



SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DE FOTOBIORREATOR BASEADO EM POF PARA CULTIVO DE MICROALGAS

Alfredo Omar Córdova Manchego

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Rio de Janeiro

Junho de 2018

SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DE FOTOBIORREATOR BASEADO EM POF PARA
CULTIVO DE MICROALGAS

Alfredo Omar Córdoba Manchego

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph.D.

Dra. Regina Célia da Silva Barros Allil, D.Sc.

Prof. Donato Alexandre Gomes Aranda, Ph.D.

Prof. Yordanka Reyes Cruz, D.Sc.

Prof. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2018

Manchego, Alfredo Omar Córdoba

Sistema de Iluminação de Fotobiorreator Baseado em POF para Cultivo de Microalgas/ Alfredo Omar Córdoba Manchego. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XV, 126 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 97-105.

1. Energia Solar. 2. Rastreamento Solar. 3. Lente de Fresnel. 4. Iluminação. 5. Fibras ópticas plásticas. 6. Fotobiorreator. 7. Microalgas. 8. Biomassa I. Werneck, Marcelo Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus por seu amor incondicional e pelo imenso cuidado com a minha vida e da minha família. Sem Ti, Deus, não teria conseguido chegar até aqui sem seu guia. Agradeço por ter colocado todas as pessoas corretas para me ajudarem a segurar os problemas apresentados no dia a dia.

Aos meus pais Arturo e Isabel e minhas irmãs Julissa e Kate, por compartilharem comigo meus sonhos, as lutas e os sucessos. Ao Alexandre, Regina e Yordanka por me proporcionar seu apoio durante a realização e desenvolvimento deste trabalho. A Bessie, Domingos e Walter que estiveram comigo no início desta luta.

Ao meu orientador, Professor Marcelo Martins Werneck, pela parceria, paciência e otimismo. Por seus ensinamentos, sua orientação e seu encorajamento diário nos obstáculos surgidos ao longo deste trabalho.

Muito obrigado!

Agradeço a toda equipe de funcionários, colaboradores e alunos do LIF e do laboratório GreenTec que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DE FOTOBIORREATOR BASEADO EM POF PARA CULTIVO DE MICROALGAS

Alfredo Omar Córdova Manchego

Junho/2018

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Programa: Engenharia Elétrica

O crescimento acelerado na demanda de combustíveis fósseis na área industrial, além tem elevado o aumento da poluição do ar no planeta. Como uma alternativa a este problema, este trabalho propõe o estudo e desenvolvimento de um sistema de iluminação natural baseado em rastreador solar, lente de Fresnel e fibras ópticas plásticas, como uma tecnologia viável para o cultivo de microalgas visando a geração de biomassa na produção de biocombustível, suplementos e outros insumos.

A pesquisa realizada consiste na otimização de um fotobiorreator (*PBR*) para cultivo de microalgas a baixa escala, de baixo custo, e de fácil manutenção, em comparação aos sistemas já existentes. A iluminação do *PBR* é através de um feixe de fibras, onde em uma de suas extremidades temos a convergência dos raios do Sol, por uma lente de Fresnel implementada em um sistema de rastreamento solar.

O trabalho foi dividido em três etapas. A primeira sessão surge com o estudo das microalgas, tipos de *PBRs*, condicionamento das *POFs* na iluminação interna de um *PBR*, visando elevada concentração de luz e energia, com a otimização do processo de iluminação com orifícios e ranhuras na *POF*.

A segunda sessão, apresenta o estudo das possibilidades de melhorias que visam homogeneizar a iluminação a ser distribuída no interior do *PBR*.

Por último são mostrados os resultados comparativos dos experimentos de cultivo, com o objetivo de superar a produção de biomassa obtida pelo processo convencional. Como resultado se obteve 18,4% na produção de biomassa a mais no *PBR*-Janela.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

PHOTOBIOREACTOR LIGHTING SYSTEM BASED ON POF FOR
MICROALGAE'S CULTIVATION

Alfredo Omar Córdova Manchego

June/2018

Advisor: Marcelo Martins Werneck

Department: Electrical Engineering

Increased demand in the consumption of fossil fuels in industrial production, in addition has led to an increase in air pollution on the planet. As an alternative to this problem, this paper proposes the study and development of a natural lighting system based on solar tracker, Fresnels lens and plastic optical fibers (POFs), as a viable technology for cultivation of microalgae for the generation of biomass to biofuel production, supplements and other feedstocks.

The lighting system proposed consists of the optimization of a photobioreator (PBR) for small scale microalgae cultivation, low cost, and easy maintenance, compared to the existing systems. The PBR illumination through a fiber bundle, where at one of its ends we have the convergence of the sun's rays, by a Fresnel lens implemented in a solar tracking system. Initially, the current paper is divided in three stages. The first session describes the study of microalgae, type of PBRs and conditioning of POFs in the internal lighting of a PBR, aiming a high concentration of light and energy optimizing the lighting process with holes and grooves in the POF. The second session, presents the study of the improvements possibilities that aim to homogenize the lighting to be distributed inside the PBR. Finally, comparative results of the experiments of the microalgae cultivation are described, carried out in parallel cultivation, with the objective of surpassing the biomass production. As a result there was 18.4% increase in the production of more biomass in the PBR-Flat plate.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Siglas	xv
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.1 Objetivo Geral	2
1.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Estrutura da Tese	3
Capítulo 2 Revisão bibliográfica	5
2.1 Energia Solar	5
2.2 O rastreador Solar	9
2.3 Histórico dos microorganismos	11
2.3.1 Microalgas	12
2.3.2 Fotossíntese	15
2.4 Monitoramento de parâmetros relevantes de um PBR que influenciam no crescimento de microalgas	20
2.4.1 Intensidade luminosa	20
2.4.2 pH e CO ₂	21
2.4.3 Nutrientes	22
2.4.4 Temperatura	22
2.4.5 Aeração	22
2.5 Curva de crescimento das microalgas	23
2.6 Principais Sistemas de Cultivo de Microalgas	24
2.6.1 Sistemas abertos ou Open Ponds	26
2.6.2 Sistema Fechado ou Fotobiorreator	27
2.7 Sistemas de Transporte de Energia Solar	33

2.7.1 Lente Concentradora.....	33
2.7.2 Fibra Óptica.....	34
2.8 Luminotécnica	38
2.8.1 Radiometria.....	39
2.8.2 Fotometria	39
2.8.3 Radiação Fotossinteticamente Ativa	40
Capítulo 3 Materiais e Métodos.....	42
3.1 Desenvolvimento do Fotobiorreator de 30 litros para testes em nível piloto. 43	
3.1.1 Modelo Inicial (# modelo 1)	43
3.1.2 Aperfeiçoamento do modelo inicial (# modelo 2).....	44
3.2 Sistemas de iluminação por POFs para Cultivo de microalgas a ser comparados com PBR-Janela.....	47
3.2.1 Cultivo 1.....	48
3.2.2 Cultivo 2.....	61
3.2.3 Cultivo 3.....	62
3.3 Ensaio da variação da temperatura induzida na fibra POF pela lente Fresnel63	
3.4 Cálculo do diâmetro lente Fresnel	71
3.5 Monitoramento de crescimento das microalgas nos protótipos propostos... 78	
3.5.1 Processo de Cultivo e inóculo de microalgas.....	78
3.5.2 Processo de controle de crescimento do cultivo.....	80
Capítulo 4 Resultados e Discussões	84
4.1 Cultivo de microalgas com sistema de iluminação baseada em: rastreamento solar, concentração solar no feixe de POF e PBR não transparente de polipropileno (30L).....	84
4.2 Ensaio de Cultivos e resultados.....	86
4.2.1 Resultados em Cultivo 1	87
4.2.2 Resultados em Cultivo 2.....	89
4.2.1 Resultados em Cultivo 3.....	91

Capítulo 5	Conclusões e Trabalhos Futuros	95
5.1	Conclusões.....	95
5.2	Trabalhos Futuros	96
Capítulo 6	Referências bibliográficas	97
Anexos	106

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Espectro de radiação solar, adaptada [1].....	5
Figura 2.2 - Média Anual Global da incidência de radiação GHI, adaptada [2].....	6
Figura 2.3 - Média Anual Global da incidência de radiação DNI, adaptada [2].....	6
Figura 2.4 - Espectro eletromagnético da radiação solar, adaptada [1].....	8
Figura 2.5 - Índices de radiação solar na faixa espectral fotossinteticamente ativa PAR e quadro de destaque de países, que utilizam a biomassa como gerador energético, 2016, adaptada [4] e [5].	9
Figura 2.6 - Coordenadas altazimutais e Coordenadas equatoriais, adaptada [6].	10
Figura 2.7 - Espécies de <i>Scenedesmus</i> : (a) <i>S. quadricauda</i> (b) <i>S. obliquus</i> (c) <i>S. acutus</i> adaptada [46].	14
Figura 2.8 - Espectro de absorção de alguns pigmentos fotossintetizantes, adaptada [27].	16
Figura 2.9 - Esquema Z da Fotossíntese, adaptado [31].	18
Figura 2.10 - Esquema Z Fotossíntese. adaptado [31].	19
Figura 2.11 - Curva de resposta da fotossíntese à intensidade luminosa [48]	21
Figura 2.12 - Curva de crescimento microbótico, adaptada [40].	23
Figura 2.13 - Esquema do tanque aberto, adaptada [54].	26
Figura 2.14 - Tipos de Sistemas fechados para cultivo de microalgas a) Coluna borbulhada [12]; b) Air lift [31]; c) Placas plana vertical (Janela) [66]; d) Tubular inclinada; e) Tanque agitado [68]; f) helicoidal [62]; g) Tubular horizontal.....	28
Figura 2.15 - Processo de biocombustível a partir da biomassa, adaptada [71].	32
Figura 2.16 - Princípio do processo da uma lente de Fresnel.....	34
Figura 2.17 - Propagação de luz através da fibra óptica.	35
Figura 2.18 - Tipos de fibras ópticas e características.....	37
Figura 2.19 - Comparação perda de transmissão POF Fabricante e amostra de 90 cm. 38	
Figura 3.1 - Esquema da Sistema de iluminação: lente de Fresnel, POF e PBR.....	42
Figura 3.2 - a) Esboço de primeiro PBR b) Suporte de arranjo de lâminas de acrílico. .	43
Figura 3.3 - Esboço do fotobiorreator de 30 litros com estrutura suporte.	44
Figura 3.4 – fotografia do suporte com disco de acrílico para distribuição das POFs. ..	45
Figura 3.5 - Sistema de distribuição da aeração no Fotobiorreator de 30 litros.....	45

Figura 3.6 - Protótipo de PBR janela usado como referência comparativa com PBR de iluminação interna, adaptada de [66].	46
Figura 3.7 – Diagrama esquemático dos três cultivos – Sistemas de iluminação	48
Figura 3.8 - Implementação do Sistema do Cultivo 1: a) PBR-POF inovador, iluminação interna por POFs com ranhuras nas laterais b) Sistema de controle de parâmetros c) Tanque com isolamento externo d) Arranjo de fibras com ranhuras 20 cm.	49
Figura 3.9 - Diagrama de Blocos do Setup para a realização das ranhuras na lateral da POF con laser CO ₂	50
Figura 3.10 - Esquema da placa de controle do Puxatriz.	51
Figura 3.11 - Circuito esquemático do controle do Puxatriz.	52
Figura 3.12 - Fotografia do controle Puxatriz.	53
Figura 3.13 - Estrutura óptica e mecânica para furação. Laboratório LIF- UFRJ.	53
Figura 3.14 - Estrutura da furação POF.	55
Figura 3.15 - Sistema de rastreamento solar utilizando lentes de Fresnel.	56
Figura 3.16 - POF de cima para baixo:, 3% (5 e 10s) e 4% com 5s.	57
Figura 3.17 - a) Diagrama de bloco do setup de medida óptica na POF. b) Equipamento na medição de radiação óptica	58
Figura 3.18 - Modos de ranhura e furação a) ranhura sem vibração b) ranhura com vibração c) ranhura sem vibração d) furação pontual com afastamento de 1 cm	60
Figura 3.19 - Furação da POF. a) profundidade b) diâmetro furação.	61
Figura 3.20 - Implementação do Sistema do Cultivo 2: a) PBR não transparente - inovador iluminação interna pontoal por POFs. b) iluminação pontual no extremo das POFs. c) Espelho no fundo do PBR-POF. d) Arranjo de fibras ópticas distribuídas em duas diferentes alturas de fixação.	62
Figura 3.21 - Implementação do Sistema do Cultivo 3: a) PBR-Janela com iluminação interna por POFs acopladas a sistema de rastreamento solar e a sistema alternativo iluminação por LEDs. b) Sistema de iluminação com 2 feixes em destaque. c) dispositivos utilizados no sistema de iluminação por LEDs. d) Espelho no fundo do PBR-POF. e) Arranjo de POFs utilizando a luz de LEDs como iluminação interna.	63
Figura 3.22 - Setup óptico da espectrometria de filtros ópticos utilizados em experimentos.	64
Figura 3.23 – Esquerda: esquema do uso de filtro óptico para reduzir o aquecimento nas fibras. Direita: equipamentos utilizados.	65

Figura 3.24 - Característica de Filtro espelho IR [94].....	65
Figura 3.25 - Esquema na medição dos espectros de amostras.....	66
Figura 3.26 - Atenuação de filtros em relação a comprimentos de onda.....	66
Figura 3.27 - Transmitância dos filtros em relação a comprimentos de onda.....	67
Figura 3.28 - Ensaio de temperatura e diâmetro do feixe de luz formado a uma determinada altura do deslocamento vertical.	67
Figura 3.29 - Desenvolvimento do ensaio medição de temperatura com o uso de filtro de acrílico.....	70
Figura 3.30 - Estrutura esquemática mostrando o nível adequado com temperatura de 60 a 70 °C na POF.....	72
Figura 3.31 - Fixação de porta-filtro e porta-feixe POF nos ensaios de temperatura POF.	73
Figura 3.32 - Valores de temperatura em feixe de POF sem/com uso de Filtro IR.....	74
Figura 3.33 – Ensaios de temperatura em relação à distância lente Fresnel e feixe POF, para vidro de espessura 0.5 cm.....	75
Figura 3.34 - Ensaios de temperatura em relação à distância lente Fresnel e feixe POF, vidro de espessura 1 cm.	76
Figura 3.35 - Ensaios temperatura em relação à distância lente Fresnel e feixe POF, do vidro de espessura 2 cm e fibra POF.	77
Figura 3.36 - Ensaios de temperatura em relação à distância lente de Fresnel e feixe POFs, para vários casos.	78
Figura 3.37 - Processo de cultivo e inóculo de microalgas.....	79
Figura 3.38 - Esquema do processo para a obtenção do peso seco como estimativa do crescimento a) amostras do substrato do cultivo – membranas de vidro b) Preparação de membranas e filtragem de amostras c) Estufa e dessecador d) Balança digital.	81
Figura 4.1 - Sistemas de cultivo implementados (a) PBR Janela (Convencional), (b) PBR-POF (inovador).	85
Figura 4.2 - Área destinada para o comissionamento dos dispositivos: 1) Rastreador solar; 2) PBR inovador 3) PBR de janela – convencional.....	85
Figura 4.3 - Curva de radiação PAR no PBR-POF e PBR-Janela.....	87
Figura 4.4 - Comparativo: Radiação PAR e Densidade celular no Cultivo 1.....	87
Figura 4.5 – Curvas comparativas Cultivo 1: Radiação solar e Radiação PAR em PBRs.	88

Figura 4.6 – Comparativo: Radiação PAR e Densidade celular no Cultivo 2.	89
Figura 4.7 : Curvas comparativas cultivo 2: Radiação solar e Radiação PAR em PBRs.	90
Figura 4.8 - Comparativo: Radiação PAR e Densidade celular no Cultivo 3.....	91
Figura 4.9 - Curvas comparativas cultivo 3: Radiação solar e Radiação PAR em PBRs.	92
Figura 4.10 – Graficos comparativos entre Cultivo 2 e 3, de crescimento de biomassa, com irradiação PAR e irradiação solar [96].	93
Figura 4.11 – Perfil lipídico de ambos cultivos, adaptado de [96].	94
Figura 5.1 – Diagrama esquemático proposta de um PBR-POF futuro.....	96

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Composição química de alguns alimentos humanos e de diferentes microalgas [48].	15
Tabela 2.2 - Tabela comparativa entre sistemas abertos e fechados [48].	25
Tabela 2.3 - Comparativo sobre eficiência de captação de luz e áreas em PBR fechados.	28
Tabela 3.1 - Medições de potência óptica na POF atingida pelo Laser CO ₂ .	59
Tabela 3.2 - Medições de potência óptica na POF atingido por o Laser CO ₂ com vibração	59
Tabela 3.3 - Medições de potência óptica na POF com furações.	59
Tabela 3.4 – Dimensões de furações da POF com Laser ativo em 10 ms	60
Tabela 3.5 - Medidas de temperatura com termopar (°C) sem filtro a cada minuto.	68
Tabela 3.6 - Medidas de temperatura usando acrílico como filtro com 26 cm de altura.	69
Tabela 3.7 - Medidas de temperatura usando acrílico e vidro como filtro.	70
Tabela 3.8 - Medidas de temperatura sem / com filtro IR.	74
Tabela 3.9 – Medidas de temperatura com vidro de espessura de 0.5 cm.	75
Tabela 3.10 - Medidas de temperatura com vidro de espessura 1 cm.	76
Tabela 3.11 – Medidas de temperatura com vidro de espessura 2 cm.	76
Tabela 3.12 - Medidas com espelho Hot com incidência 0°.	77
Tabela 3.13 - Composição e concentração das soluções de estoque do meio ASM-1.	79
Tabela 3.14 - Exemplificação do cálculo para determinação do peso seco da triplicata / dia.	82
Tabela 4.1 - Resultados obtidos nos sistema de iluminação de PBR com POFs.	94

Lista de Siglas

ASE – Automatic Sun-tracing equipament

ATP – Adenosine

B/E – Biomass Productivity per unit energy input, $\text{g W}^{-1} \text{d}^{-1}$

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CO₂ – Carbon Dioxide

DNI - Direct Normal Irradiance

FL – Focal Length

IIPBR – Internally Illuminated Photobioreactor

IR - Infrared

LHC – Light Harvesting Complex

GHI - Global Horizontal Irradiance)

GREENTEC – Laboratório de Tecnologia Verde

PAR – Photosynthetically active radiation

PBR – Photobioreactor

pH – Power of Hydrogen (potencial hidrogeniônico)

PMMA – Poly (Methyl Methacrylate)

POF – Plastic Optic Fiber

PVC – Polyvinyl Chloride (Policloreto de vinil)

PSI & PSII – Photosystem 1 and Photosystem 2

PWM – Pulse Width Modulation

NADPH₂ – Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Nas últimas décadas tem surgido um grande interesse pelo cultivo de biomassa microalgal para produtos comerciais, podendo destacar como mais relevante a produção de biocombustível. No entanto, existe um sério problema relacionado à contaminação do cultivo de microalgas, que está relacionada com o tipo de fotobiorreator (PBR) utilizado. Atualmente, os PBRs usados podem ser constituídos desde sistemas abertos (tipo “open ponds”), como a elevada probabilidade de contaminações ambientais e os sistemas fechados que apresentam elevado custo por serem confeccionados de materiais transparentes. Com isso os PBRs se tornaram limitantes importantes no aumento da produtividade de biomassa, para a produção de biodiesel a partir de microalgas.

Este projeto propõe o aproveitamento da radiação solar, pelo fato de ser inesgotável e limpa, se tornando uma forte opção de fonte energética, em comparação com outras energias convencionais. Desta forma, o sistema de iluminação consiste do uso de, um rastreador solar, projeto eletromecânico automatizado, responsável pela posição de uma lente de Fresnel, que se encarrega da concentração da luz solar em um área determinada, que neste caso é um feixe de fibras ópticas plásticas (*POFs-Plastic Optical Fiber*). As fibras ópticas permitem uma iluminação homogênea igualmente distribuídas, transportando a luz para o interior de um fotobiorreator. No fotobiorreator as microalgas são cultivadas para a produção de biodiesel.

Inicialmente, será apresentada uma revisão bibliográfica dos microrganismos, comumente utilizados para este fim, tipos de cultivo. Além disso, determinar a iluminação ideal dentro de um fotobiorreator para um cultivo eficiente de microalgas. Em adição a este estudo, o trabalho concentra-se no cálculo óptico do sistema para se obter os valores esperados de iluminação dentro do fotobiorreator.

Outro aspecto importante a ser abordado será o monitoramento da temperatura do feixe de POFs, visando manter a integração das propriedades físico-químicas da POF.

O sistema de iluminação, teve a aplicação de fonte natural, por meio da radiação solar e uma fonte artificial, através de um LED superluminescente para os dias nublados.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho visa o desenvolvimento de um sistema de iluminação inovador, baseado em rastreamento solar, seguido da concentração de energia através de uma lente de Fresnel, com fibras ópticas plásticas em um fotobiorreator fechado de material não transparente, oferecendo um sistema de cultivo de microalgas do baixo custo.

1.2 Objetivos Específicos

Desenvolver um sistema de iluminação baseada em concentração solar por lente de Fresnel e transmissão da luz por POF para iluminar o interior de um fotobiorreator, construído de material não transparente, que permita aproveitar a máxima intensidade de luz natural do dia no processo fotossintético.

Abaixo segue uma relação ordenada dos desenvolvimentos:

1. Confeção do feixe de POF.

Nesta etapa foram realizadas as ranhuras na lateral das POFs através de um laser de CO₂, visando uma melhor distribuição da luz natural no interior do PBR.

2. Desenvolvimento de um PBR fechado.

Estudar uma grande gama de fotobiorreatores que nos permitam o cultivo de microrganismos em pequena e grande escala na produção de biomassa. Para isto, este estudo visa a aplicação e desenvolvimento de um reator que permita reduzir custos e incrementar a durabilidade na sua implementação e facilitar a manutenção. Como também permitir a otimização da produção em massa dos cultivos, através do processo fotossintético por meio da incidência de luz. Visando na produção de biomassa, como matéria-prima para biocombustíveis e outros derivados (bioprodutos).

Os materiais usados na produção dos PBR já existentes são caros. Seu desenho é complicado, dificultando a limpeza e manutenção do fotobiorreator. Para resolver este problema se propõe o uso de materiais não transparentes (opacos), muito mais baratos do que o atual em uso (policarbonato).

O fotobiorreator desenvolvido possui volume similar aos sistemas já empregados em nível piloto. Com a finalidade de ocupar uma área menor que os PBRs convencionais, este PBR foi projetado a base de materiais não transparentes (opacos), muito mais baratos do que o atual em uso (policarbonato).

O modelo proposto possui as seguintes vantagens adicionais, além do uso de materiais não transparentes, quando comparado ao sistema de cultivo convencional, de sistemas abertos: a) sistema com menos contaminação; b) opção de ciclos claro e escuro,

o que favorece o aumento lipídico e a produção de biodiesel e c) ocupação pequena de área.

3. Estudo e avaliação dos fatores físico-químicos da POF.

Avaliar o efeito dos principais fatores físico-químicos da POF, através do monitoramento de temperatura, por conta dos raios Infra-vermelhos (IR) provenientes da radiação solar e fatores nutricionais relevantes para o crescimento e produção de lipídios;

Cultivar no sistema piloto de 30L as linhagens de microalgas selecionadas para avaliar a viabilidade do cultivo, e assim, posteriormente viabilizar para trabalhos futuros e projetar a uma escala maior de 1000 litros, por exemplo, fabricado em material de baixo custo e de alta durabilidade em relação o exposições ao meio ambiente (raios IR), como o polipropileno (muito utilizado em caixas de água residenciais).

4. Uso alternativo de iluminação: Solar e Artificial.

Para o sistema de iluminação se adaptou a luz solar e a luz artificial através de um LED superluminescente para os dias nublados. Ao utilizar a luz solar como fonte de iluminação das POFs, esta radiação será captada por uma lente de Fresnel, que acompanhará o deslocamento do sol por meio de um sistema de rastreamento solar ou equipo de rastreador solar automático (ASE), ou seja, com aproveitamento máximo da energia luminosa concêntrica em um único ponto atingindo o feixe de POFs.

A biomassa de microalgas produzida nestes sistemas será utilizada na produção de biodiesel, com a prévia separação de produtos de interesse de mercado como antioxidantes e carboidratos que podem ser usados para a produção do etanol.

1.3 Estrutura da Tese

Este trabalho esta organizado em 6 capítulos, os quais descrevem sobre todas as etapas da pesquisa realizada. No Capítulo 1 são descritos: a introdução, o objetivo do trabalho e o problema que se pretende analisar. O Capítulo 2 inicia com os fundamentos e revisão da literatura sobre a Energia solar, as microalgas, a fotossíntese, fatores que influenciam no processo na produção de biomassa, e sistemas de cultivos de microalgas existentes na indústria. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos adotados para o desenvolvimento da tese. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com a implementação do sistema de rastreamento solar para iluminar o PBR com processo de furação da POF, e uma descrição do desenho do PBR e por último o estudo

com ensaios da variação da temperatura no feixe de fibras POF. No Capítulo 5 são apresentados as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Energia Solar

A importância da exploração e aproveitamento racional da radiação solar deve-se, ao fato de ela ser inesgotável e limpa. Deste modo, futuramente esta fonte de energia pode se tornar a maior aplicação de energia, em comparação com outros tipos convencionais como o potencial hídrico e o petróleo. Com isto, conquistaremos um desenvolvimento sustentável, através do equilíbrio entre as dimensões social, econômica e ambiental.

