e dessorção de CO<sub>2</sub>, além do gasto energético pelo bombeamento contínuo (Fortes, 2015).



**Figura 2.2** – Sistema inclinado 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 e Owende, 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 tipo Raceway – Pacific Northwest National Laboratory, EUA

### *2.3.2 Sistemas fechados*

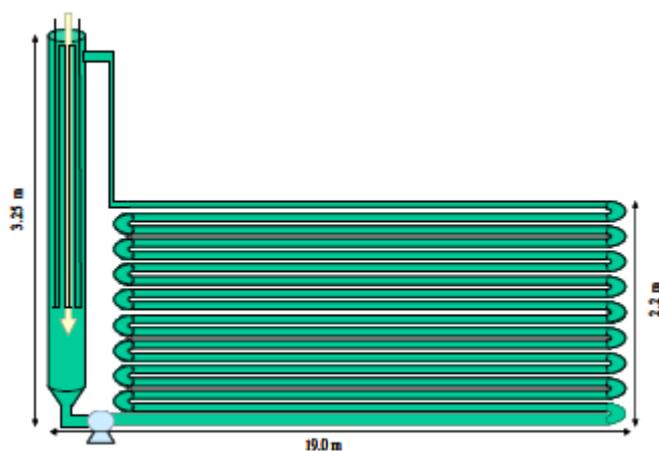
Os sistemas fechados de cultivo de microalgas são conhecidos como fotobiorreatores. Sistemas fechados permitem maior controle dos parâmetros e condições de cultivo, o que favorece uma maior produtividade de biomassa (Cuellar-Bermudez et al, 2015). Fotobiorreatores ocupam espaços menores em relação a 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 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  $\text{CO}_2$  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  $\text{O}_2$ , deficiência de  $\text{CO}_2$  e variações no pH (Brennan e Owende, 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 e Owende, 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, 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 e Owende, 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).

## 2.4 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, 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 CO<sub>2</sub> 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).

## REFERÊNCIAS

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.

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

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

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.

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

CUELLAR-BERMUDEZ, S.P.; GARCIA-PERWZ, J.S; RITTMANN, B.E.; PARRA-SALDIVAR, R. Photosynthetic bioenergy utilizing CO<sub>2</sub>: an approach on flue gases utilization for third generation biofuels. **Journal of Cleaner Production**, v.98 pp. 53-65, 2015

da Ponte, D.A.M.P. **Performance de um fotobiorreator opaco com distribuição de fibras ópticas plásticas para iluminação interna**. 144f. Tese (doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2016.

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.

LEONETT, A.Z.F. **Biofixação de CO<sub>2</sub> 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.

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

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.

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.

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 CO<sub>2</sub>-mitigating algal photobioreactors. In: GALE, J; KAYA, Y. (editores) **Greenhouse Gas Control Technologies** volume II. Elsevier, 2003.

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.

## **SOBRE O ORGANIZADOR:**

**Paulo Jayme Pereira Abdala** possui graduação em Engenharia Eletrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - RJ (1988), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005) e pós-graduação em Gestão de Aviação Civil pela Universidade de Brasília (2003). Entre 1989 e 2008 foi Chefe do Laboratório de Ruído Aeronáutico e Emissões de Motores do DAC/ANAC, tendo desenvolvido centenas de estudos sobre poluição sonora e atmosférica oriundas da atividade aeronáutica. Foi representante oficial do Brasil em diversos Fóruns Internacionais sobre meio ambiente promovidos pela Organização de Aviação Civil Internacional OACI - Agência da ONU. Foi Coordenador dos Cursos de Engenharia de Produção, Elétrica, Civil e Mecânica na UNOPAR/PG entre 2013 e 2018. Atualmente é Consultor Independente para a AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, OACI e INFRAERO. Tem experiência na área de Engenharia Eletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: acústica, meio ambiente e pedagogia (metodologia TRAINAIR/OACI).

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-067-4



9 788572 470674