A energia radiada pelo Sol cobre uma ampla faixa do espectro eletromagnético, conforme mostra na Figura 2.1. Essa energia alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos, sejam eles naturais ou artificialmente desenvolvidos. Dentre os processos naturais, destaque-se a fotossíntese (produção de biomassa) e o ciclo hidrológico (evaporação/precipitação).

O valor médio da radiação solar igual a 1.366 W/m^2 é definido como a constante solar (NREL, 2017), que vem a ser a divisão da potência solar radiada pela área irradiada. Mas, muitos autores consideram essa constante como uma aproximação a 1000 Wm^2 .

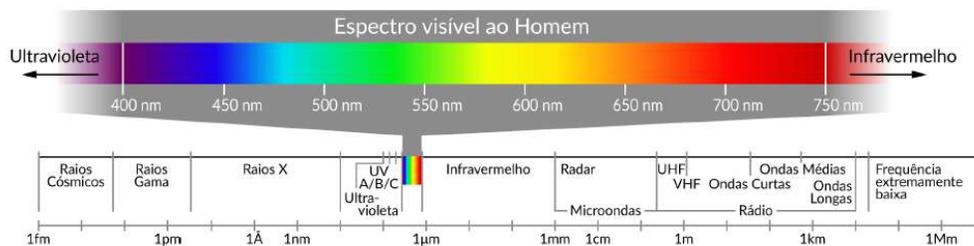


Figura 2.1 - Espectro de radiação solar, adaptada [1].

Na radiação solar são empregados dos termos: radiação horizontal global – GHI (global horizontal irradiance) e a radiação normal direta – DNI (direct normal irradiance). A radiação horizontal global corresponde à quantidade de radiação que se origina no Sol e, considerando-se todas as direções possíveis, atinge uma superfície horizontal estática, como por exemplo, painéis solares fotovoltaicos.

Já a radiação normal direta corresponde à quantidade de radiação que incide sobre uma superfície móvel, capaz de rastrear o Sol ao longo do dia todo.

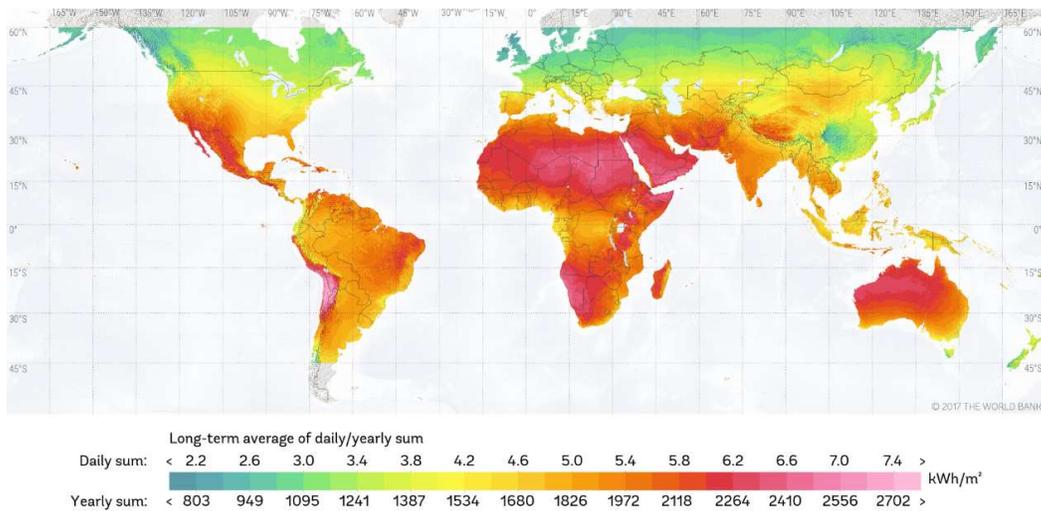


Figura 2.2 - Média Anual Global da incidência de radiação GHI, adaptada [2].

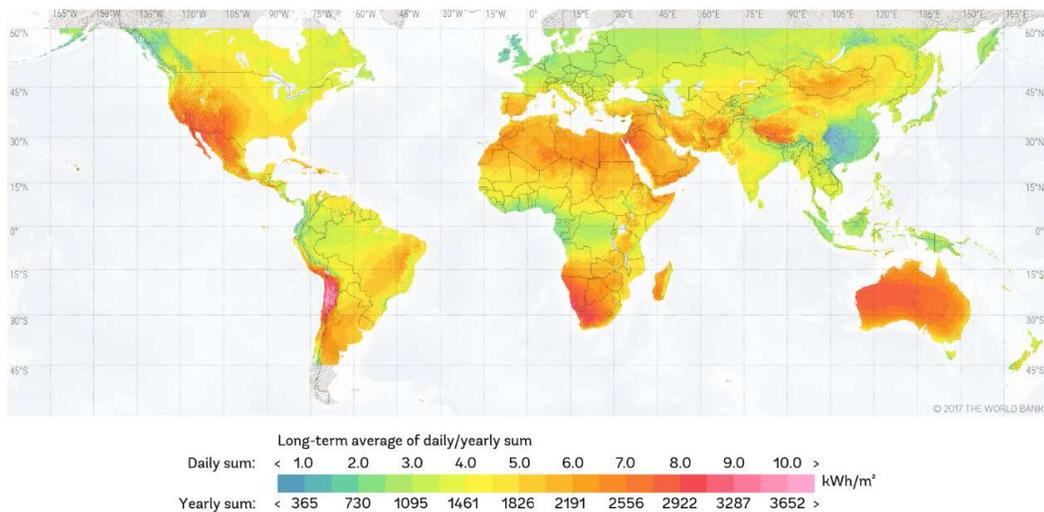


Figura 2.3 - Média Anual Global da incidência de radiação DNI, adaptada [2].

As Figuras ilustradas, mostram os índices de radiação solar tanto no plano GHI e DNI, globalmente ao longo do ano 2017. Nesta ilustração, os valores apresentados abaixo na escala de cores e valores adotado no mapa de radiação global, representando a média anual e a média diária de energia por unidade de área.

Se comparamos as escalas dos 2 tipos de radiação como à GHI referente à Figura 2.2 e a Figura 2.3 referente à DNI, podemos observar um aumento significativo do potencial energético em 35%, em condições da radiação direta DNI com valores máximos atingido no patamar de 3.652 kWh/m², em comparação dos 2.702 kWh/m² da média anual da radiação horizontal. Um ganho notável que demonstra a vantagem de sistemas com dispositivos móveis, como sistemas de rastreamento, permitindo o acompanhamento do Sol.

A energia solar incidente na superfície da Terra sofre uma atenuação a intensidade da radiação ao longo de seu percurso do Sol-atmosfera até a terra. A energia proveniente do Sol é emitida na forma de radiação eletromagnética, interagindo estes com a atmosfera, sofrendo processos de absorção e espalhamento (produzidos por moléculas de gases atmosféricos e particulados em suspensão). A atmosfera terrestre está constituída por gases atmosféricos e aerossóis. A fração seca da atmosfera (sem vapor d'água) é formada por 99% de Nitrogênio (N₂) e Oxigênio (O₂) e 1% de Argônio (Ar). Os outros constituintes gasosos da atmosfera são os chamados gases-traço (CO₂, O₃, entre outros), possuem um papel importante nos processos radiativos [3]. Os processos físicos de absorção ocorrem com moléculas de ozônio (O₃), vapor d'água, O₂ e CO₂ com bandas de absorção específica, e redistribuída através do fenômeno conhecido como dispersão de Rayleigh. A dispersão de Rayleigh da luz solar na atmosfera é a principal razão pela qual o céu é azul.

Na Figura 2.4 é ilustrado o espectro contínuo de radiação eletromagnética emitido pelo Sol que atinge o topo da atmosfera e a superfície da Terra após a atenuação pelos processos radiativos, como é mostrado na área verde do gráfico, onde se observa que existem comprimentos de onda da radiação atenuados totalmente, que não conseguem incidir na superfície terrestre.

O CO₂ desempenha um papel importante na contribuição no efeito estufa, responsável pela estabilidade da temperatura média da superfície terrestre, essa contribuição deve-se à capacidade do CO₂ e vapor d'água, de absorver IR (radiação infravermelho), refletindo parte da energia para o espaço. (Yamasoe e Correa, 2016).

O ozônio desempenha um papel de extrema importância, absorvendo parte da faixa espectral do Ultravioleta (UV) e dissociação do oxigênio molecular (O₂) em átomo (O). As nuvens são o principal fator modulador da radiação solar que incide na superfície, produzindo um espalhamento eficiente da radiação solar, dependendo da espessura.

A incidência da radiação dependerá da latitude local e do instante de tempo. Estima-se, que a energia solar incidente sobre a superfície da terra é da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial.

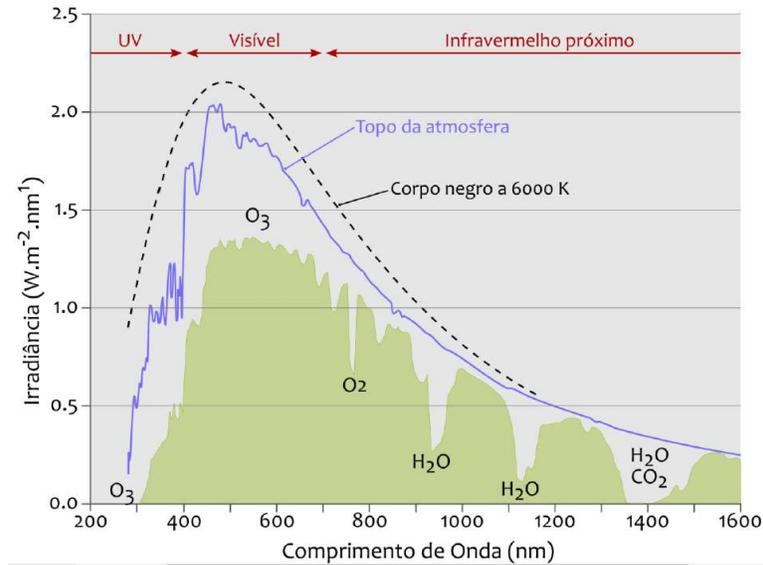


Figura 2.4 - Espectro eletromagnético da radiação solar, adaptada [1].

Uma aplicação no aproveitamento desta fonte de energia será utilizado num sistema iluminação inovador para a otimização de um processo de produção de matéria-prima para a geração de biocombustíveis, por meio de cultivo de microalgas.

Para um maior aproveitamento e eficiência da luz do Sol durante o dia, foi desenvolvido e implementado um rastreador solar, visando aproveitar melhor os raios solares. Por tanto, é importante observar que o território brasileiro é privilegiado pela exposição ao solar, por sua exposição geográfica. A motivação deste caso, é bem explicitada na Figura 2.5.

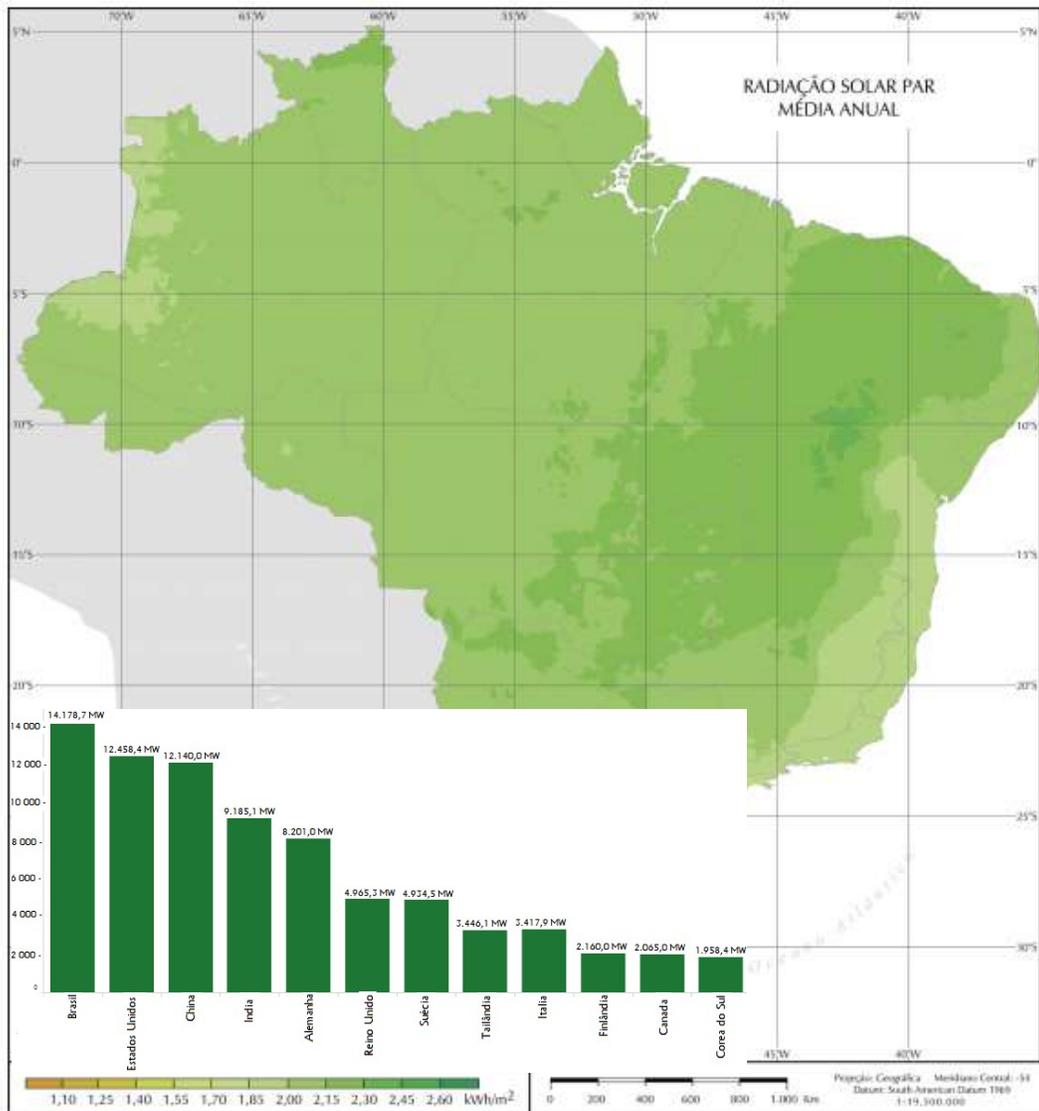


Figura 2.5 - Índices de radiação solar na faixa espectral fotossinteticamente atica PAR e quadro de destaque de países, que utilizam a biomassa como gerador energético, 2016, adaptada [4] e [5].

2.2 O rastreador Solar

Na sessão anterior foi mencionado sobre a utilização de um sistema de rastreamento solar na otimização do uso e aplicações dependente do Sol. Existem duas montagens principais, denominadas como Equatorial e Altazimutal. A montagem destes sistemas deve ter algumas características básicas, além de ser um sistema estável, robusto, leve e também permitir que ele seja apontado para qualquer ponto acima do horizonte.

Este mecanismo é chamado de montagem e é um sistema que gira em torno a um eixo principal, o qual suporta um eixo secundário montado ortogonalmente ao eixo principal, que permitirá a liberação de movimentação. O alinhamento de um sistema rastreador é denominado como orientação da montagem.

Diversas aplicações relacionadas a astronomia não precisam de um ponto de orientação, desde que o conhecimento do observador possa suprir esta falta e ele consiga localizar no céu o fenômeno em questão. O que define este mecanismo da montagem Equatorial ou Altazimutal, não é a sua construção e sim a orientação de seus eixos.

Para um mecanismo altazimutal o eixo principal permite movimentos no sentido do azimute, que é o ângulo horizontal, partindo do Norte no sentido do Leste, Sul, Oeste e chegando novamente ao Norte. Para fazer este movimento um eixo é montado na vertical, e a origem posicionada no Norte verdadeiro, enquanto o segundo eixo permite movimentos no sentido da altura, verticalmente entre o horizonte e o zênite.

O zênite é um ponto imaginário interceptado por um eixo vertical traçado a partir da cabeça de um observador localizado na superfície terrestre, e que se prolonga até a esfera celeste que é uma esfera de raio indefinido e concêntrica com as coordenadas da Terra.

Na Figura 2.6 exibe-se as coordenadas Altazimutais e Equatoriais mencionadas anteriormente.

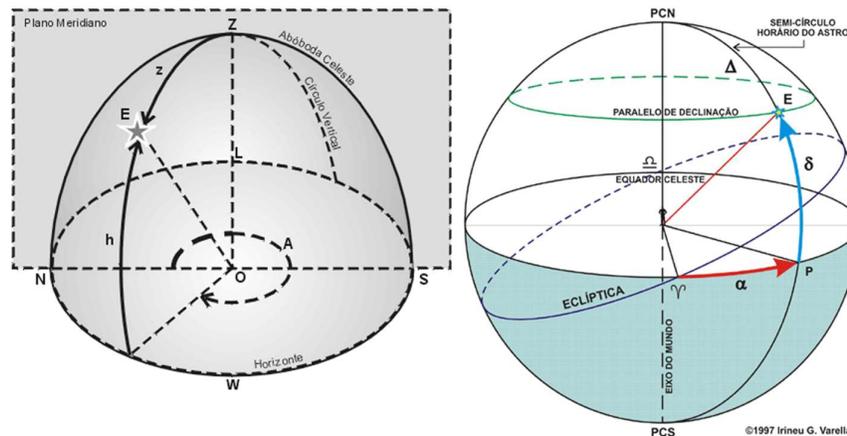


Figura 2.6 - Coordenadas altazimutais e Coordenadas equatoriais,

Na montagem equatorial, o eixo primário é montado precisamente paralelo ao eixo terrestre, deste modo aponta para o polo celeste (Eixo Polar). A movimentação no sentido da declinação, de 0° no Equador até $+90^\circ$ no polo Norte celeste, e -90° no polo Sul celeste é definido pelo eixo secundário.

O ângulo de ascensão reta representado pela letra grega (α), equivale ao arco medido no Equador celeste, entre os círculos horários que passa pelo ponto vernal e pelo astro a ser observado, no sentido anti-horário. Assim, o ângulo de declinação (δ), é o arco do meridiano do astro compreendido entre o plano do Equador celeste e o próprio astro, mede-se de 0° a 90° para o Norte ou para o Sul, sendo por vezes representado com um valor entre $+90^\circ$ e -90° (+ representando o Norte e – o Sul).

A montagem equatorial permite a utilização de somente um motor para compensar a rotação da Terra (conhecido como acompanhamento).

A superfície da Terra é quase esférica e possui uma inclinação do eixo polar imaginário em torno da qual a terra gira, fazendo com que a radiação do Sol não atinja a superfície da mesma forma no decorrer do ano. Isto é devido a vários parâmetros como a reflexão e absorção dos raios de luz pelas condições atmosféricas (coberturas de nuvens, concentração de gases atmosféricos, entre outros).

2.3 Histórico dos microorganismos

A preocupação em questões ambientais tem se tornado cada vez mais evidente em função do uso de recursos naturais em processos produtivos, acarretando assim, um elevado potencial de poluição desses recursos pelas indústrias [5].

Segundo [7], são as microalgas caracterizadas como microrganismos fotossintéticos, que combinam água e dióxido de carbono atmosférico com luz solar para produzirem várias formas de energia na formação de biomassa (polissacarídeos, proteínas, lipídios e hidrocarbonetos). Com isso podendo ser utilizada na produção de biocombustíveis e suplementos alimentares, e também na captura de dióxido de carbono da atmosfera, no combate a poluição como processo biológico.

Alguns microrganismos, tais como as leveduras, bactérias, fungos e as algas são capazes de acumular óleo durante o seu metabolismo [8], sobretudo em redução de nitrogênio, já que não podem sintetizar proteínas, acumulam óleos como fonte de energia. Neste cenário, destaque tem sido dado às microalgas de diversas espécies, as quais tem sido utilizadas em estudos de efluentes implementado na biofixação de metais pesados tóxicos [9] e [10], biofixação de CO_2 e produção de biocombustíveis [11].

Devido ao seu reduzido tamanho, as microalgas não apresentam um esqueleto rígido para combater a força da gravidade como as plantas superiores, podendo ser organismos unicelulares ou coloniais e apresentar ou não mobilidade, [12]. Os óleos encontrados nas microalgas possuem características físico-químicas similares aos de óleos

vegetais, [13] e por isto são consideradas como uma potencial matéria-prima para a produção de biodiesel.

As microalgas tem cerca de 15 vezes mais óleo que a palma, oleaginosa de maior produtividade. Estima-se que a produção de óleos nas microalgas varia entre 15.000 e 30.000 litros/ha [14]. Outra característica das algas é que elas podem dobrar sua biomassa a uma taxa exponencial, exigindo menos área de superfície para a produção de biocombustíveis e bioprodutos[15]. Os maiores problemas do uso das microalgas como matéria-prima para biodiesel reside na seleção de espécies promissoras com alto teor de TG (triglicerídeos), condições ótimas de cultivo, adaptação e crescimento das culturas (inóculo) nos sistemas de cultivo em larga escala e, sobretudo, a redução dos custos de produção.

A produção de biomassa microalgal requer também insumos básicos: energia, CO₂, água e nutrientes minerais. A energia pode vir da radiação luminosa (solar ou artificial) ou de ligações químicas de compostos orgânicos. A radiação solar é um recurso natural gratuito, mas varia com o ciclo diário (em média, dez horas de luz por dia, variando ainda o ângulo de incidência do fluxo luminoso sobre a superfície terrestre) e estação do ano.

Já [16], descreve que, devido o aumento na demanda de microalgas foram criados diversos sistemas de cultivo. Sendo os tanques de cultivos e fotobiorreatores mais convencionais. Seriam esses: sistemas abertos, ou *open-ponds*, e também os fechados, chamados de *closed ponds*.

2.3.1 Microalgas

As microalgas são aquáticas e geralmente microscópicas (unicelulares ou multicelulares) podendo formar colônias. Sua coloração variada é característica oportunizada pela presença de pigmentos e mecanismos fotoautotróficos. O termo microalga está relacionado às dimensões microscópicas, grande parte das algas unicelulares e protozoários marinhos apresentam medidas cerca de (*nanoplânctons* 2 a 20 µm) [17].

As microalgas como microrganismos fotossintéticos, são capazes de usar a luz solar para metabolizar água e dióxido de carbono (CO₂). A fixação de CO₂ por parte das microalgas contribui de forma significativa no ciclo global do carbono, pois o CO₂ produzido pela

atividade humana pode ser parcialmente consumido pelas microalgas, convertendo-o em biomassa e outros produtos metabólicos por meio da fotossíntese.

As microalgas, devido às suas propriedades biotecnológicas e vantagens sob as oleaginosas convencionais, têm sido utilizadas no desenvolvimento de tecnologias limpas, podendo atuar na biorremediação de metais pesados, bem como na biofixação de nitrogênio e fósforo. Isto se deve à essencial importância destes seres nas diversas cadeias tróficas e a possibilidade de aplicação comercial em distintas áreas como no tratamento de águas residuais, produção de energia e obtenção de compostos de interesse para as indústrias alimentícia, química e farmacêutica, dentre outras [18] e [48].

As microalgas produzem mais oxigênio que todas as plantas no mundo, sendo responsável pelo 60% da produção primária da Terra [18] e podem também ser usadas para capturar CO₂ reciclando 1.7 kg de CO₂ requerido para cada kg de biomassa gerada [19]. As algas possuem uma eficiência fotossintética e taxa de crescimento muito superior aos vegetais terrestres. A biomassa microalgal apresenta cerca de 50% de carbono na sua composição, assim o fornecimento deste nutriente aos cultivos representa um importante componente dos custos de produção, seja gasoso na forma de dióxido de carbono, ou sólido, principalmente na forma de bicarbonato [20].

Segundo [21], a biofixação de CO₂ por microalga deve-se principalmente a capacidade fotossintética deste microrganismo ao uso deste gás como fonte de nutrientes. Cerca de 45% de toda fotossíntese ocorre em ambientes aquosos .

Serão apresentadas algumas vantagens do uso de microalgas na produção de biocombustível:

- a) Rápido crescimento e elevada concentração de lipídios;
- b) Mecanismo fotossintético similar ao das plantas superiores convertendo CO₂ em carboidratos e lipídios;
- c) Remoção de grandes quantidades de CO₂ do meio ambiente;
- d) Podem ser produzidas a partir de resíduos ou efluentes;
- e) Pode-se manipular geneticamente a fim de aumentar a fotossíntese e a concentração de triacilgliceróis, a fim de direcionar a biomassa para a produção de biodiesel;
- f) Emissão menor de dióxido de enxofre, óxido nítrico e outros contaminantes em comparação com diesel [22].

A seguir serão descritos vários tipos de microalgas e será mostrada a comparação da composição química de alguns alimentos humanos e as microalgas.

Microalgas *Scenedesmus* sp.

A *Scenedesmus* sp. é uma microalga aquática, dominante em lagos de água doce e rios, pertencente ao grupo das algas verdes. Apresenta colônias formadas por células elipsoidais, ovoides, arranjadas lado a lado, as colônias constituídas por células alinhadas são agrupadas normalmente em número de 4 a 8 células, raramente 16 ou 32. Seu tamanho pode variar entre 3 a 31 μm , segundo a espécie sendo as mais conhecidas *S. quadricauda*, *S. obliquus*, *S. acutus* e *S. dimorphus*, como é mostrado na Figura 2.7. O perfil de ácidos graxos desta microalga é maioritariamente composto de 16 a 18 carbonos, tornando-se atrativos para a produção de biodiesel [46].

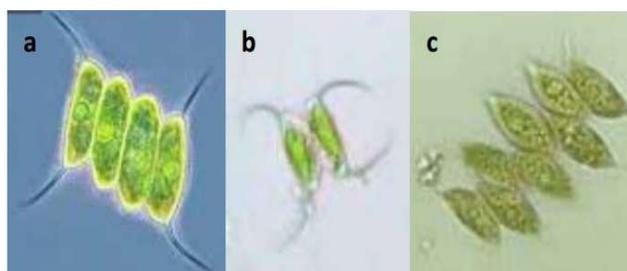


Figura 2.7 - Espécies de *Scenedesmus*: (a) *S. quadricauda* (b) *S. obliquus* (c) *S. acutus* adaptada [46].

As microalgas *Scenedesmus* suportam temperaturas entre 20°C e 38°C, sendo ótimo de 35°C para o crescimento [47]. O teor de lipídios das microalgas *Scenedesmus* sp. podem variar de 11 a 20 %, em cultivos padrões, entretanto esse teor de lipídios pode ser superior a 70% em meio de cultivo otimizado.

A Tabela 2.1 mostra uma comparação da composição química no porcentual de alguns microrganismos microalgais e alimentos humanos, pode-se observar que a microalga *Scenedesmus* sp. apresenta até 73% de conteúdo lipídico, 56% em proteínas e 52% em carboidratos.

A *Scenedesmus* sp. tem teores de carboidratos elevados (principalmente amido). Os carboidratos são reservas de polissacarídeos e constituintes da parede celular os quais podem ser hidrolisados e convertidos em glicose, para a produção de biocombustível [50].

Tabela 2.1 - Composição química de alguns alimentos humanos e de diferentes microalgas [48].

Produto	Proteínas (%)	Carboidratos (%)	Lipídios (%)
Fermento	39	38	1
Ovo	47	4	41
Leite	26	38	28
Carne desossada	43	1	34
Soja	37	30	20
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50 - 56	10 - 17	12 - 14 11 - 55 *
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	47	-	1 - 9 1,9 - 18,4 *
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8 - 18	21 - 52	16 - 40
<i>Scenedesmus sp</i>	-	-	19,6 - 21,1 *
<i>Dunaliella bioculata</i>	49	4	8
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Spirulina platensis</i>	46 - 63	8 - 14	4 - 9
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11
<i>Anabaena cylindrica</i>	43 - 56	25 - 30	4 - 7
<i>Scenedesmus rubescens</i>	-	-	73 ^a

NOTA -- * [42] ; ^a [49].

2.3.2 Fotossíntese

O processo fotossintético é a forma mais eficiente de captura de energia solar. A fotossíntese descreve uma reação de oxirredução, cuja força motriz é a energia luminosa captada por moléculas de clorofila ou outros pigmentos fotossintetizantes. Nesta reação, a água doa elétrons para a redução do CO₂ até carboidratos tendo como coproduto o O₂.

A energia de luz, é absorvida como fóton e armazenada como energia química através da formação de ligações químicas. Esta energia é absorvida por pigmentos fotossinteticamente ativos, sendo a *clorofila a*, o principal deles. Porém na Figura 2.8, mostre-se que outros pigmentos, chamados de pigmentos acessórios (*clorofilas b*, *clorofila c*, *carotenóides*), também participam do processo fotossintético [23]. Por isso, podem ser usadas para estimar a biomassa no cultivo, já que geralmente a quantidade de clorofila é diretamente proporcional ao crescimento celular [24]. A luz vermelha aumenta

os níveis de *clorofila a* e *carotenóides*. Sabe-se que a radiação UV-B inibe a fotossíntese das plantas [25].

Os carotenóides podem ser encontrados nos complexos coletores de luz (LHC), auxiliando na absorção e transferência de energia. Por outro lado, os LHC podem desempenhar um papel de proteção do aparato fotossintético, tanto como elementos de dissipação de energia, como o ciclo das xantofilas [26].

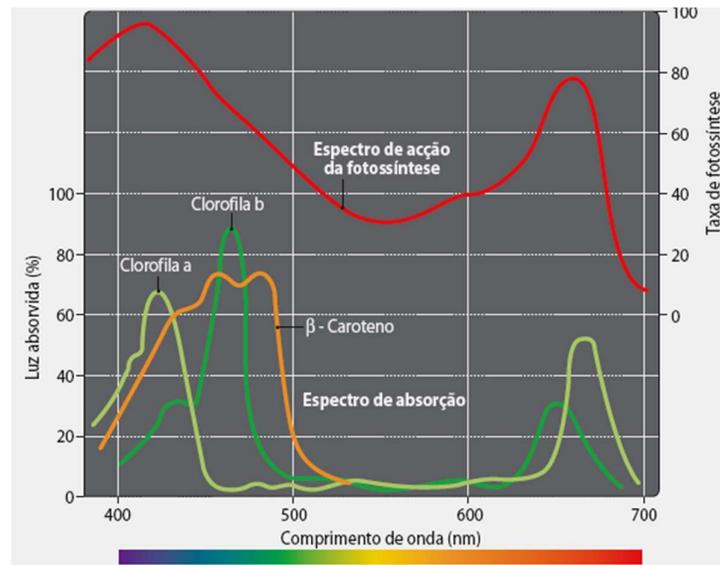


Figura 2.8 - Espectro de absorção de alguns pigmentos fotossintetizantes, adaptada [27].

De acordo com [28], o processo de oxidação da fotossíntese é dividido em duas fases: reação clara (bioquímica) e a reação escura (química). A reação clara inclui a absorção da luz, transferência de elétron e fóton. Os fótons de luz são convertidos em energia química gerando um redutor bioquímico, resultando na produção de NADPH₂ (Nicotinamida adenina difosfato), ATP (Adenosina trifosfato) e O₂ para a fixação de carbono inorgânico. Na fase escura, que ocorre no estroma, apresenta a redução de CO₂ e os produtos produzidos durante a reação clara (NADPH₂ e ATP) são utilizados na redução bioquímica sequencial de dióxido de carbono em hidrocarbonetos.

A fotossíntese começa com a captura de um fóton por um elétron num anel conjugado de ligações duplas no interior de uma molécula pigmento causando uma excitação. O nível de energia desta excitação determina o comprimento de onda da luz que pode ser coletada pelos pigmentos nos organismos fotossintéticos [29]. Os fotossistemas responsáveis pela captura da luz solar, são constituídos por um extensivo

Sistema de Antenas que consiste em um complexo de coleta da luz (LHC) que absorvem energia luminosa na região fotossinteticamente ativa (400 -700nm) e transferem para os centros de Reações P680 e P700 que juntos formam um sistema fotossintético oxigênico, fotosistema I (PSI) e fotosistema II (PSII) [30]. A energia do estado de pigmentos excitados aumenta com a distância do centro de reação, quanto mais próximos ao centro de reações, menor energia possuem do que os mais distantes.

Carotenóides absorvem mais fortemente na região azul (400-500 nm) e transferem a excitação de energia para as clorofilas, fazendo a fotossíntese eficiente sobre uma ampla gama de comprimento de onda. Esse gradiente de energia faz com que a transferência de excitação seja energeticamente favorável.

O centro de reação P680 de PSII tem uma forte absorção em 680 nm, isto significa que a energia de excitação de cada fóton com comprimentos de onda menor a 680 nm, podem ser transferidos para P680 e o centro de reação em PSI, absorve mais fortemente em 700 nm [31]. Os fótons excitam os centros de reação (P680 para o PSII e P700 para o PSI) e um elétron é ejetado.

Existem dois tipos de fotossistemas na fotossíntese de oxidação PSII e PSI, que operam em série como é mostrado na Figura 2.9, onde os elétrons ejetados da clorofila viajam através de uma série de transportadores de elétrons organizados no “esquema Z”, o oxidante forte gerado pelo PSII oxida a água, enquanto o redutor forte produzido pelo PSI, que reduz o NADP.

O fotossistema II (PSII), onde a energia de excitação entre 90 a 95% é canalizada através de pigmentos em direção ao P680, que é levado a um nível de energia mais elevado (P680*). A energia de excitação permanece ativa dentro do centro de reação no percurso (P680 → 680*) para fomentar um elétron de uma órbita cheia de maior energia para uma órbita vazia de menor energia. O elétron é rapidamente passado para um aceptor gerando uma oxidante.

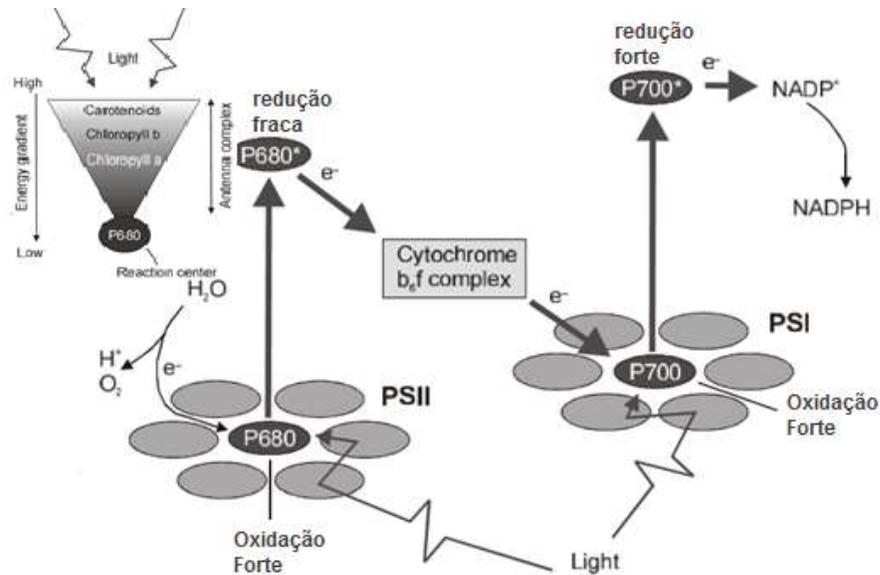


Figura 2.9 - Esquema Z da Fotossíntese, adaptado [31].

Na Figura 2.10, o PSI e PSII são inseridos na camada dupla de lipídeo das ditas membranas tilacóides encerradas no espaço interior chamado de lúmen. A forte oxidação formada depois da excitação do centro de reação PSII induz divisão da água em oxigênio, capaz de liberar elétrons e fótons sendo estes deixados no lúmen e podem ser subdivididos em: lado acceptor que recebe elétrons da oxidação do P680, e a parte doadora que reduz o P680 usando os elétrons da oxidação da água.. Num processo contínuo os elétrons são usados para reduzir o centro de reação P680 e depois usando estes elétrons para renovar excitações do centro de reações PSII excitado P680* sendo transportados para os aceptores PQ e PQH₂ (plastoquinonas). Fótons são apanhados a partir do meio envolvente (stroma) produzindo uma redução plena de plastoquinona (PQH₂) e estes transportam em direção ao complexo citocromo b₆f. Através do complexo b₆f citocromo os elétrons são transferidos para o Plastocianina (PC), uma proteína solúvel que por sua vez reduz o P700* (P700 oxidado) . O PSI não é só usado para a oxidação ao centro de reação depois da excitação da luz introduzida, mas também para reduzir oxidação de fosfato dinucleótido adenina de nicotinamida (NADP⁺) para NADPH. O PSI canaliza a transferência de elétrons da plastocianina PC reduzindo o centro de reação e depois renovando a excitação da luz introduzida, localizada no lúmen do tilacóide , para a ferredoxina (Fd), localizada no estroma da membrana tilacóide, que reduz NADP a NADPH na presença da ferredoxina-NADP (FNR). A excitação do P700 resulta na transferência de um elétron para uma clorofila monomérica (A0), uma filoquinona (A1)

e três centros Fe-S, até a ferredoxina. O centro de reação P700 é reduzido por um elétron pertencente da plastocianina (PC).

A transferência de elétrons da água para o NADP^+ envolve a transferência de H^+ para o lúmen do tilacóide através do b_6f resultando na formação de uma gradiente de prótons, gerando a síntese de ATP (adenosina trifosfato). Fótons e elétrons são recombinados através do FNR (ferredoxina – NADP^+ oxirredutase) produzindo NADPH. O NADP^+ é reduzido para NADPH através da ação de FNR o qual é utilizado no ciclo de Calvin para reduzir o CO_2 .

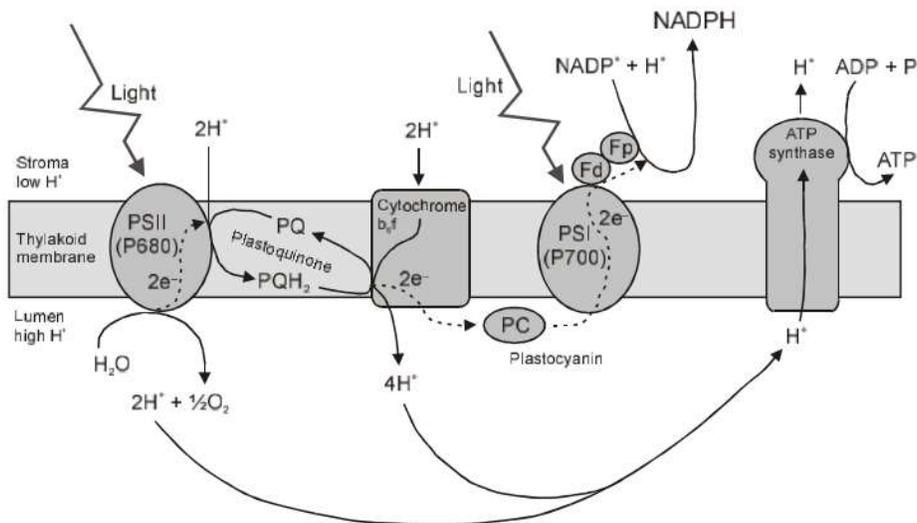


Figura 2.10 - Esquema Z Fotossíntese. adaptado [31].

Através do ciclo de Calvin, utilizando ATP e NADPH, são produzidos açúcares, óleos, amidos e outras biomoléculas, acontecendo simultaneamente a fixação do CO_2 . Os produtos resultantes da interconversão biológica de energia luminosa em energia química (ATP e NADPH) são utilizados para assimilação fotossintética de CO_2 , através do ciclo fotossintético de redução do carbono, também conhecido como ciclo de Calvin, que ocorre em 4 fases:

- 1 . Fase de carboxilação - Refere-se à reação em que o CO_2 é adicionado ao açúcar de 5 carbonos, ribulose bisfosfato, para formar duas moléculas de fosfoglicerato . Esta reação é catalisada pela enzima ribulose bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco).
- 2 . Fase redutora - Para converter o fosfoglicerato em produtos de 3 carbonos (Triose-P), deve-se adicionar energia sob a forma de ATP e NADPH_2 em duas etapas: Fosforilação de fosfoglicerato e depois a redução de difosfoglicerato (glicerato-bis-P).

3 . Fase de regeneração - O fosfato Ribulose (Ribulose-P) é regenerado para posterior fixação de CO₂ em uma série complexa de reações, para produzir açúcares de 5 carbonos.

4 . Fase de produção - Produtos finais primários de fotossíntese são considerados carboidratos, mas os ácidos graxos, aminoácidos e ácidos orgânicos também são sintetizados na fixação fotossintética de CO₂. Vários produtos finais podem ser formados em diferentes condições de intensidade de luz, concentrações de CO₂ e O₂ e nutrição.

2.4 Monitoramento de parâmetros relevantes de um PBR que influenciam no crescimento de microalgas

Dependendo da produção de interesse, se faz a escolha da cepa desejada. Existem vários fatores que influenciam o crescimento celular no cultivo destes microrganismos e, portanto, precisam ser levados em consideração para efetuar o incremento da produção, resultando da interação entre fatores biológicos, físicos e químicos [32]. Os principais fatores físico-químicos necessários ao crescimento das microalgas são: luz, temperatura, pH, aeração e nutrientes.

2.4.1 Intensidade luminosa

Com a finalidade de introduzir um conceito de eficiência para o processo de fotossíntese é preciso definir a Radiação Fotossintética Ativa (PAR) que corresponde ao comprimento de onda no espectro solar completo. A PAR é considerada como sendo o fluxo de fótons na faixa de 400 a 700 nm do espectro solar que são projetadas em uma superfície de área por um tempo. Sabe-se que a fotossíntese é uma conversão fotoquímica onde cada molécula é ativada pela absorção de um fóton, surgindo o interesse de expressar a energia luminosa incidente considerando a quantidade de fótons. A energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda, portanto um fóton de luz azul é mais energético do que uma de luz vermelha.

A potência óptica que geralmente é mencionada em W/m² ou J/m²s¹, ou também como fluxo luminoso medido em lúmens aplicado para o cálculo em luminosidade de interiores, estudos aplicados a plantas e microrganismos fotossintetizantes, é mais relevante a quantidade de luz mensurada em termos de número de fótons que atingem uma superfície por unidade de tempo e posteriormente mensurada para μmol.fótons.m⁻²s⁻¹.

Os fotobioreatores comerciais utilizam iluminação tipicamente entre os valores de 200 e 400 μmol.fótons.m⁻².s⁻¹, existem condições intermitentes onde é possível pulsos de 5.000 μmol.fótons.m⁻².s⁻¹ [33].

A irradiância solar direta média num dia ensolarado que atinge a superfície da Terra é aproximadamente 1000 W/m^2 ($100\,000 \text{ lux}$), dos quais a PAR representa cerca de 40% (400 W/m^2 ou $1800 \mu\text{mol.fóton.m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) [18].

A atividade fotossinteticamente ativa é medida em termos de produção de oxigênio ou taxa fotossintética celular (i. e. a capacidade de captura de fótons) em função da intensidade luminosa, que é representada pela curva fotossintética mostrada na Figura 2.11. A inclinação inicial é $\alpha = P_{\text{max}} / I_K$, onde I_K é a saturação da irradiação e P_{max} é a taxa máxima da fotossíntese. A fotossíntese bruta é igual a soma do oxigênio produzido (fotossíntese líquida) com o oxigênio consumido durante a respiração. Em locais com baixa intensidade de irradiação, a fotossíntese depende linearmente da intensidade luminosa. Por outro lado, com o aumento da irradiação, a produção da fotossíntese torna-se cada vez menor. Esse fato ocorre devido à saturação do aparato fotossintetizante que fica incapaz de transformar mais energia luminosa em energia química. Esse fenômeno é conhecido como fotoinibição.

O fotoperíodo que se utiliza normalmente é de 10:14 ou 12:12 horas de luz: escuro, embora a maioria das espécies cresçam bem sob uma iluminação contínua, a divisão celular de muitas espécies ocorre em períodos de escuros [34].

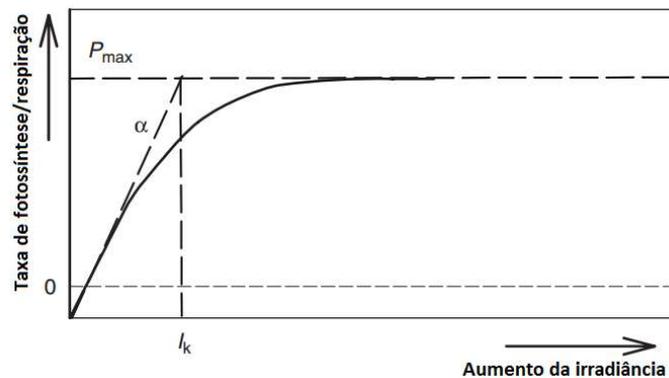


Figura 2.11 - Curva de resposta da fotossíntese á intensidade luminosa [48] .

2.4.2 pH e CO₂

Segundo [35], o pH possui um papel importante no cultivo das microalgas, determinando a solubilidade do dióxido de carbono e minerais no meio, a maioria destes microrganismos requer diferentes pH. O controle do pH do cultivo de microalgas depende de vários fatores como a quantidade de dióxido de carbono dissolvido e a temperatura.

O pH do meio de cultura tem tendência de incrementar com aumento da densidade celular e com a idade do cultivo, devido ao consumo de CO₂ por parte das microalgas.

Quando a densidade celular na cultura for alta, poderá ser adicionado CO₂ para permitir a correção de pH e diminuí-lo, podendo este atingir o seu máximo (pH=9) durante o crescimento das microalgas [36]. Os microrganismos podem crescer em uma gama relativamente grande de pH, sendo prejudicial as variações drásticas no pH, que podem causar o rompimento da membrana celular [37].

2.4.3 Nutrientes

Os nutrientes do meio de cultivo possuem relevância quanto ao crescimento celular. Os principais limitantes são: carbono, nitrogênio, fósforo e ferro [17].

O nitrogênio compõe diversas substâncias do metabolismo primário e pode ser encontrado em várias concentrações no interior das células algáceas na forma inorgânica (nitrito, nitrato e amônio), que é componente fundamental na formação de proteínas, ácidos nucleicos e pigmentos fotossintetizantes [38] e [39].

O fósforo é considerado um nutriente essencial para as microalgas, pois atua na regulação do metabolismo celular, em ambos os fotossistemas na síntese de lipídios e carboidratos, e também no fornecimento de fosfatos para a geração de energia e na constituição de moléculas estruturais (ATP, açúcares fosfatados, ácidos nucleicos e fosfoenzimas)

2.4.4 Temperatura

A temperatura constante no cultivo das microalgas é um fator importante, pois proporciona maior estabilidade para os experimentos, além de maior reprodutibilidade de resultados. A temperatura tem impactos significativos na taxa de crescimento, no tamanho da célula e na composição bioquímica das microalgas. A temperaturas inferiores a 18 °C podem desacelerar o crescimento e superiores a 35 °C podem ser letais para a maioria das espécies de microalgas [40].

O controle da temperatura nos cultivos em laboratório é facilmente alcançado através de salas climatizadas. Por outro lado, o controle da temperatura para os cultivos de microalgas em escala de produção maior é complexo, pois nem sempre é possível manter a temperatura constante do sistema [23].

2.4.5 Aeração

O aeração numa cultura de microalgas é de extrema importância, pois impede que não ocorra sedimentação, garantindo que as células se mantenham igualmente expostas à luz e aos nutrientes, evita a estratificação térmica, homogeneiza a cultura, e potencializa

as trocas gasosas [41]. Uma aeração muito intensa pode danificar os microrganismos sendo aconselhável um fluxo suave [42].

A agitação de um cultivo de microalgas permite que as células fiquem suspensas no meio de cultura, melhorando a eficiência da captação da luz, favorecendo a troca gasosa e também auxilia a homogeneidade dos nutrientes. Todos estes fatores influenciam na produtividade de biomassa microalgal [43]. Quando utilizado ar atmosférico comprimido, recomenda-se utilizar filtros antes do ar ser injetado nos cultivos, a fim de diminuir a carga de bactéria e outras partículas, evitando a contaminação do cultivo.

2.5 Curva de crescimento das microalgas

A taxa metabólica dos microrganismos é afetada pela temperatura, que deve ser escolhida conforme a espécie estudada e a finalidade do cultivo. Geralmente, opta-se pela temperatura de 20 °C, tolerável, embora possa não favorecer um crescimento ótimo. O cultivo pode ser iluminado através de luz natural e a luz artificial [44] que simula o espectro do comprimento de onda (350 - 700 nm), necessária na fotossíntese, mas pode causar aquecimento do cultivo. Lâmpadas frias não causam aquecimento, não sendo emitidos comprimentos de onda da região do vermelho, e podem gerar crescimento insatisfatório. A luz solar, sem excesso, pode estimular o crescimento sendo recomendável distância de 25 a 30 cm do cultivo para minimizar o aquecimento.

O aumento exponencial na densidade de microalgas até que ocorra o esgotamento de alguns fatores limitantes. Um desses fatores poderá ser a concentração de nutrientes que diminuem ao longo do tempo. Conforme os produtos residuais pelas células vão aumentando ao longo do crescimento, podem inibir o crescimento [11].

Na Figura 2.12, ilustra a curva de crescimento típico segundo uma curva sigmoide, que consiste em diferentes fases de crescimento [40].

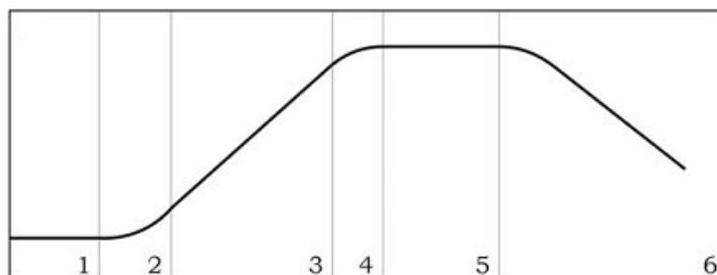


Figura 2.12 - Curva de crescimento microbiano, adaptada [40].

- **Fase Lag de aceleração (1 e 2)**

A fase lag ou fase de latência corresponde à fase de adaptação fisiológica às condições do novo meio de cultura. O atraso no crescimento das microalgas pode estar relacionado com a presença de células não-viáveis. A taxa de crescimento nesta fase é zero [44]. Seguidamente, temos a fase de aceleração em que a adaptação já se encontra completa.

- **Fase Exponencial (3)**

Nesta fase começa o crescimento e a multiplicação das microalgas, atingindo a fase máxima de multiplicação celular e de crescimento exponencial. A cultura é composta por células jovens e bioquimicamente mais ricas em proteínas do que lípidos [44]. As microalgas multiplicam-se até que exista a saturação de minerais e luz solar.

As microalgas duplicam a sua biomassa num prazo de 24 horas durante a fase exponencial e geralmente as culturas de microalgas contém mais proteína, enquanto na fase estacionária possuem mais hidratos de carbono e glicogénio [42].

- **Fase de desaceleração (4)**

Quando a taxa de crescimento celular começa a diminuir, é indicativo de que a cultura começou a entrar na fase de desaceleração, devido a diminuição da quantidade de luz que chega às células, alteração de pH, ao déficit de CO₂ [40].

- **Fase estacionária (5)**

As microalgas continuam a aumentar, porém a taxa de crescimento começa a diminuir até atingir o zero, entrando na fase estacionária. Nesta fase a concentração de células permanece constante no seu valor máximo, até se esgotarem os nutrientes [45].

- **Fase morta (6)**

A fase morta ou o *crash*, caracterizada por uma taxa de crescimento negativa, onde o meio começa a deteriorar-se muito, devido ao acúmulo de produtos de excreção tóxicos e ao esgotamento de nutrientes, até não poder sustentar a cultura. A densidade celular diminui rapidamente e a cultura entra em colapso [40].

2.6 Principais Sistemas de Cultivo de Microalgas.

Os cultivos são realizados em dois tipos de sistemas: Sistemas abertos (*Open pond*) são os sistemas frequentemente usados e os sistemas fechados (*Closed ponds*) comumente chamados de fotobiorreatores usados em painéis de forma plana, em forma de serpentinhas, espirais ou cilindros, construídos com tubos de plástico, vidro ou policarbonato. Nos fotobiorreatores é possível controlar as condições de cultivo através de quantidade de

nutrientes, temperatura, iluminação, pH etc. Isto implica uma elevada produtividade, viabilizando a produção comercial de uma série de compostos de elevado valor agregado [51] e [52].

No entanto, os materiais transparentes (Vidro, Acrílico ou Policarbonato) usados na construção dos fotobiorreatores são caros, e de difícil manutenção, devido à elevada probabilidade de ocorrer acidentes como é o caso do vidro. O policarbonato tem sérios problemas de dilatação, provocando trinca do material e outros como o acrílico se degradam facilmente nas condições externas do meio ambiente, com mudanças bruscas de temperatura e intensidade luminosa.

Na Tabela 2.2 é apresentado o comparativo entre os dois sistemas de cultivo de microalgas utilizados na produção de biomassa, existindo vários fatores a comparar entre os mais importantes: o risco de contaminação e a perda de água e CO₂.

Tabela 2.2 - Tabela comparativa entre sistemas abertos e fechados [48].

Parâmetro	Sistema aberto	Sistema fechado
Risco de contaminação	Extremamente alto	Baixo
Espaço requerido	Alto	Baixo
Perda de água	Extremamente alto	Baixo
Perda de CO ₂	Alto	Baixo
Controle de processo	Não	Sim
Padronização	Não possível	Possível
Variabilidade de espécie cultiváveis	Possibilidade de cultura é restrito poucas espécies	Alta, todas as espécies podem ser cultivadas
Flexibilidade de produção	Não flexível	Câmbios de produção sem problemas
Reprodutividade de produção	Dependem de condições externas	Possíveis com certas tolerâncias
Dependência climática	Absoluta, produção é impossível quando chove	Insignificante, configuração fechada permite produzir durante tempo desfavoráveis
Concentração de biomassa durante a produção	Baixa aprox. 0.1 – 0.2 g/l	Alta aprox. 2-8 g/l
Eficiência do processo	Baixa, consome tempo, grandes vazões devido a baixa concentração	Alta, tempo curto, relativamente pequenas vazões

2.6.1 Sistemas abertos ou Open Ponds

Este tipo de sistema de produção de microalgas também chamado de *raceway ponds*, é o sistema mais antigo. A maioria, da produção comercial mundial de algas é realizada por este tipo de sistema, por seu baixo consumo de energia na transferência gás-líquido e mistura. A maior vantagem dos tanques abertos é a sua simplicidade, o que resulta em baixos custos de produção e baixos custos de operação [53]. Esses tanques podem ser usados em águas naturais (lagos e lagoas) e tanques artificiais. O meio de cultura é diretamente exposto à atmosfera, com a conseqüente evaporação do líquido que ajuda a regular a temperatura do processo, circulando microalga, água e nutrientes em torno no mesmo ambiente. A Figura 2.13 apresenta o esquema de um tanque aberto.

Os tanques são normalmente revestidos de concreto ou são simplesmente cavados na terra e revestidos com mantas de materiais geotêxteis para evitar que o solo absorva parte do cultivo, com uma área que varia de 300 a 4000 m. Com uma roda com palhetas que é usada para conversão do fluxo, ficando misturada a água e as micralgas, devem estar na faixa de 5 a 40 cm/s e a luz solar, por sua vez fica limitada a uma dada profundidade típica de 15 a 20 cm [55].



Figura 2.13 - Esquema do tanque aberto, adaptada [54].

Este tipo de sistema é altamente vulnerável à contaminação por outros microrganismos invasores, também não oferecem controle sobre a temperatura, pH e a iluminação. Sendo as principais limitações: a intensidade da luz irregular, perdas de água por evaporação, exigência de grandes áreas de terreno e difusão do dióxido de carbono para a atmosfera, como também a pobre agitação na transferência de gás-líquido, resultando em uma baixa produtividade [56].

2.6.2 Sistema Fechado ou Fotobiorreator

O fotobiorreator pode ser definido como um sistema de cultivo para organismos fototróficos (microalgas) [57]. Através do PBR é possível controlar parâmetros físico-químicos (pH, oxigênio, CO₂, temperatura), a evaporação e o aumento da salinidade, redução das perdas de CO₂. Este reator permite desse modo uma maior concentração de células e uma maior produtividade [58].

Um dos problemas que pode ocorrer nos sistemas fechados é o excesso de oxigênio dissolvido no meio produzido pela fotossíntese durante o período de luz que pode causar danos nos microrganismos. Alguns autores sugerem os seguintes pontos a serem levados em consideração ao projetar um fotobiorreator:

- O desenho do reator deve prever a iluminação uniforme da superfície da cultura e a rápida transferência de CO₂ e O₂.
- As microalgas são altamente aglomerantes por este motivo, o desenho do reator deve minimizar ou impedir a formação desses depósitos nas superfícies, formando finas camadas, dificultando a difusão de luz, para o cultivo;
- Altas taxas de transferência de massa devem ser preferidas, sem dano às células, ou seja, mais alta agitação sem afetar o crescimento celular;
- PBRs podem trabalhar em condições de intensa formação de espuma, isso porque muitas vezes ocorre essa formação com altas taxas de transferência de massa;
- O rendimento da produção de biomassa depende da quantidade de luz que atinge cada célula, sendo a relação superfície volume um fator importante para a utilização eficiente de luz em diferentes PBRs [59].

Porém [60], diz que a construção de PBRs com extensas superfícies transparentes é cara e difícil, e que as células próximas a estas superfícies podem ser foto inibidas, enquanto as células no centro do reator podem ser foto limitadas.

Superfícies de PBR iluminados requerem uma grande área de superfície em relação ao volume para transmitir luz suficiente para suportar o processo fotossintético [61].

Na Tabela 2.3 é mostrado um comparativo de sistemas de cultivos fechados, no qual apresenta uma deficiência no tipo Biorreator, podendo observar que existem limitações em relação aos outros cultivadores (reatores). Sendo que, a capacidade de captura de luz é pobre e no aumento de tamanho a maior escala (*scale-up*) existe uma dificuldade. Para isto, o trabalho desenvolvido visa resolver estes problemas com a utilização de fibras POFs e o uso de materiais não transparentes de baixo custo.

Tabela 2.3 - Comparativo sobre eficiência de captação de luz e áreas em PBR fechados.

Tipo de reator	Eficiência captura de luz	Grau de Controle	Área requerida	Aumento de tamanho (scale-up)
Biorreator	Pobre	Excelente	Excelente	Difícil
Placa plana	Excelente	Media	Boa	Possível
Helicoidal	Media	Boa	Excelente	Muito difícil
Tubular vertical	Media	Media	Media	Possível
Tubular horizontal	Boa	Media	Pobre	Possível

Existem vários tipos de Fotobiorreatores como: PBR coluna de bolhas, PBR *airlift*, PBR janela (flat panel photobioreactor), tubular horizontal, etc, como mostrado na Figura 2.14.

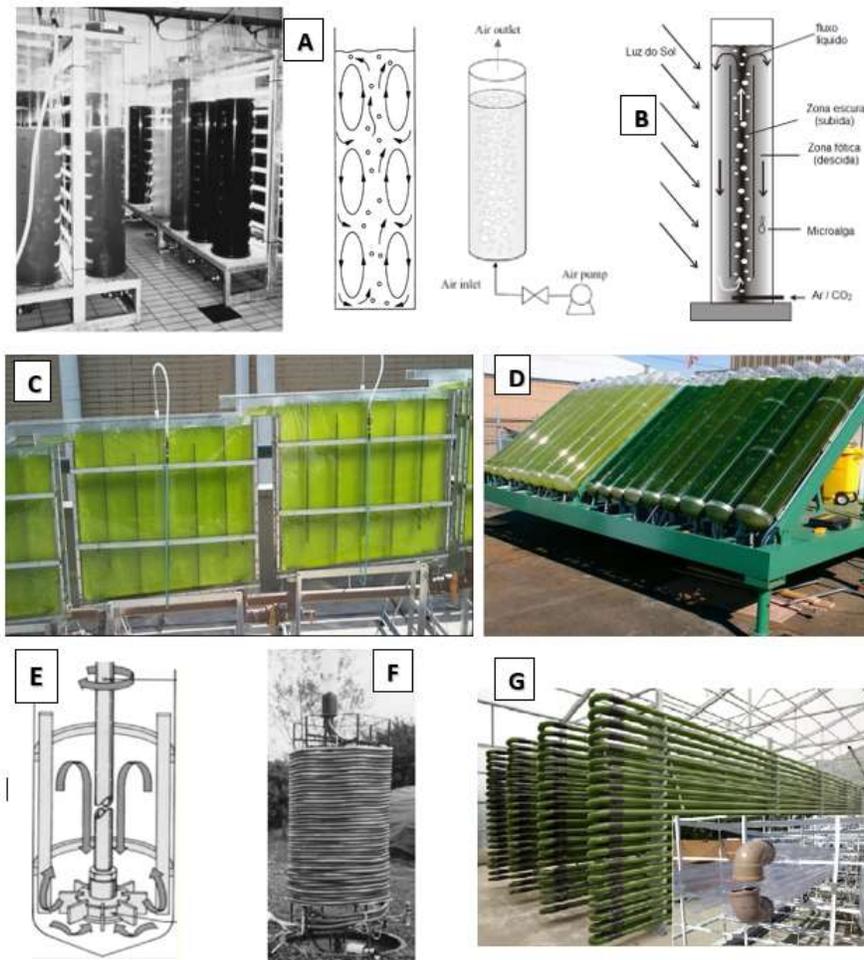


Figura 2.14 - Tipos de Sistemas fechados para cultivo de microalgas a) Coluna borbulhada [12]; b) Air lift [31]; c) Placas plana vertical (Janela) [66]; d) Tubular inclinada; e) Tanque agitado [68]; f) helicoidal [62]; g) Tubular horizontal.

2.6.2.1 PBR coluna de bolhas

Os PBRs coluna de bolhas não possuem partes móveis e consiste num vaso de reação com um difusor montado na parte inferior [63]. O difusor proporciona um diâmetro de bolhas muito reduzido, sendo o fluxo no PBR determinado pelas bolhas originadas por este. A mistura da cultura e transferência de massa de CO₂ é feita por borbulhamento através de uma bomba de ar, um filtro descontaminante e o difusor. Este PBR foi desenhado para proporcionar uma boa transferência de massa entre a fase líquida e gasosa com uma agitação peristáltica [64].

O PBR de coluna de bolhas é formado por vaso cilíndrico com altura maior que duas vezes seu diâmetro no mínimo como é mostrado Figura 2.14A. Ele tem a vantagem a instalação ser de baixo custo, alta relação de área por volume, transferência satisfatória de calor e massa, cultura relativamente homogênea, liberação eficiente tanto de oxigênio como de mistura gasosa residual.

2.6.2.2 PBR Air Lift

Fotobiorreatores do tipo airlift são vasos/tubos com duas zonas de interconexão. Um dos tubos é o local onde é injetado o gás e o outro é a saída do gás. Geralmente, existem em duas formas: circuitos interno e externo. No reator de circulação interna, o padrão de circulação é definido através de um loop que divide o reator em duas secções distintas, cada um com o seu padrão de fluxo próprio [65]. Reator de circuito interno tem sido modificado em dois tipos: reator de circuito interno dividido e circuito interno com uso de tubo concêntrico, como é mostrado no segundo e terceiro desenho da Figura 2.14B, mostrando ambos os sistemas de circulação do ar.

No circuito externo, o cultivo que sobe e que desce são separados fisicamente. A mistura é feita por borbulhamento do gás através do aspersor no tubo de subida sem qualquer agitação física. No tubo cujo o gás sobe é semelhante à coluna de bolhas onde o gás se move para cima, saindo aleatoriamente. Isto diminui a densidade do tubo ascendente, fazendo com que o líquido se mova para cima.

A quantidade de gás que não conseguir sair ficará presa no líquido que se move para baixo. Esse tipo de reator promove a vantagem de criar uma mistura entre a cultura e o gás que se move de maneira ordenada e permite que a cultura passe do escuro para o claro, provendo flashes ou piscadas de luz na cultura microalgal.

2.6.2.3 PBR tipo janela

O fotobiorreator do tipo janela ou também chamada de placa plana vertical, é caracterizado pela alta área de incidência solar por volume e um sistema de saída de gás aberta, que pode ser de materiais transparentes como vidro, poli (metil metacrilato) (PMMA), policarbonato entre outros. A agitação é provida pela entrada de ar a partir de tubos perfurados ou ainda por agitação mecânica. A mistura de CO₂ e ar é inserida no cultivo tanto para agitação como para manutenção do pH, e o PBR é iluminado pela superfície como é mostrado na Figura 2.14C.

2.6.2.4 PBR tubular horizontal

O fotobiorreator tubular horizontal é composto de tubos transparentes com cultura de microalgas colocados horizontalmente e paralelos entre si, seja inclinados ou não. Esse formato permite a vantagem de uso em áreas externas e com orientação para o sol, resultando em uma eficiente captação da luz, como é amostrado na Figura 2.14G . A mistura de dióxido de carbono é introduzida dentro do tubo conectado via a um sistema dedicado de troca gasosa. O oxigênio gerado durante a fotossíntese promove a fotooxidação associada a alta intensidade de luz, o que não é desejável por diminuir a quantidade de células vivas [67].

Uma desvantagem para o arrefecimento do sistema deste PBRs são utilizados como a pulverização de água sobre a superfície dos tubos, e regulando a temperatura da corrente de alimentação ou a recirculação. Outra grande desvantagem é o elevado consumo de energia de cerca de 2000 W/m³ (alcançando velocidades de 20 a 50 ms⁻¹) em comparação com 50 W/m³ para a coluna de bolhas e PBR janela.

O PBR tubular inclinado é semelhante ao tubular horizontal; no entanto, tem a inclinação de alguns graus em relação ao sol. Essa inclinação ajuda no aproveitamento da luz solar, alcançando uma produtividade volumétrica e eficiência fotossintética superiores ao reator janela, apesar do alto custo [57].

2.6.2.5 PBR tipo tanque agitado

A agitação deste tipo de PBRs é fornecida mecanicamente com a ajuda de haletas de diferentes tamanhos e formas como na Figura 2.14E. Deflectores são utilizados a fim de reduzir o escoamento. Ar enriquecido com dióxido de carbono é borbulhado na parte inferior do tanque como fonte de carbono.

Este tipo de reator foi transformado em fotobiorreator iluminando-o externamente por lâmpadas fluorescentes ou por fibras ópticas, porém para alguns autores a principal desvantagem desse sistema com fibras ópticas é a baixa área de superfície iluminada em relação ao volume de cultivo, o que proporcionaria uma baixa eficiência de captação de luz [56].

A agitação mecânica também auxilia na retirada dos gases da parte líquida, ou seja, o gás inserido não utilizado e também o oxigênio produzido durante a fotossíntese.

2.6.2.6 PBR tipo híbrido

Fotobiorreator do tipo híbrido é o uso de dos sistemas como o reator tubular e um reator *Air-lift*. O reator tubular foi utilizado como coletor de luz com o objetivo de receber a luz solar para o cultivo de microalgas abarcando uma área maior de superfície em relação ao volume, em quanto o reator *Air-lift* serve para a homogeneização do meio de cultura e atua como um sistema de degaseificação, e sondas podem ser integradas a fim de regular outras variáveis de cultura como gastos de CO₂ e nutrientes.

Sua vantagem inclui um melhor controle sobre as variáveis do cultivo, permitindo maiores produtividades e reduzindo o consumo de energia. Possuem algumas desvantagens para aumento de escala ou uso de materiais transparentes, ainda de custo elevado comparado ao sistema de *Open Pond* [69].

Na prática atual de avaliar PBRs com base da produtividade de biomassa por unidade de volume de cultura sem considerar a entrada de energia para o processo não pode resultar em uma solução eficiente e sustentável de energia.

Um novo reator foi denominado IIPBR (bioreator iluminado internamente) sendo proposto para a produção de biomassa, eficiente em termos de energia em maximizar o ganho líquido de energia, em vez de maximizar a produtividade de biomassa. O IIPBR tem o potencial de apoio de 160% maior densidade de biomassa e maior produtividade de biomassa por unidade de entrada de energia, B/E, que um PBR de área igual incidente por unidade de volume de cultura de coluna de bolhas [70].

Na Figura 2.15 mostra-se o processo de produção de biomassa e seus diferentes subprodutos e biocombustíveis, etanol, biodiesel e H₂ (gerado a partir da restrição de nutrientes), complementos alimentícios para uso humano, biomoléculas na aplicação farmacêutica, plásticos e polímeros, a partir do cultivo destes microrganismos, usando o CO₂ emitidos pelas indústrias, sendo capturados e transformados em energia Química através da fotossíntese, gerando biomassa. Este processo pode ser feito mediante sistemas

abertos (*raceway ponds*) e sistemas fechados (fotobiorreatores) que serão apresentados mais adiante.

Os custos de produção para os PBRs tubulares estão na mesma faixa dos sistemas de cultivo Open Raceway, projetando-se que os custos da produção de algas em sistemas fechados serão menores do que em sistemas abertos após a otimização do projeto do sistema, mostrando que a produtividade depende da tecnologia do reator, do projeto do reator, espécies de algas e local de produção [72].

Estudos realizados na produção de biomassa em PBR fechados com *containers* transparentes dão importância ao caminho da luz depende do ângulo solar. No entanto, usando a integração de luz para estimar o crescimento de algas. O material dos PBRs tendem a absorver e refletir parte da luz.

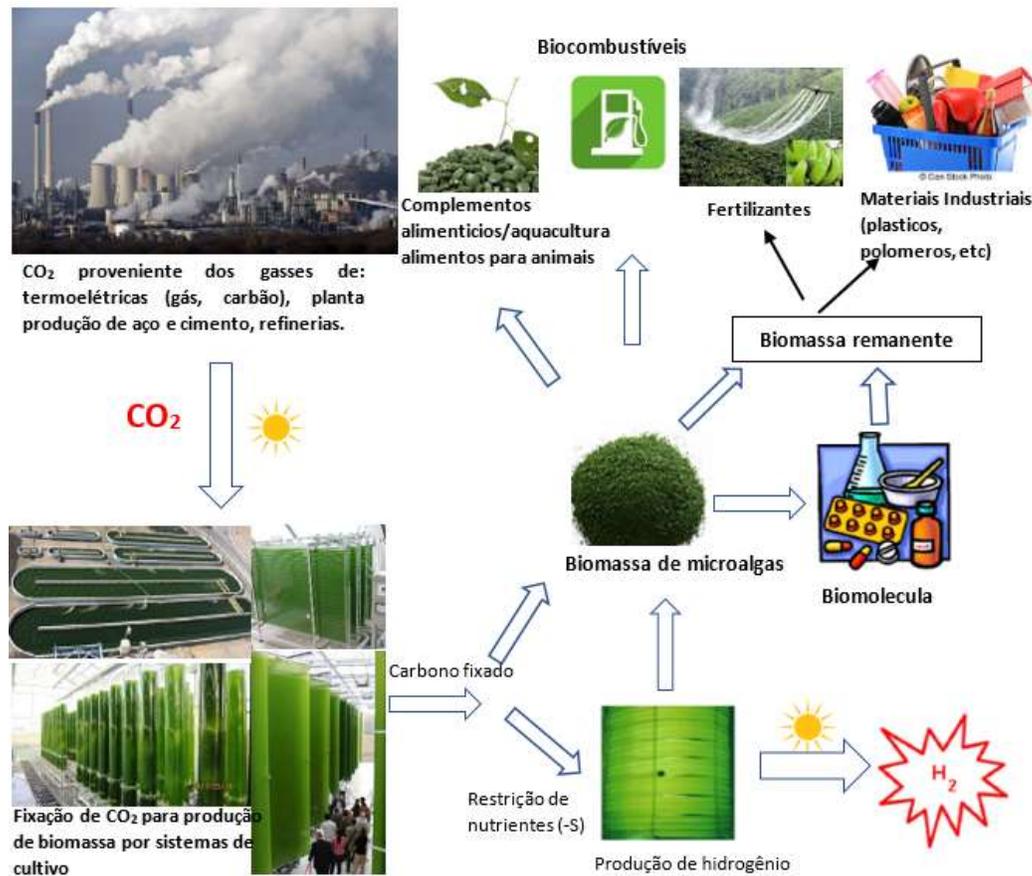


Figura 2.15 - Processo de biocombustível a partir da biomassa, adaptada [71].

2.7 Sistemas de Transporte de Energia Solar

Diferentes sistemas de transporte de luz solar têm sido desenvolvidos, onde a utilização de feixes de luz solar controlados para iluminação de espaços internos em prédios, sendo o primeiro proposto em 1977. Seguido em 1983, pelo desenvolvimento do conceito de concentração e canalização solar para iluminação interna, com o fim de alcançar os fins necessários.

O tamanho de módulos de sistemas de iluminação é selecionado de acordo com o range de iluminação requerido. Normalmente, uma área de superfície maior é preferido para captar mais luz.

2.7.1 Lente Concentradora

Uma alternativa para atingir o aproveitamento da luz solar e capturar seus feixes, foi a de utilizar uma lente concentradora do tipo Fresnel. As lentes de Fresnel tem várias vantagens, como baixo custo, mais finas e planas, permitindo a passagem de mais luz e fácil instalação.

Segundo [74], foi sugerido que sua construção pode ser realizada partindo de uma lente curva como a de plano-convexa, fosse dividida num conjunto de anéis circulares concêntricos sucessivos, formando uma lente esférica numa superfície plana. Em 1820 o francês Augustin Fresnel implementou esta ideia construindo uma lente de farol, apresentando problemas de dimensões e peso.

Na Figura 2.16 pode-se perceber o princípio da lente de Fresnel a qual baseia-se na segmentação de uma lente esférica, onde as angulações são mantidas em cada segmento, sem, utilizar a mesma quantidade de material. Portanto lentes de Fresnel como concentrador com lentes de plano-côncavo é uma boa combinação, permitindo a convergência dos raios de luz provenientes de uma fonte de luz. Além disso as lentes podem transmitir luz até um 97% [73].

Existe um compromisso entre o tamanho e eficiência nas lentes de Fresnel. Se incrementarmos o tamanho da lente temos um passo constante, obtemos menor eficiência devido ao bloqueio da luz. Nas Lentes de Fresnel é usado um passo constante de 0,5 mm. Se incrementarmos o diâmetro do refletor parabólico, alcançaremos uma maior eficiência devido à grande área da superfície.

Neste trabalho foi usada uma lente de Fresnel de 456 mm x 456 mm, fabricada com material polimérico PMMA que deixa seu peso ainda mais leve, com uma distância focal (FL) cerca de 46 cm.

Considerando que o sol produz uma iluminância na faixa de 32.000 lx a 100.000 lx ou uma irradiação de 1000 w/m² na superfície da terra, e que a área da lente utilizada é de 0.1662 m², pode-se calcular que a lente da superfície receba como máximo um iluminamento de 166.2 W.

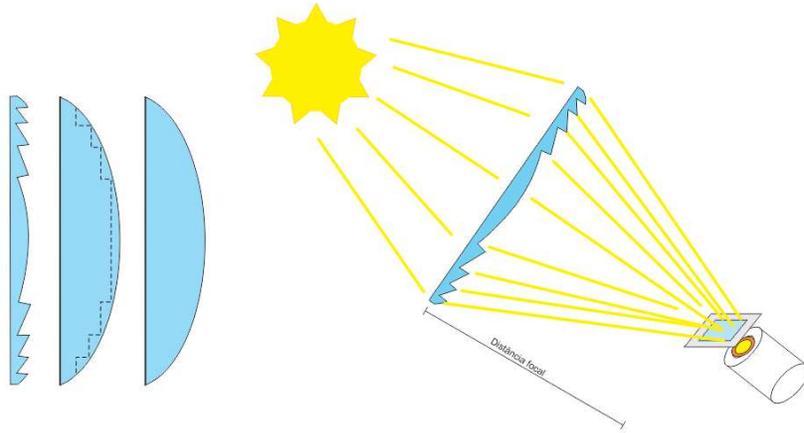


Figura 2.16 - Princípio do processo da uma lente de Fresnel.

2.7.2 Fibra Óptica

A fibra óptica é filamento flexível e transparente, considerada como um excelente meio de transporte de elevado rendimento de transporte de um feixe de luz, fabricada a partir de vidro ou plástico extrudado o qual incide em uma de suas extremidades guiando através deste filamento até a outra extremidade. Este filamento têm diâmetros variáveis, dependendo da aplicação típico de alguns micrômetros.

Os guias de luz na fibra óptica dependem do fenômeno físico, conhecido como reflexão interna total representada na Equação (2.1) também conhecida como a segunda lei da refração ou lei de Snell-Descartes. Além disto, deve-se considerar o comportamento dos raios de luz dependia do meio de propagação, existindo uma velocidade devido as diferentes estruturas físicas atômicas.

$$\eta_1 \sin(\theta_1) = \eta_2 \sin(\theta_2) \quad (2.1)$$

A lei de *Snell*, vem ser o produto do índice de refração do meio, no qual se encontra o raio pelo seno do ângulo que esse raio forma com a reta normal á interface no

ponto de incidência. Nesta equação η_1 representa o índice de refração do meio de origem do raio de luz, ao passo que η_2 representa o índice de refração do meio cujo raio será refratado. Os ângulos θ_1 e θ_2 correspondem aos ângulos formados pelos raios de luz em cada meio distinto, com a reta perpendicular ao ponto de interseção dos meios.

Esta fibra possui no mínimo duas camadas: o núcleo (*core*) e casca (*cladding*), definidos em materiais e espessuras de forma que apresentem índices de refração que possibilitem a reflexão interna da luz Figura 2.17. Para que ocorra a máxima reflexão interna, o índice de refração do núcleo deve ser maior do que o índice de refração da casca.

Finalmente, encontra-se o ângulo crítico, a partir do qual ocorrerá o fenômeno da reflexão total, de modo que apenas os raios cujo $\theta_1 > \theta_{critico}$ permanecerão dentro no meio inicial de propagação. No caso em que o ângulo de incidência é igual ao ângulo crítico, a refração da luz dentro da fibra óptica se dá pela casca, e para valores superiores a este ângulo crítico, não há refração, mas sim a reflexão total. Este raio angular é conhecido como ângulo de aceitação.

A abertura numérica também conhecida como NA do inglês, *numerical aperture*, ela equivale ao seno do ângulo máximo a partir do qual a luz já não se confina totalmente no interior da fibra.

$$NA = \text{Sen}(\theta_{aceitação}) = \left(\frac{\sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}}{\eta_0} \right) \quad (2.2)$$

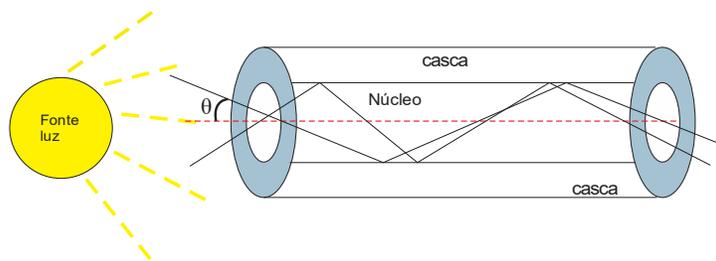


Figura 2.17 - Propagação de luz através da fibra óptica.

Materiais dielétricos distintos são usados para se obter esta diferença de refração, como sílica-plástico, diferentes tipos de plástico, ou ainda dopagens convenientes de materiais semicondutores (por exemplo, GeO_2 , P_2O_5 , B_2O_3 , etc.) na sílica (SiO_2) [75]. Pela teoria ondulatória, a luz é regida pelas equações de Maxwell e, desta forma, a fibra óptica pode ser considerada como uma guia de onda. Dessa maneira, a luz que percorre a

fibra não se propaga aleatoriamente, mas é canalizada em certos modos. Esta equação também demonstra que a energia da luz não permanece totalmente concentrada e confinada no interior do núcleo da fibra óptica.

Especialmente nas fibras monomodo, uma fração significativa desta energia, presente nos modos próximos à fronteira núcleo-casca, é transmitida pela própria casca através de um fenômeno conhecido como onda ou campo evanescente.

As fibras ópticas comercialmente são fabricadas em duas categorias: Multimodo e Monomodo. As fibras multimodo possuem o diâmetro do núcleo maior do que as fibras do tipo Monomodo, permitindo que a luz tenha vários modos de propagação. As fibras Multimodo ainda podem ser subdividida em: Multimodo índice degrau e Multimodo índice gradual, como é mostrado na Figura 2.18.

Multimodo índice degrau: Estas fibras possuem um núcleo composto por um material homogêneo de índice de refração constante na região do núcleo e sempre superior ao da casca, a refração neste caso ocorre. São fabricadas em vidro e em plástico, uma vantagem é sua grande capacidade de captar energia luminosa por sua alta abertura numérica, elevando o número de modos causando o fenômeno de dispersão modal, portanto, uma banda passante estreita, restringindo a capacidade de transmissão da fibra, reduzindo suas aplicações com relação a distância.

Mutímmodo índice gradual: esta tipo de fibra apresenta um índice de refração que varia gradualmente em relação ao centro. Isto permite diminuir as diferenças de tempos de propagação da luz no núcleo.

Monomodo: Foi construída de tal forma que apenas o modo fundamental de distribuição eletromagnética (raio axial) é guiado, possuindo um índice de refração bem pequeno, evitando assim os vários caminhos de propagação da luz dentro do núcleo, conseqüentemente diminuindo a dispersão do impulso luminoso. As dimensões típicas são 2 a 10 μm para o núcleo e 80 a 125 μm para a casca.

A partir desta classificação, pode-se concluir que as fibras utilizadas em aplicações de iluminação são as de multimodo índice degrau, tanto pelas suas dimensões maiores quanto pela possibilidade da sua fabricação em plástico. A boa flexibilidade e facilidade nas conexões, aliadas a um baixo custo, fazem da fibra plástica a melhor alternativa hoje disponível para canalização da luz no espectro visível. Fibras plásticas são fabricadas de PMMA. Além disso, as POFs têm mais flexibilidade e menor raio de curvatura que os sistemas de vidro [76].

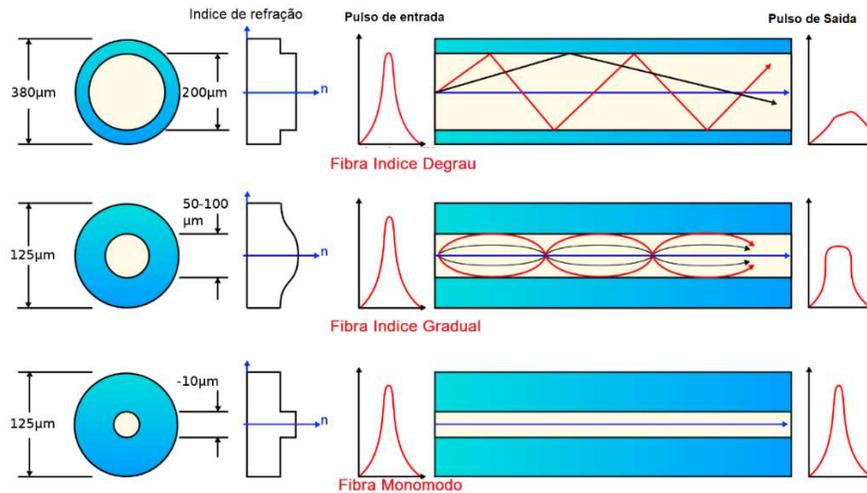


Figura 2.18 - Tipos de fibras ópticas e características.

As fibras ópticas apresentam algumas limitações, como os fatores geradores de atenuação e, fatores que restringem a taxa de transmissão.

- A atenuação - é um dos principais motivos pelo qual a fibra ganhou a importância em aplicações nas Telecomunicações, definindo a distância máxima (alcance) que um sistema de transmissão óptico entre um emissor e receptor, e poder ser medida de acordo com a Equação

$$a_{(dB)} = 10 \left[\log \left(\frac{P_i}{P_o} \right) \right] \cdot \left(\frac{1}{L} \right) \quad (2.3)$$

Nesta equação, P_i corresponde à potência na entrada, P_o equivale à potência na saída, ao passo que L corresponde ao comprimento da fibra óptica.

- Absorção – este tipo de restrição nas fibras ópticas são causadas por 4 razões. Como nenhum material é perfeitamente transparente, sempre ocorre uma absorção parcial de luz quando esta é forçada a atravessar um meio (absorção intrínseca). Numa fibra óptica, além da absorção do material, pode haver variações de densidade, imperfeições na fabricação (por defeitos estruturais), impurezas (absorção extrínseca) e outros fatores que aumentam perdas. O principal motivo de atenuação nas fibras ópticas é a contaminação por íons metálicos, que pode gerar perdas superiores a 1 dB/km.

Há também contaminação por íons hidroxila (OH^-), causada por água dissolvida no vidro, elas definiram intervalos de frequências onde essa atenuação era mínima, chamadas de janelas ópticas ou janelas de transmissão, não apresentando na sua região picos de atenuação devido ao OH^- .

Existem 3 janelas ópticas, ao redor de 850 nm, 1300 nm e 1550 nm, sendo que a última foi subdividida em duas janelas (conhecidas como Banda C e Banda L) visando o melhor aproveitamento dessa região de baixas atenuações. A primeira janela é utilizada para sistemas de curta distância e baixo custo. Por sua vez, a segunda janela permite enormes capacidades de transmissão, e por último a terceira janela é utilizada por fibras de sílica, por constituir uma região de atenuação mínima para esse material.

Na Figura 2.19 exibe o comparativo entre as perdas de transmissão fornecidas pelo fabricante com gráfica de cor preto, e comparada com uma amostra de POF de 90cm de comprimento coletadas em laboratório (LIF) utilizando equipamento de bancada como é mostrado na Figura 3.25.

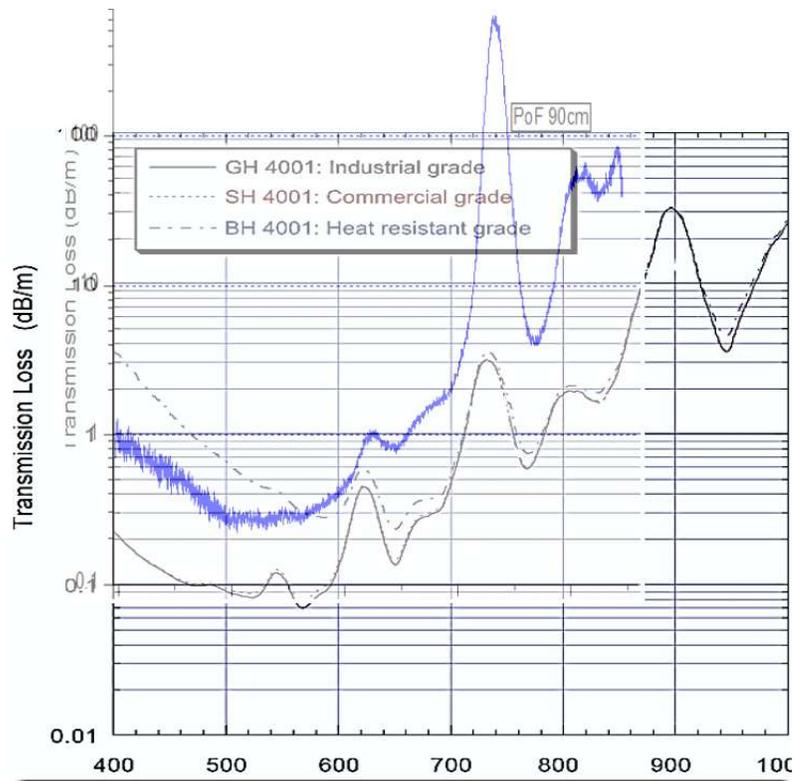


Figura 2.19 - Comparação perda de transmissão POF Fabricante e amostra de 90 cm.

2.8 Luminotécnica

A medição de radiação, é muito complexa existindo terminologias e unidades usadas em radiometria, fotometria e a medição da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), como a conversão de unidades radiométricas e fotométricas para unidades fóton.

Não existe uma unidade no sistema internacional oficial SI para fluxo de fóton. Um mol de fóton é comumente usado para designar o número de fóton (6.022×10^{23} fótons). As unidades Einstein (E) tem sido usado como unidade de medição na ciência vegetal, no entanto, recomendam o uso de mol, também tem sido utilizado em livros sobre fotoquímicos, fotobiologia e física de radiação como a quantidade de energia radiante, [77].

Usualmente, o range de iluminação de uma microalga é de 20 – 200 μ mol fotóns $m^{-2} s^{-1}$ e a luz solar direta (meio dia tropical) é 1700 μ mol $s^{-1}m^{-2}$.

A luz é uma forma de energia a qual pode ser medida em unidades de joules ou calorias ou unidades quantum (quanta, Einstein (E)), 6×10^{23} (1 mol de luz ou 1 Einstein). A potência óptica é a taxa da qual a luz é gerada, transmitida ou absorvida, e é medida em watts (1 watt = 1 joule s^{-1}).

2.8.1 Radiometria

A radiometria é a medida das propriedades de energia radiante (joule), a taxa de fluxo de energia radiante, sob a forma de uma onda eletromagnética, é chamado o fluxo radiante (watt = 1 J s^{-1}) [78]. Radiação de fluxo pode ser medida à medida que flui a partir da fonte (o sol, em condições naturais).

- **Fluxo Radiante:** é a quantidade de radiação que vem de uma fonte por unidade de tempo. Unidade: watts, W.
- **A irradiância:** é o fluxo radiante incidente sobre uma superfície de recepção de todas as direções, por unidade de área de superfície. Unidade: W/m^2 .
- **Espectrorradiometria:** todas as propriedades do fluxo radiante dependem do comprimento de onda da radiação. A irradiância espectral é a irradiância num determinado comprimento de onda, por intervalo de comprimento de onda da unidade. A irradiância dentro de uma dada banda de frequências é a integral da irradiância espectral com respeito ao comprimento de onda [79]. Unidade: $Wm^{-2} nm$.

2.8.2 Fotometria

Refere-se à medição da radiação visível (luz) e é usada para descrever as condições de iluminação entre o olho e a área de trabalho. O uso da palavra "light" é inadequada na pesquisa de plantas. Os termos "de luz ultravioleta" e "luz infravermelha" são claramente contraditórias [79].

- **Fluxo luminoso:** é a quantidade de radiação que vem de uma fonte por unidade de tempo, avaliada em termos de uma resposta visual padronizado. Unidade: lúmen, lm.

- **Intensidade luminosa:** é o fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido na direção em questão (emitido numa dada direção). Unidade: candela, cd.
- **A Luminância:** é o quociente entre o fluxo luminoso (lúmen) em um elemento da superfície por unidade de área (m^2) que rodeia o ponto e propagadas em direções definidas por um cone elementar que contém a direção dada, pelo produto do ângulo sólido do cone e a área da projeção ortogonal do elemento de superfície sobre um plano perpendicular à direção dada. Unidade: $cd\ m^{-2}$; Além disso, $lm\ sr^{-1}\ m^{-2}$.
- **Iluminância:** é definido como a densidade do fluxo luminoso (lúmen) incidente num ponto sobre uma superfície por unidade de área (m^2). Iluminação média é o quociente entre o fluxo luminoso incidente sobre uma superfície com a área da superfície. Unidade: lux, lx um lux é um $lm\ m^{-2}$.
- **Absorção:** é a fração do fluxo incidente que é absorvido por um meio.
- **A refletância e transmitância:** são termos equivalentes para as frações que são refletidas ou transmitidas.

2.8.3 Radiação Fotossinteticamente Ativa

O termo de medição “ $\mu mol\ s^{-1}m^{-2}$ ” é baseado no número de fótons em diferentes comprimentos de onda tem energias diferentes. Este termo no número de fótons num comprimento de banda incidente por unidade de tempo (s) em uma unidade de área (m^2) dividido pela constante ($6.022 \times 10^{23}\ mol^{-1}$) [80].

- **PAR** (Radiação Fotossinteticamente ativa) é o termo radiação geral que abrange ambos os termos de fótons e energia [81], é definido como a radiação no comprimento de banda de 400 a 700 nm.
- **Densidade de fluxo fóton fotossintético (PPFD)** é definida como a densidade de fluxo fóton do PAR, este é o número de fótons no comprimento de banda de 400 – 700 nm incidente por unidade de tempo, uma unidade de superfície.

As microalgas podem absorver energia de luz da faixa de iluminação de 20 – 200 $\mu.mol.fótons.m^{-2}.s^{-1}$. Porém, resultados experimentais determinados por [82], onde os valores do índice de luz medido em um Fotobioreator de Iluminação interna (FBRII) média de 91 $\mu.mol.fótons.m^{-2}.s^{-1}$ dados fornecidos por [83].

Este valor pode ser calculado em outras unidades de iluminação como irradiância (Wm^{-2}) ou iluminância (Lux), como mostra as equações (2.3), (2.4), (2.5) e (2.6).

$$Wm^{-2} = \frac{\mu mol \text{ fótons } s^{-1} m^{-2}}{\text{cosntante}} \quad (2.3)$$

$$\frac{91 \mu mol \text{ fótons } s^{-1} m^{-2}}{4.57 \mu mol \text{ fótons } s^{-1} W^{-1}} = 19,9125 Wm^{-2} \quad (2.4)$$

$$\frac{\text{lux}}{\text{constante}} = \mu mol \text{ fótons } s^{-1} m^{-2} \quad (2.5)$$

$$91 \mu mol \text{ fótons } s^{-1} m^{-2} \frac{54 \text{ lx}}{\mu mol \text{ fótons } m^{-2} s^{-1}} = 4.914 \text{ lux} \quad (2.6)$$

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo serão descritos os principais elementos que compõem o sistema de iluminação do PBR. O trabalho desenvolvido no cultivo de microalgas para produção de biomassa, baseado em rastreamento solar, lente de Fresnel e POF.

O sistema consiste de um rastreador solar, projeto eletromecânico automatizado responsável pela correta posição de uma lente de Fresnel, responsável pela concentração da luz solar no feixe de POFs. As POFs transportam a luz para o interior do fotobiorreator fechado de 30 litros, onde se encontram as microalgas para o cultivo e estudo da produção de biomassa.

A Figura 3.1 apresenta a fotografia do sistema de iluminação desenvolvido.



Figura 3.1 - Esquema da Sistema de iluminação: lente de Fresnel, POF e PBR

O sistema de iluminação com POF foi realizado, inicialmente, através da fixação e iluminação das POFs que iluminaram o interior do PBR e a otimização deste sistema com a utilização de materiais de baixo custo. Posteriormente, foi realizado o estudo de ranhuras nas POFs, visando espalhar a luz dentro do PBR.

3.1 Desenvolvimento do Fotobiorreator de 30 litros para testes em nível piloto

Visando diminuir custos no desenvolvimento do PBR foi utilizado um *container* de material opaco, barato e de fácil manipulação, como é o polipropileno. A maioria dos PBR fabricados são de policarbonato, onde o processo de colagem apresenta uma complexidade superior à de outros plásticos requerendo produtos mais caros. O material de polipropileno foi escolhido como material adequado para este propósito maximizando a reflexão da luz inserida no interior do *container*. A reflexão das ondas de luz por plástico branco é favorável para a disponibilidade da luz na cultura algal [91].

O contenedor é de material polipropileno com volume de 30 L, cilíndrico não uniforme, de dimensões: altura 40 cm (diâmetro menor 29 cm e diâmetro maior 38 cm). Foram desenvolvidos dois modelos de sistema de fixação e distribuição das POFs dentro do PBR, que serão descritos a seguir:

3.1.1 Modelo Inicial (# modelo 1)

O modelo 1, visa a distribuição das fibras ópticas com iluminação lateral no interior do fotobiorreator, inseridas em lâminas de acrílico de comprimento de 280 mm em buracos de diâmetro superior a 2 mm. Sendo utilizadas 6 lâminas arranjadas por nível, ficando presas através de um parafuso no meio de cada uma das lâminas. Cada nível de lâminas será suportado por duas barras metálicas rosqueadas, sendo ambas barras suportadas pela tampa do reator, como é mostrado na Figura 3.2. No entanto, para um aumento de escala, esse sistema se tornaria inviável, desde o ponto de vista técnico, já que o número de fibras seria maior e conseqüentemente precisariam ser adicionadas muito mais lâminas a utilizar para um *container* plástico de 1000 L, por exemplo.

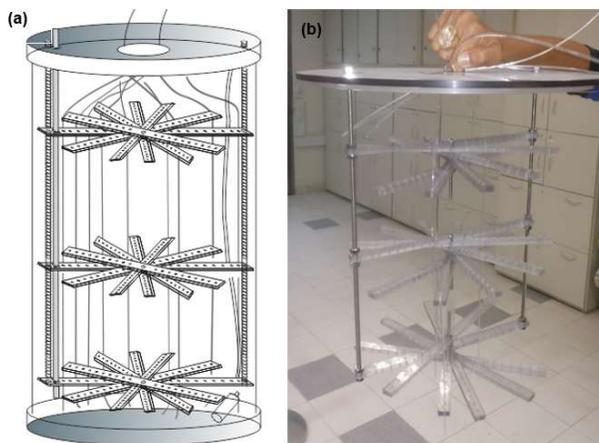


Figura 3.2 - a) Esboço de primeiro PBR b) Suporte de arranjo de lâminas de acrílico.

3.1.2 Aperfeiçoamento do modelo inicial (# modelo 2)

Pensando na possibilidade de um aumento de escala, foi projetado o modelo #2. O modelo 2 teve como evolução: o desenvolvimento de um novo suporte acrílico para a inserção de um número maior de fibras, sem utilizar mais matéria prima de acrílico e economizar espaço no interior do cultivador (reator), já que as lâminas ficariam uma acima das outras, como também pelo aumento no comprimento de cada uma delas. Entretanto, ao aumentar o comprimento, aumenta o risco da integridade das fibras, ficando expostas e sujeitas a danos provenientes da agitação da areação no cultivo. Para evitar isto, seria necessário aumentar o número de barras rosqueadas, onde estaríamos saindo do planejamento da economia prevista.

Dando continuidade, visando melhorias e resolver os problemas apresentados acima no desenvolvimento de um PBR em escala maior, foi desenvolvido o projeto de uma única peça por nível de altura no formato de um disco, semelhante a uma pizza, onde foram retiradas partes dela em fatias, resultando em um molde. Com isso, conseguindo resolver o problema de minimizar espaço e evitar o excesso de uso de barras rosqueadas que serviram de apoio total, como é mostrado na Figura 3.3 e Figura 3.4.

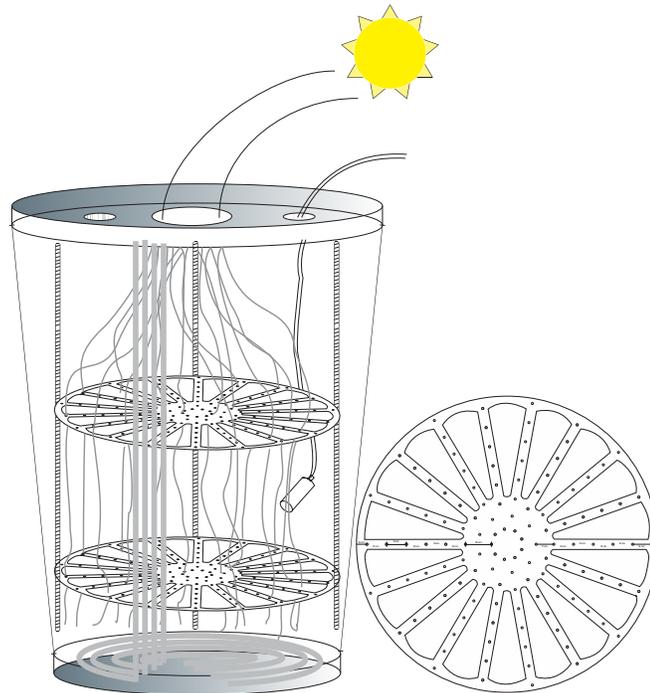


Figura 3.3 - Esboço do fotobiorreator de 30 litros com estrutura suporte.



Figura 3.4 – fotografia do suporte com disco de acrílico para distribuição das POFs.

Para garantir uma boa aeração no interior do fotobiorreator, de forma que as células de cultivo se mantenham homogêneas, evitando deposição na superfície das fibras e nas paredes do fotobiorreator foi desenhado e construído o sistema de distribuição da aeração apresentado na Figura 3.5.

No desenvolvimento deste sistema de aeração, foi empregado: 4 tubos de aço inox com base forma espiralada com diâmetros maior a menor tamanho que nos permitiu transportar o ar juntamente com CO_2 colhido do ambiente externo e será distribuído no interior do PBR por buracos na parte espiral da estrutura metálica.



Figura 3.5 - Sistema de distribuição da aeração no Fotobiorreator de 30 litros.

Este fotobiorreator de 30 L, foi iluminado pelo feixe de POFs com ranhuras e utilizado nos testes realizados nas dependências do Laboratório de Tecnologias Verdes – GreenTec, Escola de Química/ UFRJ, utilizando como fonte de iluminação a radiação solar concentrada pela lente de Fresnel montada no sistema de rastreamento solar.

Depois de realizadas essas modificações obtivemos um PBR com as características ideais propostas neste trabalho. Os resultados deste projeto inovador de PBR de iluminação interna por POFs será comparado com um PBR de janela que foi desenvolvido por uma aluna de Doutorado [66], na Universidade UFRJ no departamento da Química no Laboratório GreenTec. Neste caso também se procurou montar um sistema que seja robusto, com alto rendimento e baixo custo.

Os resultados de crescimento celular em concentração celular (cel.mL^{-1}) ao invés de peso seco (mg.L^{-1}), são terminologia comumente utilizada na área biotecnológica. Os resultados de crescimento quantificando a biomassa produzida facilita o entendimento relacionados à produtividade no PBR. Sendo possível reduzir o volumes de 1100 litros até cerca de 20-25 litros de cultivo.

O material do fotobiorreator de janela é de policarbonato transparente com proteção UV para evitar a degradação do material quando exposto ao sol, e um volume de 90 litros de capacidade, como mostrado na Figura 3.6, a qual será usado como referência no estudo comparativo do protótipo proposto.



Figura 3.6 - Protótipo de PBR janela usado como referência comparativa com PBR de iluminação interna, adaptada de [66].

Logo depois de conhecer o modelo onde serão implementadas e fixadas as POFs, neste caso foi o modelo 2, o qual permite melhor segurança e fixação. Como também o cultivador de microalgas a ser comparado com o crescimento celular microalgal.

3.2 Sistemas de iluminação por POFs para Cultivo de microalgas a ser comparados com PBR-Janela

Nesta trabalho, serão implementados três cultivos comparativos com diferentes alterações no sistema de iluminação interna como é apresentado na Figura 3.7, para otimizar e homogeneizar a iluminação interna dentro do fotobiorreator.

Como pode se observar no início dos cultivos, no Cultivo 1 foram utilizadas fibras com ranhuras feitas com um Laser de CO₂ que nos permitiu realizar ranhuras na POF com o fim de obter o espalhamento da luz pelas laterais das POFs, onde o desenvolvimento destas ranhuras serão explicadas mais adiante.

Neste Cultivo 1 foram observadas que as fibras sofriam fragilidade na sua estrutura deixando-as quebradiças, tanto na instalação e no fim do cultivo, causadas pela aeração e produto da limpeza das fibras para os próximos cultivos.

No Cultivo 2, foram realizadas modificações na iluminação interna nas POF, para resolver estas deficiências na integridade das fibras. Desta forma, foi realizada uma iluminação sem ranhuras. Este novo modo de iluminação interno foi realizado com uma iluminação pontual, permitindo uma iluminação do extremo das POFs para baixo, localizadas em dois níveis. Além disso, foi usado um espelho no fundo do PBR para refletir os raios de luz. Foi observado que no período deste cultivo houveram dias nublados, que prejudicaram o crescimento microalgal no PBR-POF.

No Cultivo 3, foi visado a otimização das deficiências do Cultivo 2 nos dias nublados, mantendo as melhorias obtidas e utilizando LEDs superluminescentes na iluminação interna com luz artificial, com o intuito de superar o crescimento microalgal no cultivador PBR-POF em comparação ao PBR-Janela.

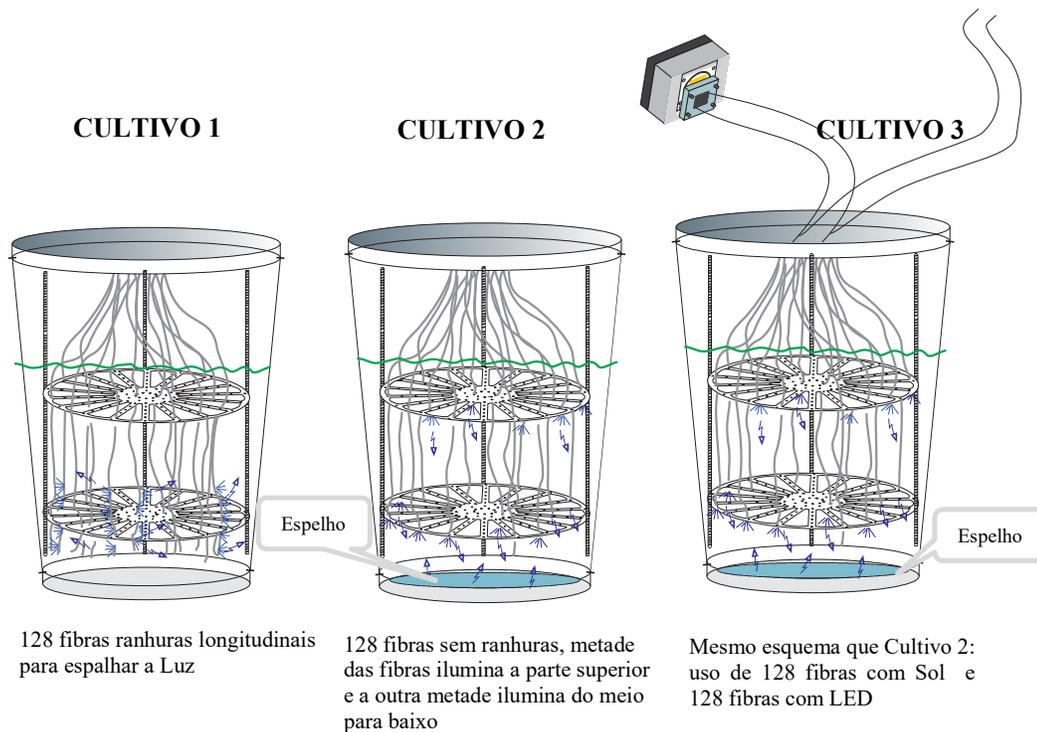


Figura 3.7 – Diagrama esquemático dos três cultivos – Sistemas de iluminação

O desenvolvimento de cada um destes cultivos será apresentado em cada um dos itens abaixo, com a implementação e processo de acondicionamento de iluminação interna do PBR, como o processo de ranhura das fibras POFs, visando conseguir uma maior ou igual produtividade de microalgas.

3.2.1 Cultivo 1

Em todos os Cultivos PBR-POF foi utilizado o mesmo PBR com capacidade de 30 litros.

No primeiro cultivo foram utilizadas fibras plásticas que tinham ranhuras de 20 cm em todo o comprimento longitudinal de cada fibra. As POF foram fixadas em dois discos de acrílico para garantir a integridade das fibras, niveladas e submersas no PBR-POF (cerca de 30 cm do cultivador), visando obter iluminação interna homogênea e sem

sombreamento, conforme é possível observar na Figura 3.8.

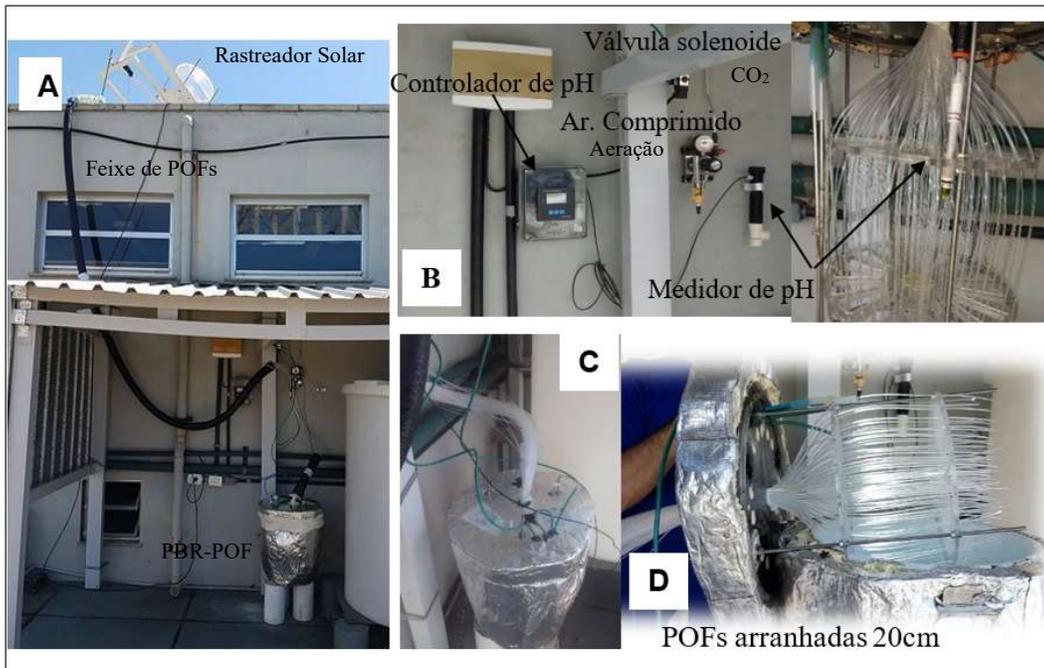


Figura 3.8 - Implementação do Sistema do Cultivo 1: a) PBR-POF inovador, iluminação interna por POFs com ranhuras nas laterais b) Sistema de controle de parâmetros c) Tanque com isolamento externo d) Arranjo de fibras com ranhuras 20 cm.

Na Figura 3.8A, pode-se observar a fotografia do sistema de iluminação para todos os cultivo, podendo descrever uma vista geral da captação dos raios do sol pelo rastreador, e guiados por um feixe de POFs iluminou internamente o PBR-POF. Os parâmetros relevantes que influenciam o crescimento do cultivofor monitorados por sensores e dispositivos elétricos. Além dos dispositivos de controle mostrados na Figura 3.8B, foi pensado em isolar o cultivo de mudanças de temperatura com o uso de um isolante em espuma cobrindo todo o PBR.

A seguir são apresentados e descritos cada um dos ensaios, que foram realizados para obter uma ótima iluminação das fibras nas laterais, sem danificar a integridade da POF.

3.2.1.1 Desenvolvimento do sistema de iluminação de PBR com POF

O sistema de iluminação com POFs foi realizado, inicialmente, através das confecções de ranhuras na lateral das POFs, com o objetivo de obter iluminação em toda extensão da fibra, visando uma iluminação homogênea e distribuída no interior do PBR.

A Figura 3.9 apresenta o setup adotado para a realização das ranhuras na lateral da POF com laser CO₂. O processo se inicia colocando a fibra óptica plástica num extremo de uma puxatriz. Este dispositivo permite deslocar a fibra plástica na direção de dois cilindros que servem como guia da fibra, para que esta seja atingida pelo feixe do laser CO₂. Esta potência associada com o tempo de incidência do laser, determina o grau da profundidade da ranhura em toda lateral da fibra plástica.

Neste processo foram utilizados os seguintes dispositivos e acessórios:

- Puxatriz (Dispositivo eletromecânico) Motor de passo 5:1
- Laser CO₂. (Fonte de energia na saída 30v ; 12A)
- Controle PWM Power Laser (UC2000)
- Ventilador 12v
- Cilindro lente de ZnSe
- Suporte de cilindros e deslocamento da POF
- Cilindros – Guia transporte da POF

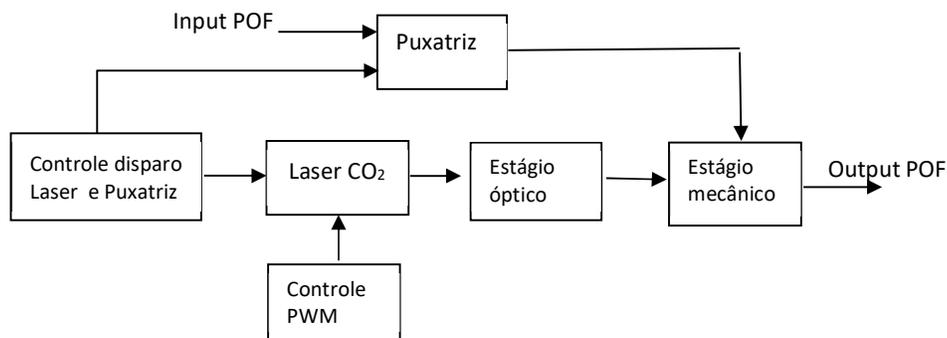


Figura 3.9 - Diagrama de Blocos do Setup para a realização das ranhuras na lateral da POF con laser CO₂.

3.2.1.2 P&D do Controle Elétrico do processo de confecção de ranhuras na POF

A placa de driver tem a função de fornecer ao motor os níveis adequados de tensão e corrente para sua movimentação, permitindo o deslocamento da POF.

Esta placa está constituída por componentes eletrônicos os quais nos permitem ativar um motor elétrico que faz parte da puxatriz. Esta placa driver é controlada por um

microcontrolador ARDUINO que foi programado em linguagem de programação C/C++. Este dispositivo permite o funcionamento da puxatriz, como também permite a ativação do Laser CO₂ por um tempo curto de 10 ms.

Na Figura 3.10 é mostrado o circuito elétrico que permitiu o funcionamento da puxatriz. O circuito esquemático é apresentado na Figura 3.11, onde é apresentada a lista de componentes utilizados na implementação da placa.

- Optoacopladores 4N25 (4)
- Resistores 680 Ω (4) ; Resistores 560 Ω (4); Resistores 18 k Ω (4)
- MOSFET 30N06 (4)
- 7408 (1)
- ARDUINO UNO (1)
- Potenciômetro
- Fonte de energia 12 voltios / 5.5 Amp.

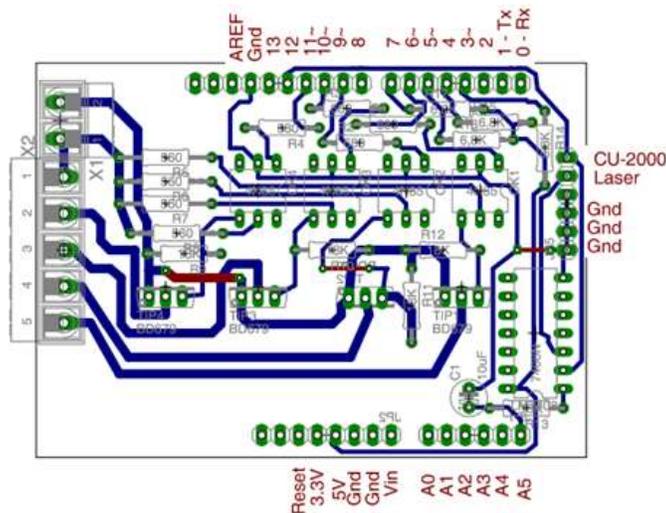


Figura 3.10 - Esquema da placa de controle do Puxatriz.

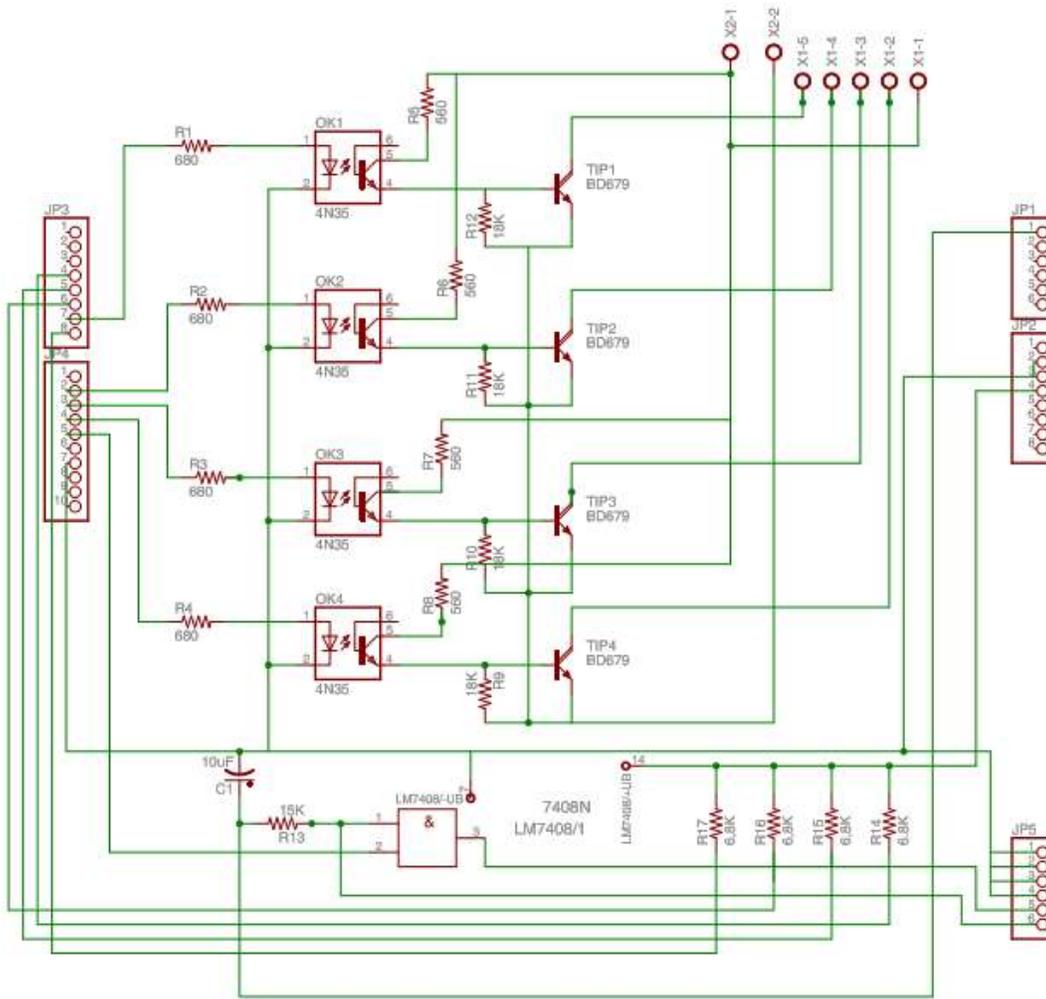


Figura 3.11 - Circuito esquemático do controle do Puxatriz

Na Figura 3.12 é apresentada, uma vista detalhada da etapa de controle na furação da POF, mostrando cada um dos componentes implementados, como: o Arduino; uma fonte de energia; e um conjunto de interruptores que permitem inserir uma informação (0 e 1) para o ARDUINO e assim haver o controle das ações do motor e do laser. Podendo cotar: as chaves *switch* (*right / left*) que permitiram dar sentido giratorio ao motor do puxatriz; a chave *switch* (*auto / manual*) nos permitiram poder atuar no funcionamento do motor e a ativação do Laser, conjuntamente com o pulsador. O pulsador permite ativar o Laser de CO₂ por um determinado tempo muito curto e assim preservar a estrutura da POF. E por último o potenciômetro usado para a variação da velocidade do motor da puxatriz.

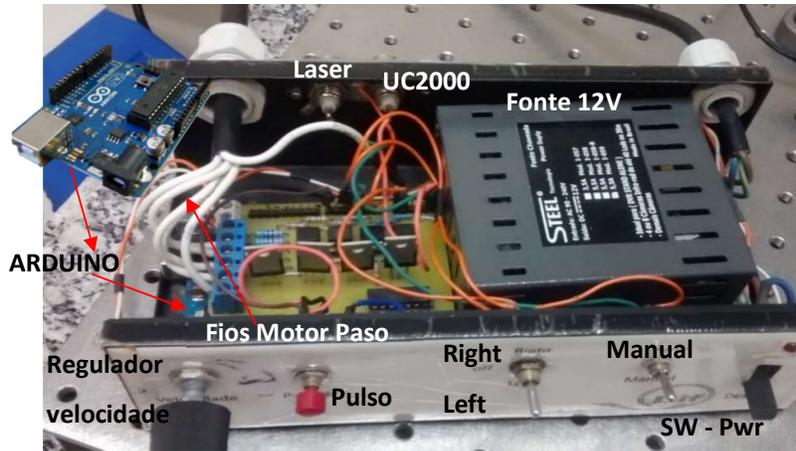


Figura 3.12 - Fotografia do controle Puxatriz.

3.2.1.2 Atuação do laser CO₂ na confecção de ranhuras

Esta etapa consiste na atuação do laser de CO₂ na confecção das ranhuras na POF, visando obter uma ótima e correta manipulação POF e assim poder ser atingida pelo Laser.

O Laser de CO₂ (série 48 da SYMRAD) é mostrado na Figura 3.13 e opera no comprimento de onda (λ) de 10,6 μm e um controle de potência com a máxima potência de 25 W é atingido por Modulação de Largura de Pulso (PWM). Na saída do Laser se obtém um feixe de 3.5 mm de diâmetro. Este dispositivo nos permite controlar a potência total em uma escala porcentual (2.5% – 95%). Foram realizadas vários ensaios com vários parâmetros como a potência, velocidade da puxatriz, e o tempo de incidência do laser na POF.

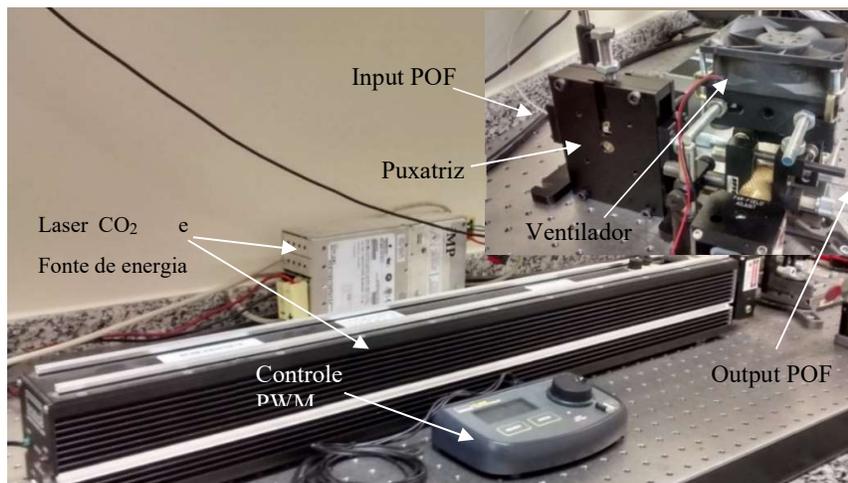


Figura 3.13 - Estrutura óptica e mecânica para furação. Laboratório LIF- UFRJ.

Uma lente convergente permite que os raios de luz, que incidem como feixes paralelos ao eixo principal e após sofrerem degradação, se concentram em um único ponto determinado como ponto focal (FL). Para este trabalho foi usada uma lente de Seleneto de Zinco (ZnSe) com um FL de 25.4 mm, visando concentrar a luz do laser que é maior que o diâmetro da POF (2mm). Esta lente é fixada num suporte cilíndrico metálico, o qual é colocado na direção paralelo ao eixo do feixe do laser de CO₂, como é mostrado a seguir na Figura 3.14 .

Neste processo foi usado um dispositivo eletro-mecânico denominado puxatriz, que permite deslocar a POF a uma velocidade constante e assim a POF ficar exposta no laser no menor tempo possível, mantendo as suas características, como a flexibilidade e assim evitar fissuras que levam a fibra ficar sensível e suscetível ao rompimento no momento da manipulação.

Inicialmente, foram realizados ensaios com duas distintas velocidades da puxatriz, uma velocidade máxima e uma velocidade mínima, fornecendo valores diferenciados da radiação óptica. Foram calculados os valores das velocidades mencionadas, utilizando uma medida de comprimento padrão da POF (30 cm) e tempos distintos, variando o deslocamento da fibra sobre o eixo $t_{max} = 10.78$ s e $t_{min} = 15.45$ s.

Aplicando a equação de $e = v \times t$ se obtém:

$$V_{min} = e / t_{min} \quad \rightarrow \quad V_{max} = 30 \text{ cm} / 10.78 \text{ s} \quad \text{então} \quad V_{max} = 2.78 \text{ cm/s} \quad (3.1)$$

$$V_{max} = e / t_{max} \quad \rightarrow \quad V_{min} = 30 \text{ cm} / 15.45 \text{ s} \quad \text{então} \quad V_{min} = 1.94 \text{ cm/s} \quad (3.2)$$

Por fim, este arranjo foi implementado uma vez que a POF estava sendo danificada. A implementação se deu através de uma série de dispositivos mecânicos, visando facilitar o transporte / deslizamento da fibra óptica, como pode ser observado ilustrado nas Figura 3.13 e Figura 3.14 e com isso preservar a estrutura da POF.

Este processo se deu com a colocação da POF em uma das extremidades do puxatriz, e sendo puxada e conduzida na direção dos suportes guias da POF. Estes suportes guias foram confeccionados por dois cilindros de alumínio em forma de funil com o diâmetro final de 2 mm, facilitando o percurso a ser percorrido pela POF. Foi utilizado também um

ventilador na parte de cima dos cilindros-guia, visando evitar a fumaça proveniente da concentração de matéria PMMA na parte final do percurso do funil, atrapalhando o deslocamento da POF e consequentemente causando sua danificação por excesso de tempo exposição da fibra no feixe do laser. A montagem do ventilador foi feita colocando dois parafusos no suporte dos cilindros guias e assim permitindo a fixação do ventilador através de grampos metálicos, permitindo uma perfeita fixação do mesmo.

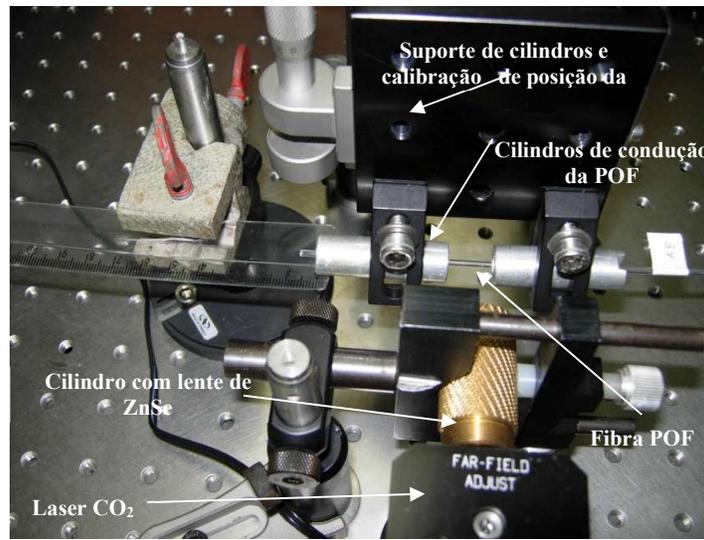


Figura 3.14 - Estrutura da furação POF.

3.2.1.3 Sistema iluminação completo baseado em, rastreamento solar, lentes de Fresnel e feixe de POF com ranhuras para testes em nível piloto.

Uma vez que as ranhuras das POFs foram concluídas, a próxima etapa consiste na montagem do feixe de POFs, juntamente com todo sistema operante.

Além do rastreamento do sol, tem-se que avaliar outras variáveis através de ensaios como a temperatura e a intensidade luminosa concentrada pela lente de Fresnel que são de importância para evitar danificar as propriedades físicas e químicas da POF. O trabalho estará voltado para a comprovação do melhor arranjo de PBR “Fotobioreator iluminado Internamente” Solar para o cultivo de microalgas na produção de biomassa.

Este sistema de rastreamento permite a movimentação da lente a partir de uma programação algorítmica, acompanhando as diferentes posições do sol durante os 365 dias do ano. A lente de Fresnel deverá ter seu eixo sempre voltado para o Sol, para manter seu foco centrado na área de um dos extremos do feixe POFs, desde seu nascimento até ao ocaso.

O sistema completo é mostrado na Figura 3.15 onde inicialmente foi testado em laboratório em um protótipo de PBR de material polipropileno com capacidade de 30 litros. O efeito de concentração de luz, em torno de 300 vezes, deverá ser cuidadosamente estudado para evitar excesso de calor no extremo do feixe de POF. Caso tenha excesso de calor, será utilizado um filtro de infravermelho.

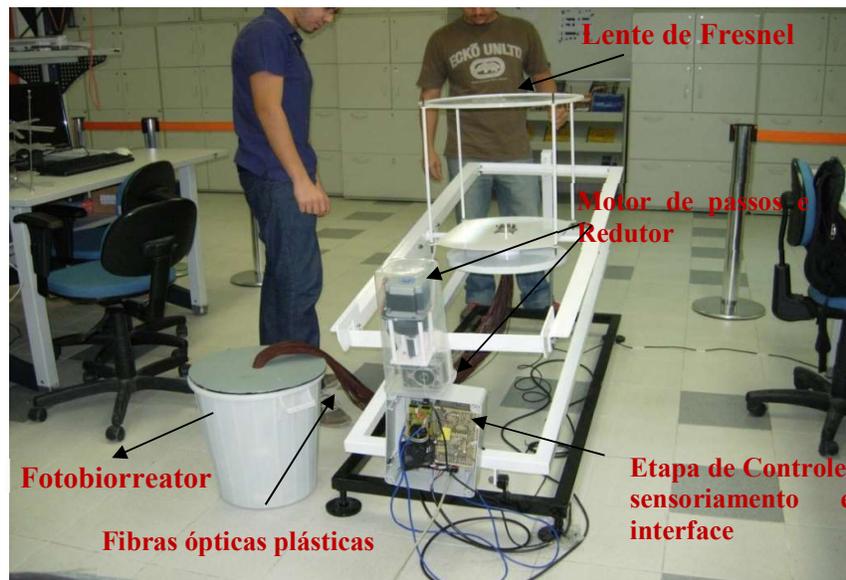


Figura 3.15 - Sistema de rastreamento solar utilizando lentes de Fresnel.

3.2.1.4 Processo de retiro de cascara das fibras ópticas plásticas

O preparo das fibras ópticas de plástico para o processo do retiro da cascara da fibra com o Laser CO₂ (instalado no laboratório de Instrumentação e Fotônica LIF), visa a otimização da furação da fibra para vazamento da luz ao longo das laterais da POF e poder iluminar o interior do PBR. A Figura 3.14, mostra-se o esquema da montagem para a furação das POFs, as peças e aparelhos utilizados foram definidos acima no Setup óptico.

O Laser de CO₂ (série 48 da SYNRAD), emite um feixe de 3,5 mm de diâmetro na saída e uma abertura de 4 mm à cada 01 metro de distância percorrida. Vale mencionar um inconveniente, uma vez que a POF tem menor diâmetro. Para o ajuste e adequação do ótimo diâmetro do feixe do laser CO₂ e conseguir atingir a fibra POF em um ponto específico, foi necessária a compra e a instalação de uma lente de Seleneto de Zinco (ZnSe) que foi instalada em um suporte cilíndrico.

O controle da potência do laser para incidir na POF foi em função do tempo de ativação de incidência na fibra. Foram realizados dois métodos para conseguir a iluminação lateral: um método foi realizado como furação pontual e a outra como ranhura longitudinal, sendo realizados ensaios em uma fibra plástica de comprimento de 30 cm, sendo atingida só 15 cm da fibra.

Para a implementação do método de ranhura, a velocidade do motor da puxatriz e a potência do laser foram minuciosamente estudados. Nos ensaios foram consideradas duas velocidades, uma velocidade máxima $V_{\text{máx}}$ e uma velocidade mínima $V_{\text{mín}}$, e vários valores de porcentagem da potência total do laser. Para o método da furação pontual, realizaram-se vários ensaios na obtenção dos melhores resultados que são de 10 ms, sem deslocamento da POF, considerando como fatores importantes o tempo de ativação que é muito pequeno e a porcentagem da potência total do laser, visando evitar dano a fibra POF.

A Figura 3.16, apresenta as fibras após a furação pontual, ainda sem a puxatriz, quer dizer que a POF fica fixa no meio dos cilindros de alumínio, sem sofrer nenhum deslocamento. Percebe-se que a partir de 3% e 4% da potência máxima do laser e a 10 segundos de incidência o aparecimento de fissuras na estrutura da fibra. Essas fissuras indicam que a fibra foi danificada ficando susceptível ao rompimento no momento da colocação e manuseio das fibras no PBR.

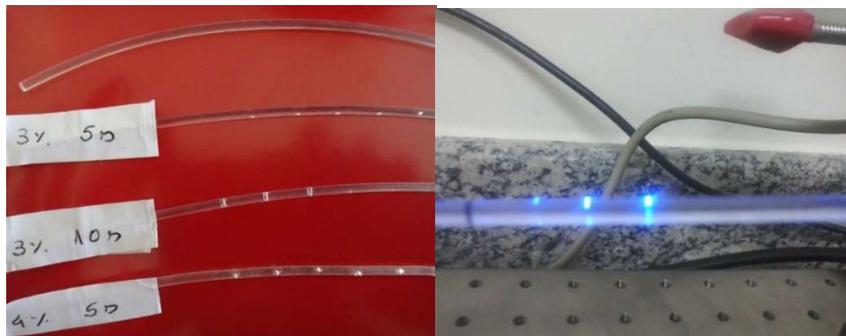


Figura 3.16 - POF de cima para baixo: 3% (5 e 10s) e 4% com 5s.

3.2.1.5 Testes para medida da radiação incidente nas POFs

Estas medições da potência óptica nas POFs, visam conhecer os valores da quantidade de luz que efetivamente é vazada pelas laterais da POF através de furações ou das ranhuras que conduzirão iluminação dentro do PBR, além de verificar sua integridade após a incidência do laser.

Esta potência óptica é medida no extremo da POF de acordo com o diagrama de blocos na Figura 3.17a, estes valores de potência óptica foram atingidos utilizando os seguintes dispositivos descritos abaixo e como é mostrada na Figura 3.17b. Uma fonte de Luz (LED) num dos extremos da POF e no outro extremo foi colocado o sensor fotodetector (918D-SL-OD3R) que faz a função de atuador e assim obtivemos os valores da potência óptica.

A seguir maiores definições e especificações do Power meter, do fotodetector de silício e da fonte de luz a utilizados:

- **Power Meter 1936-C:** fornece uma combinação de características para medir energia óptica e monocromática. Compatível com fotodiodo, Termopilha e detetores piroelétricos. Taxa de medição até 10 kHz com taxa de amostragem de sinal interno de 250 kHz, [86].
- **918D-SL-OD3R:** sensor Fotodiodo de Silício; Faixa espectral (400 - 1100 nm); Energia máxima (2 W); filtro atenuação On/Off, [87].
- LED de cor azul (fonte de luz) Diodo emissor de luz com comprimento de onda ~440 -485 nm.

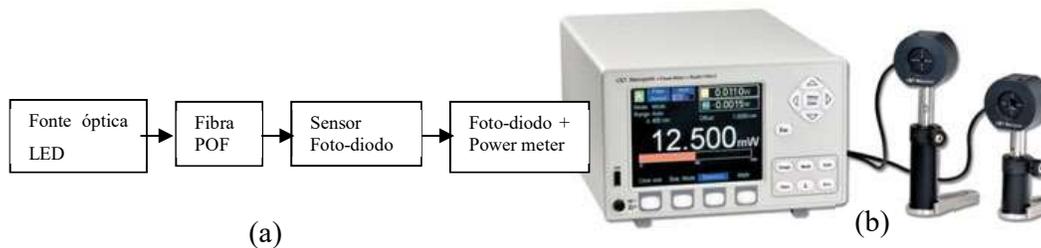


Figura 3.17 - a) Diagrama de bloco do *setup* de medida óptica na POF.
b) Equipamento na medição de radiação óptica

No primeiro ensaio realizou-se a medição da potência óptica na fibra POF de comprimento de 30 cm, sem ser atingida pelo laser (fibra íntegra), a qual será considerada como o valor padrão ou referência, obtendo um valor de 380 μ W como potência óptica direta da fonte de luz.

Na Tabela 3.1, são apresentados os valores de radiação óptica das fibras atingidas pelo Laser de CO₂ com diferentes velocidades da puxatriz, regulando o potenciômetro mostrado na Figura 3.12 e verificando a integridade da fibra. No processo do

desenvolvimento dos ensaios se percebeu que no funcionamento da puxatriz ocorreu uma vibração deste dispositivo com a bancada óptica. Para evitar este efeito de vibração foi colocado um pano na base da puxatriz, com o objetivo de que a ranhura feita pelo laser fosse a mais contínua possível, como é mostrado na Figura 3.18 (a).

Tabela 3.1 - Medições de potência óptica na POF atingida pelo Laser CO₂.

% Energia laser	60 % V _{min}	70 % V _{min}	70 % V _{max}	80 % V _{min}	80 % V _{max}
Potência óptica	65 μW	120 μW	52 μW	68 μW	65 μW
Integridade POF	Boa	Regular	Boa	Quebradiça	Quebradiça

No entanto, podemos observar diferentes valores de radiação óptica na Tabela 3.2, com melhores resultados obtidos, tanto nos valores de radiação óptica, como a característica na ranhura da POF. A gravação do Laser na fibra formou uma característica de linhas paralelas, uma atrás das outras, causadas pela vibração da puxatriz com a mesa da bancada. Como é mostrada na Figura 3.18 (b) e na Figura 3.18 (c) podemos analisar outra visão nesta última Figura, onde a fibra não está iluminada internamente pelo LED com cor azul, permitindo a visualização das linhas gravadas em toda a área incidida pelo laser de CO₂ na fibra POF.

Tabela 3.2 - Medições de potência óptica na POF atingido por o Laser CO₂ com vibração

% Energia do laser	50 % V _{min}	60 % V _{min}	70 % V _{min}	80 % V _{min}	60 % V _{max}	70 % V _{max}	80 % V _{max}
Potência óptica	53 μW	25 μW	38 μW	25 μW	25 μW	55 μW	35 μW
Integridade POF	Boa	Boa	Boa	Quebradiça	Boa	Regular	Quebradiça

Na Tabela 3.3, são mostrados os ensaios de furações na fibra POF que foi atingida pelo laser causando pontos de furação com um tempo de ativação de 10 ms e com uma potência de energia do laser de 9%, existindo um intervalo de 1cm, 0.5 cm e 1/3 cm, ao longo da fibra em um comprimento de 15 cm, como é mostrado na Figura 3.18 (d).

Tabela 3.3 - Medições de potência óptica na POF com furações

% Energia laser	9% - 100 mm	9% - 50 mm	9% - 30 mm
Potência óptica	209 μW	126 μW	60 μW



Figura 3.18 - Modos de ranhura e furação a) ranhura sem vibração b) ranhura com vibração c) ranhura sem vibração d) furação pontual com afastamento de 1 cm .

3.2.1.6 Diâmetro da furação pontual da fibra

Para que o Laser de CO₂ incida na POF e faça uma furação pontual e pontilhada, foi feita a programação no microcontrolador ARDUINO, para que a incidência fosse pelo tempo de 10 ms.

Na Tabela 3.4 se mostra as dimensões da furação da fibra (diâmetro e profundidade), com valores distintos de % de energia óptica do Laser, observando-se que o menor diâmetro que o Laser atingi à fibra POF é de 0,184 mm. As características das furações das fibras pelo Laser é mostrado na Figura 3.19, existindo uma variação da profundidade.

Tabela 3.4 – Dimensões de furações da POF com Laser ativo em 10 ms

% Energia laser	2.5 %	3.0%	4.0 %	5.0 %	9.0 %
Diâmetro externo (mm)	0.534	0.618	0.682	0.682	0.526
Diâmetro interno (mm)	0.184	0.222	0.268	0.258	0.230
Comprimento furação POF (mm)	(*)	0.304	0.323	0.643	1.882

(*) Dificuldade em enxergar a diferença da profundidade com sombras da captura da fibra POF.

Na Figura 3.19 são ilustradas duas imagens obtidas com um Microscópio Digital (*Motic modelo BA-210*), na imagem da esquerda, onde se observa a profundidade e dimensões da furação pelo Laser de CO₂. Na imagem da direita, observamos o diâmetro da furação da fibra, onde será vazada a luz da POF e um diâmetro maior ao redor do furo da fibra, causado pela ação calórico do Laser.

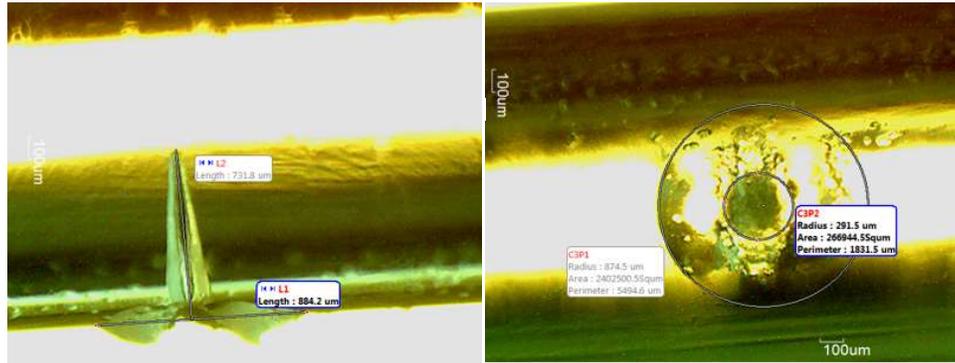


Figura 3.19 - Furação da POF. a) profundidade b) diâmetro furação.

3.2.2 Cultivo 2

Desta forma, visando um perfeiçoamento do sistema de iluminação do Cultivo 1, foram tomadas as seguintes alterações no Cultivo 2. A metodologia das medidas de radiação solar e radiação PAR foram as mesmas adotadas no Cultivo 1.

A Figura 3.20 apresenta os detalhes deste cultivo. A Figura 3.20A, mostra o sistema de iluminação com POFs, através de iluminação pontual (POF sem ranhuras). A Figura 3.20B mostra a iluminação pontual na extremidade da fibra. Adicionalmente, como mostrado na Figura 3.20C, colocou-se um espelho no fundo do fotobiorreator com o objetivo de aproveitar a reflexão da luz que não era aproveitada no fundo do cultivador do Cultivo 1, garantindo um melhor aproveitamento da mesma. Este método de reflexão dos raios de luz em superfícies como solos e superfícies transparentes foram abordadas em [72].

Para garantir uma melhor distribuição da luz no interior do cultivador, as fibras foram distribuídas em duas diferentes alturas Figura 3.20D.

A distribuição dos discos de acrílico com as POFs dentro do cultivador é descrita a seguir. O primeiro disco foi distribuído próximo à superfície do cultivo, visando aproveitar a iluminação, desde essa posição até o segundo disco posicionado na metade do cultivo. Por fim, recebendo o reflexo da luz através do espelho.

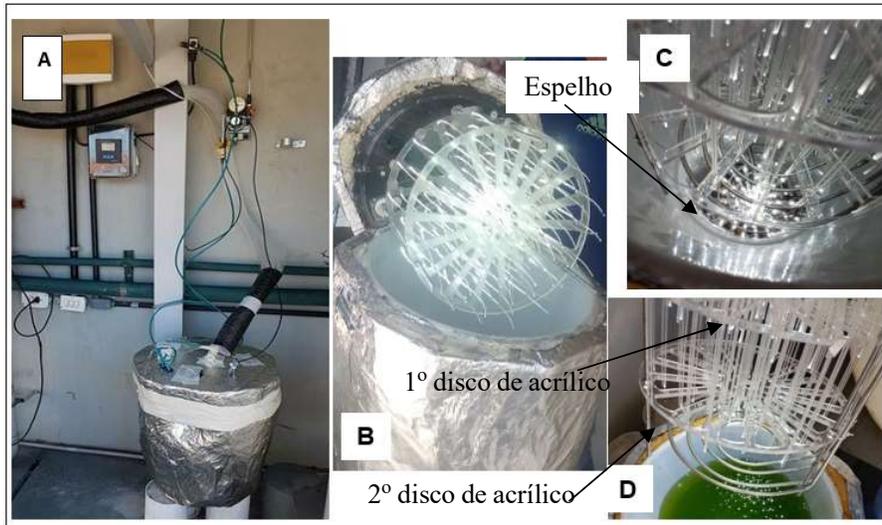


Figura 3.20 - Implementação do Sistema do Cultivo 2: a) PBR não transparente - inovador iluminação interna pontual por POFs. b) iluminação pontual no extremo das POFs. c) Espelho no fundo do PBR-POF. d) Arranjo de fibras ópticas distribuídas em duas diferentes alturas de fixação.

3.2.3 Cultivo 3

Este cultivo tem o objetivo de adicionar LEDs superluminescentes ao sistema de iluminação, para os dias chuvosos ou nebulosos, visando a comparação da densidade de celular dos PBR-POFs do Cultivo 3 e o Cultivo 2. Sendo assim, para o Cultivo 3 as seguintes otimizações foram realizadas.

A Figura 3.21 apresenta as implementações deste cultivo. A Figura 3.21A apresenta de maneira geral os sistema de iluminação solar e otimizado com LEDs. A Figura 3.21B apresenta os dois feixes de iluminação em destaque. A Figura 3.21C a estrutura e os dispositivos utilizados no sistema de iluminação. Foram utilizados um total de 256 POFs, onde, 128 fibras de 8m de comprimento continuaram recebendo luz do rastreador solar e outras 128 fibras de 1,5 m, de comprimento foram acopladas a um sistema de iluminação alternativo, usando LEDs superluminescentes. Ou seja, durante os dias ensolarados o cultivador recebia a luz concentrada pela lente de Fresnel e nos dias nublados recebia luz dos LEDs. O sistema de iluminação por LEDs ajustou-se, de forma tal que a quantidade de luz que chegava ao cultivador durante seu uso equivalente à média promédio da luz de um dia ensolarado no sistema de rastreamento. Vale mencionar que as fibras usadas não tinham ranhuras e foram colocadas nos dois níveis de altura e mantendo-se o espelho, como no Cultivo 2.

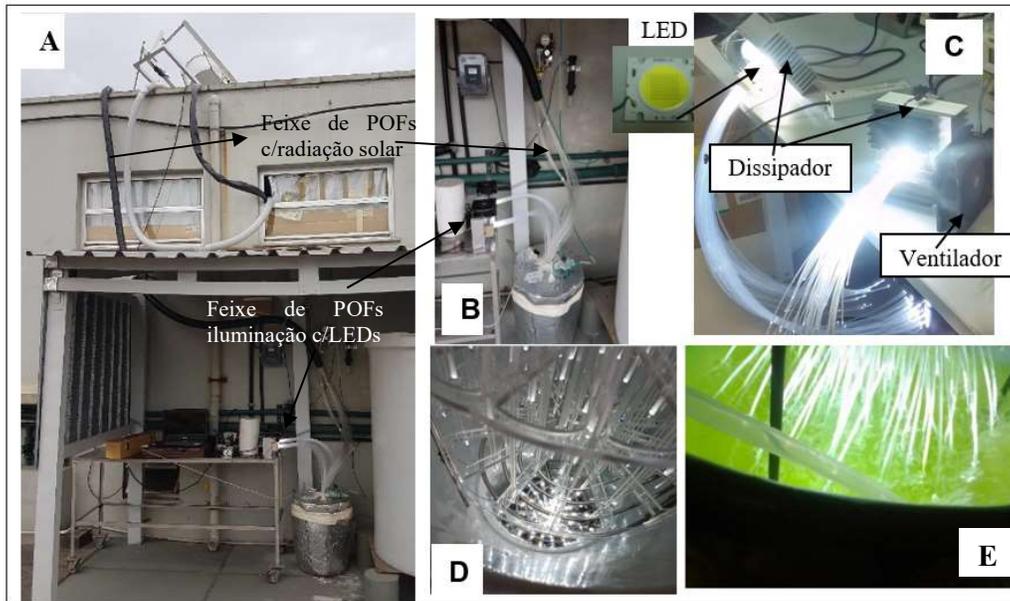


Figura 3.21 - Implementação do Sistema do Cultivo 3: a) PBR-Janela com iluminação interna por POFs acopladas a sistema de rastreamento solar e a sistema alternativo iluminação por LEDs. b) Sistema de iluminação com 2 feixes em destaque. c) dispositivos utilizados no sistema de iluminação por LEDs. d) Espelho no fundo do PBR-POF. e) Arranjo de POFs utilizando a luz de LEDs como iluminação interna.

3.3 Ensaio da variação da temperatura induzida na fibra POF pela lente Fresnel

Os testes realizados e apresentados neste item foram ensaios de medição temperatura na POF, atingida pela concentração solar da lente de Fresnel. Sabe-se que a lente de Fresnel usada tem uma distância focal (**FL**) de 46 cm, onde a temperatura obtida atingida numa matéria, alcança valores altos, devido a que à área de concentração é muito menor que à área fonte. Esta variação de temperatura induzida pela lente de Fresnel às fibras POF, depende muito dos valores da intensidade luminosa do Sol que é medida W/m^2 . A aplicação do feixe de POF permite a captação de mais luz, além de possuir uma densidade 2,5 vezes menor. Por outro lado, a temperatura máxima de 80 °C para POFs de PMMA limitam a concentração solar, contrastando com os cerca de 2.000 °C das fibras de sílica [92].

A fibra POF usada é de 2mm (ESKA 80) que suporta temperaturas não superiores a 80 °C máx. Temperaturas acima deste valor acarretam uma deterioração física e a 60 °C acontece uma deterioração nas propriedades físicas ópticas [93].

A fibra POF é composta por materiais de Poly (Methyl Methacrylate), e ao ter um diâmetro muito pequeno torna-se um problema na concentração de temperatura. Para resolver este problema se considerou trabalhar com algumas opções de matérias, como observa-se no diagrama de blocos do *Setup* óptico apresentado na Figura 3.22 onde se coletaram os dados dos espectros dos diversos modos de reflexão da luz infravermelha, que vem a ser o principal problema do aquecimento das POFs.

Neste sessão serão apresentados dois tipos de ensaios: primeiramente, se realizaram ensaios com a temperatura no feixe de fibras POF e posteriormente, se realizaram ensaios da espectrofotometria de cada um dos modos utilizados na primeira etapa, que permitiram evitar o aquecimento do feixe de fibras com o uso de matérias de simples aplicação e não custosos (como as peças de acrílico e vidro), e também o uso de filtros ópticos (FLUKE -VT04A) da banda de comprimento de onda infravermelha.

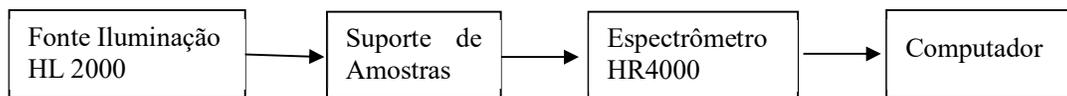


Figura 3.22 - *Setup* óptico da espectrometria de filtros ópticos utilizados em experimentos.

Na primeira etapa destes ensaios na procura de conseguir um menor aquecimento no feixe de fibras POF que é causada pela concentração de raios de luz solar coletadas pela lente de Fresnel, onde os raios foram concentrados na sua capacidade máxima, conforme a sua distância focal da lente (FL), que para este caso é $FL = 45\text{cm}$.

A Figura 3.23 apresenta um esquema sobre os testes realizados visando a procura da redução do aquecimento das POFs, através dos equipamentos de medida de temperatura como, o medidor infravermelho e o aquisitor de dados que trabalha em conjunto com um termistor par tipo J.

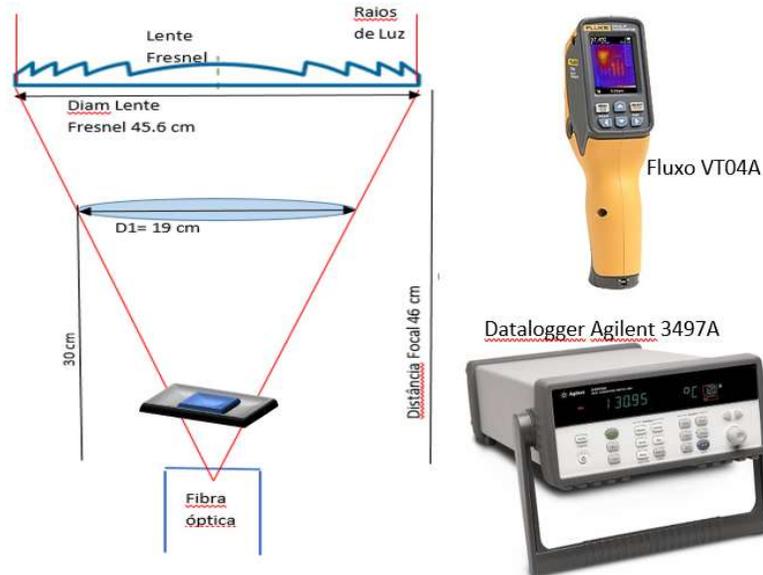


Figura 3.23 – Esquerda: esquema do uso de filtro óptico para reduzir o aquecimento nas fibras. Direita: equipamentos utilizados.

Nesta etapa foram coletados os dados dos espectros obtidos da energia radiante incidente em um suporte de amostras (cristais como vidro - espelhos), que no caso foram pedaços de vidro com diferentes graus de espessuras (0.5 cm e 1 cm). O uso de um filtro de (Mirror Hot – EDMUND) com ângulo de incidência 0° permitem eliminar parte da IR. Na Figura 3.24 é apresentada o espectro de transmissão e reflexão do filtro (Mirror Hot) com ângulo de incidência de 0° e 45° com dimensões de 50 mm quadrados.

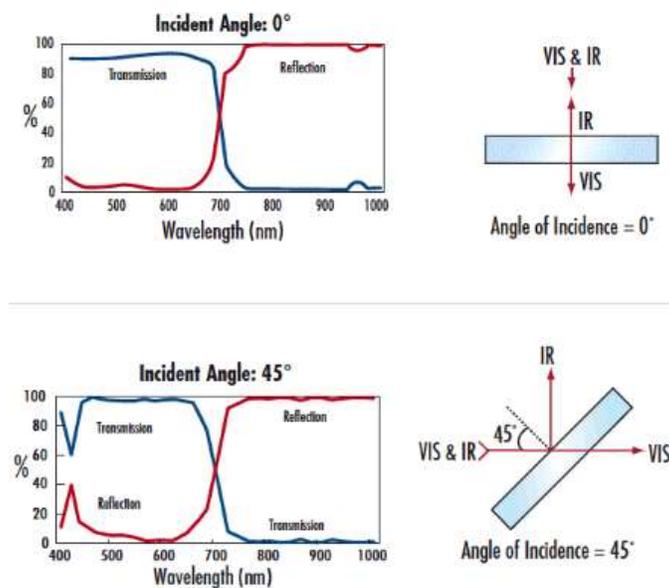


Figura 3.24 - Característica de Filtro espelho IR [94].

No desenvolvimento desta etapa foram utilizados um fonte luminosa branca Halógena que serviu como ponto de referência, um porta-amostras (espelho e vidros) e um espectrômetro (Ocean Optics- HR4000), que captura uma determinada quantidade de energia radiante incidente que passa através dos vidros e o espelho IR. Foram utilizadas dois *path-cord* para conseguir a transmissão da fonte óptica em direção ao porta-amostras e outro *path-cord* que permitiu a condução da energia radiante incidente pelas amostras em direção ao espectrômetro e em seguida, transportou dados para um computador, como é mostrado na Figura 3.25.

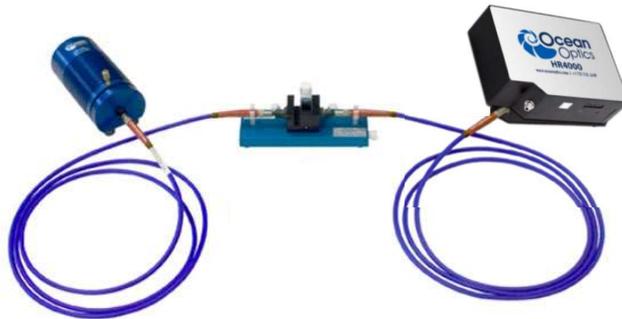


Figura 3.25 - Esquema na medição dos espectros de amostras.

Na Figura 3.26 é apresentada a intensidade de luz e o comprimento de onda de cada uma das amostras visando para a redução de aquecimento na POF. Na Figura 3.27 é mostrada a transmitância das mesmas amostras. Em ambas figuras pode-se observar que o Mirror IR mostra melhores resultados na eliminação do IR permitindo passar a faixa do comprimento de onda da luz visível.

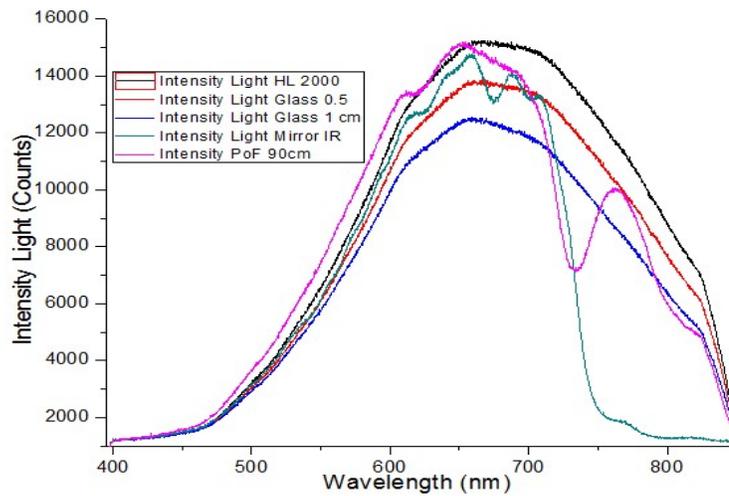


Figura 3.26 - Atenuação de filtros em relação a comprimentos de onda.

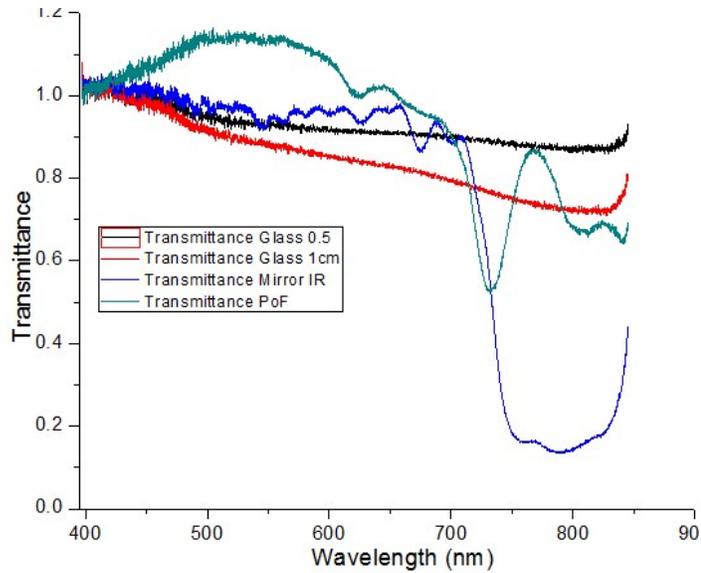


Figura 3.27 - Transmittância dos filtros em relação a comprimentos de onda.

Um ensaio muito importante foi realizado com o mesmo objetivo de obter a temperatura exata da luz concentrada pela lente de Fresnel na ponta do feixe da POF sem filtro usando um aquisitor de dados (Datalog Agilent 3497A) e um termopar. O sensor termopar (tipo-J) foi inserido por um orifício na lateral da espessura da lâmina de acrílico, para assim conseguir medir a variação de temperatura, diretamente no acrílico, sem interferência de outros fenômenos térmicos externos.

As medidas foram feitas variando a altura de uma lâmina de acrílico, através do deslocamento no eixo vertical, com respeito ao ponto focal da lente, como mostrado na Figura 3.28, no sentido da seta, medimos a temperatura máxima e o diâmetro do feixe de luz concentrada pela lente de Fresnel na superfície do acrílico sem causar danos na POF.



Figura 3.28 - Ensaio de temperatura e diâmetro do feixe de luz formado a uma determinada altura do deslocamento vertical.

Como podemos observar na Tabela 3.5, o resultado dos valores de temperatura coletados na lâmina de acrílico, que simulou o feixe de POFs, e sem o uso de filtro. A altura formada pelo deslocamento vertical foi considerado desde o ponto focal até a direção da lente de Fresnel representada na coluna B. O diâmetro formado pela concentração solar da lente de Fresnel para cada altura, está representado na coluna C. Estas medições de incidência de radiação solar foi feita por meio de um piranômetro (modelo SP-110, APOGEE), que permite medir a densidade de fluxo da radiação solar de um campo de visão de 180° graus e uma sensibilidade 0.2 mV por Wm⁻².

Os valores ótimos adquiridos foram com distância de 30 cm, onde a temperatura não foi superior à 60 °C.

Tabela 3.5 - Medidas de temperatura com termopar (°C) sem filtro a cada minuto.

A	B	C	D	E	F
Ensaio #	Distância (cm)	Diâmetro (cm)	Temperatura (C°)	Piranômetro (mV)	Incidência Radiação solar (W/m ²)
Ensaio 1	2	2	135.5	168	840
			160	170	850
			105	159	795
			94	154	770
			280	195	975
Ensaio 2	6	2.7	140.5	139	695
			144.6	138	690
			153	152	760
			128	129	645
			230	186	930
Ensaio 3	12	5	160	195	975
			190	190	950
			175	185	925
			153	160	800
			165	162	810
Ensaio 4	18	9.3	110	175	875
			107	190	950
			111	190	950
			106	185	925
			100	162	810
Ensaio 5	22	12.5	80	160	800
			83	150	750
			83	150	750
			83	155	775
			84	150	750
Ensaio 6	26	15.2	59	116	580
			58.4	121	605
			59.4	128	640
			59.8	130	650
			56.6	145	725
Ensaio 7	30	20.5	53	180	900
			54.6	170	850
			53	160	800
			50.6	145	725
			50.2	144	720

Podemos notar, que quanto mais perto se encontra a lâmina de acrílico do ponto focal da lente, maior é a temperatura medida.

O segundo ensaio realizado, teve o objetivo de utilizar materiais tais como, o vidro e o mesmo acrílico visando desta vez usá-los aplicados como filtros. Assim permitindo refletir a luz infravermelha (IR) que causa aquecimento nos objetos e deixando incidir somente o fluxo da luz visível, a qual é essencial para a fotossíntese do cultivo das microalgas. Neste ensaio foram aplicadas três lâminas; a primeira lâmina utilizada de acrílico com dimensões de espessura 1 cm e área 20x20cm, uma segunda lâmina de vidro. Finalmente, uma terceira lâmina de acrílico com dimensões espessura 0.5 cm, 9x9 cm de área, que substituiu o feixe de POF, foi utilizada como meio de medição da temperatura.

Primeiramente, realizou-se o deslocamento no eixo vertical com respeito ao ponto focal da lente de Fresnel, uma lâmina de acrílico de 1cm de espessura como filtro da luz infravermelha foi fixado a uma altura de 26 cm, deslocando a lâmina de acrílico no eixo vertical a lente de Fresnel para a coleta de temperatura a diferentes alturas, como mostrado na Figura 3.29. Os valores de temperatura obtidos na lâmina de acrílico com o termopar tipo J são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Medidas de temperatura usando acrílico como filtro com 26 cm de altura.

Ensaio #	Distância (cm)	Diâmetro (cm)	Temperatura (C°)	Piranômetro (mV)	Incidência Radiação solar (W/m ²)
Ensaio 1	2	2	240	160	800
			287	156	780
			263	145	725
			245	152	760
			238.5	144	720
Ensaio 2	6	2.7	175	145	725
			175	144	720
			178	138	690
			155	125	625
			147	112	560
Ensaio 3	12	5	112	110	550
			106.2	120	600
			110	128	640
			117	137	685
			121	145	725
Ensaio 4	18	9.3	97	165	825
			95	171	855
			91.5	145	725
			89	145	725
			89.6	147	735

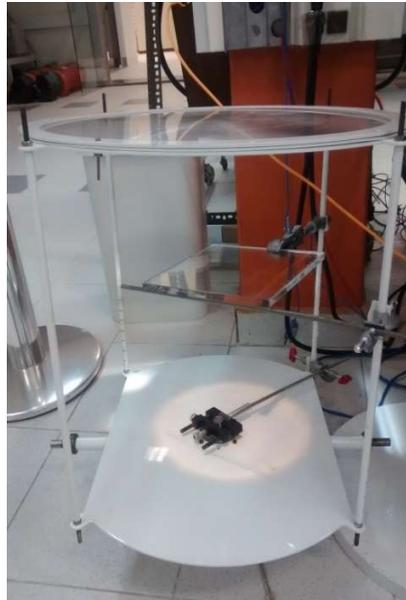


Figura 3.29 - Desenvolvimento do ensaio medição de temperatura com o uso de filtro de acrílico.

Em um terceiro ensaio, foi utilizada uma peça de vidro com espessura de 0,6 cm e 20 cm de diâmetro como filtro de IR, realizando o mesmo processo de medida dos ensaios anteriores, fixando a lâmina de vidro a 2 cm deslocado, verticalmente com referência a distância focal da lente de Fresnel. A Tabela 3.7 apresenta os resultados deste ensaio de medida de temperatura sem o uso de filtros e com o uso de acrílico e vidro como filtros localizados a 26 cm da distância local.

Tabela 3.7 - Medidas de temperatura usando acrílico e vidro como filtro.

Ensaio #	Distância (cm)	Diâmetro (cm)	Temperatura (C°)	Piranômetro (mV)	Incidência Radiação solar (W/m ²)
Ensaio sem filtro	2	2	215	173	865
			166.5	173	865
			180	170	850
			162	164	820
Ensaio com f. acrílico	2	2	256	158	790
			155	154	770
			170	160	800
			258	156	780
Ensaio com f. vidro	2	2	174	180	900
			186	185	925
			194	170	852
			188	177	885

Uma vez que, já foi determinado a altura ideal para se posicionar o feixe de POF (Tabela 3.5) evitando a degradação da POF por conta da temperatura, a próxima etapa consiste no cálculo do diâmetro da lente de Fresnel.

3.4 Cálculo do diâmetro lente Fresnel

Este cálculo visa poder diminuir o diâmetro da lente de Fresnel, a partir do tamanho atual de 45.6 cm de diâmetro que vêm causando problemas de aquecimento no feixe de fibras POF, posicionada na distância Focal.

Primeramente, se realizou o cálculo dos valores da lente de Fresnel para uma distância, ou seja uma posição inicial, sem ser a distância focal no começo do experimento, onde os resultados na temperatura não eram ($>60^\circ$) adequados para a POF.

Então, adotando:

$$\text{Diâmetro da lente Fresnel} \quad \varnothing_{FR} = 45.6 \text{ cm} \quad (3.3)$$

$$\text{Área da lente} \quad A_{FR} = 0.1662 \text{ m}^2 \quad (3.4)$$

Obtemos o valor da Potência:

$$\text{Potência} \quad P_{FR} = 1000 \text{ w/m}^2 * A_F \quad (3.5)$$

$$P_{FR} = 166.2 \text{ w} \quad (3.6)$$

Em seguida foi realizado o cálculo da densidade óptica a uma distância ideal de 30 cm, na qual foi obtida uma temperatura de 53 °C, que não é prejudicial para a fibra POF.

Foi adotado:

$$\text{Diâmetro da área referente (ótima)} \quad \varnothing_{ot} = 19 \text{ cm} \quad (3.7)$$

Obtemos o valor da densidade óptica:

$$\text{Densidade óptica} \quad OD_{ot} = \frac{P_F}{A_{ot}} = \frac{166,2}{0.028} \quad (3.8)$$

$$OD_{ot} = 5872.79 \text{ w/m}^2 \quad (3.9)$$

Uma vez que adotamos um porta feixe com diâmetro ($\varnothing_f = 2.5 \text{ cm}$), foram reservadas 128 POFs de 2 mm de diâmetro. A próxima etapa consistiu no cálculo do valor da potência óptica no feixe das fibras.

Onde:

$$A_f = \frac{\pi \cdot \phi_f^2}{4} = 0.0005 \text{ m}^2 \quad (3.10)$$

$$P_f = OD_{ot} * A_f \quad (3.11)$$

$$P_f = 2.9364 \text{ W} \quad (3.12)$$

Por fim, foi feito o cálculo do novo diâmetro de uma lente de Fresnel menor.

$$P_f = A_n * 1000 \text{ w/m}^2 \quad (3.13)$$

$$A_n = 0.00294 \text{ m}^2 \quad (3.14)$$

Então:

$$\phi_n^2 = \frac{A_n * 4}{\pi}$$

$$\phi_n = 0.06118 \text{ m} \quad \text{ou} \quad \phi_n = 6.12 \text{ cm} \quad (3.15)$$

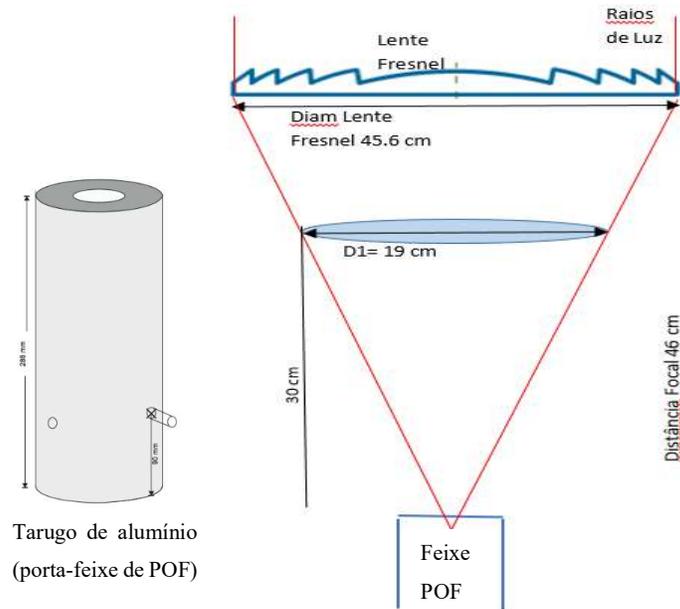


Figura 3.30 - Estrutura esquemática mostrando o nível adequado com temperatura de 60 a 70 °C na POF.

Para simular este deslocamento no eixo vertical do feixe de fibras plásticas foi projetado e desenvolvido, um tarugo de alumínio, como é mostrado na Figura 3.30, que

permite posicionar este feixe a uma altura específica. Sabe-se que os valores obtidos onde a POF não apresenta riscos é, cerca de 30 cm de altura e 19cm de área formada pelo feixe de luz da lente de Fresnel. Podemos comparar com a área do feixe de POF que é de 2.5 cm, onde a concentração solar é muito maior, resultando em valores elevados de temperatura prejudiciais a POF.

A partir desta informação, se procedeu o desenvolvimento do porta-filtro, que foi utilizado com o fim de refletir os deizes de luz IR. O porta-filtro foi projetado e desenvolvido, utilizando uma lâmina de alumínio com dimensões de 10x10cm que será fixado a través de dois parafusos com o tarugo de alumínio e assim permitir um micro-ajuste na concentração solar atingida no feixe POF. Um compartimento de iguais dimensões ao filtro IR de (5 x 5cm), como é ilustrado na Figura 3.31.

Para medir a temperatura eficientemente, foi adquirido Termômetro com imagem termal (FLUKE VT04A), A vantagem deste instrumento é a combinação da imagem visual medido com sobreposição do local de aquecimento por IR, que muito ajudou a identificar as áreas de maior aquecimento, segundo uma escala de mapeamento de aquecimento adotada. Sendo assim, foi possível visualizar a área exata de aquecimento. A Figura 3.31 mostra o esquema e a fotografia do ensaio de temperaturavisualizada com o filtro e a fixação do feixe de POFs.

Após finalizar esta etapa, foi concluído que a inclusão ao sistema de um filtro óptico de IR era imprescindível.

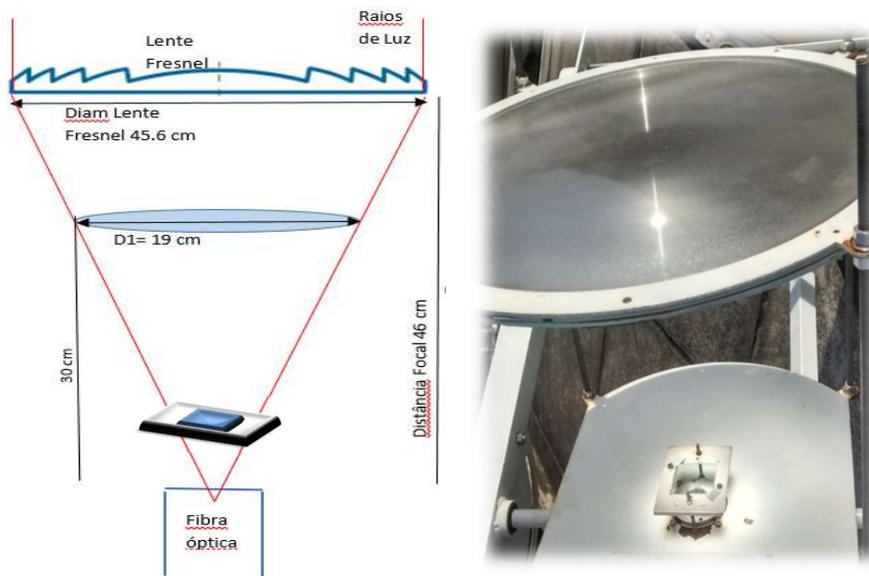


Figura 3.31 - Fixação de porta-filtro e porta-feixe POF nos ensaios de temperatura POF.

Desta forma, uma nova etapa de ensaios foi realizada com a inclusão de filtro óptico de IR (mirror) e um medidor de temperatura visual de IR.

Na Tabela 3.8 apresenta o estudo e análise da medida de temperatura sem e com filtro óptico de IR.

Tabela 3.8 - Medidas de temperatura sem / com filtro IR.

Hora das Medidas	Iluminância [klx]	Área Iluminada [m ²]	Altura Lente > Feixe [cm]	Concentração Solar	Temp Ambiente	Temp Fibra POF Sem Filtro IR	Temp Fibra POF com Filtro IR	Fluxo Luminoso [lm/Fibra]
13:07	111	0.00785	35	20.25	30	37.8		7.06
13:19	111	0.00709	37	22.44	30	40.5		7.82
13:25	111	0.00442	38	36.00	30	41.2		12.55
13:30	111	0.00283	40	56.25	30	45.5		19.62
13:35	111	0.00238	42	66.94	27	55.60		23.34
13:40	111	0.00159	43	100.00	28	59.60		34.87
13:45	111	0.00031	44	506.25	28.3	75.70		176.54
13:55	111	0.00159	43	100.00	33	59.00		34.87
14:20	106	0.00159	43	100.00	29		48.00	33.30
15:25	107.5	0.00031	44	506.25	28.2		53.10	170.97

Na Figura 3.32, pode se observar a diferença entre as medidas de temperatura realizadas no feixe de POF sem filtro e com filtro, observando uma grande diminuição da temperatura, onde com o uso do filtro IR a redução é notável.

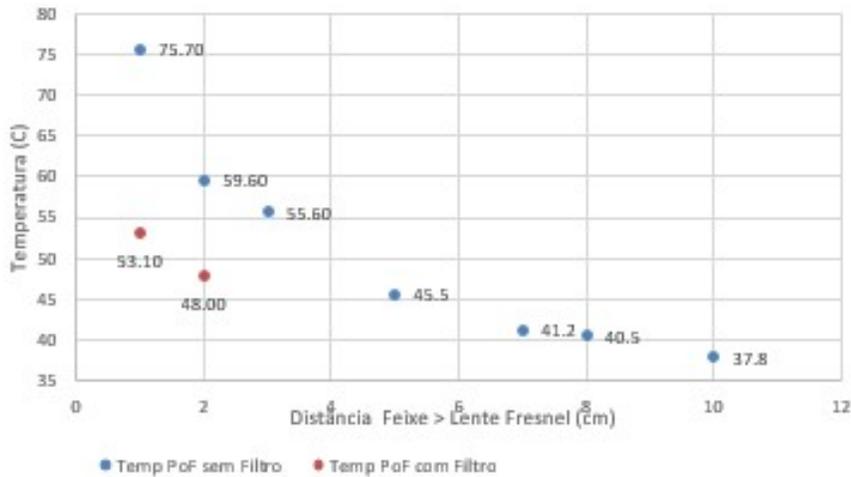


Figura 3.32 - Valores de temperatura em feixe de POF sem/com uso de Filtro IR.

Nos próximos ensaios foram aplicadas lâminas de vidro de diversas espessuras. Como nos casos anteriores, foram colocadas em um suporte de alumínio em contato feixe

de fibras. Pode se observar que quanto maior è a espessura do vidro a redução da temperatura é menor no feixe de fibras.

As Tabela 3.9, Tabela 3.10 e Tabela 3.11, apresentam as medições com vidro de espessuras: 0.5 cm, 1 cm e 2 cm, respectivamente. A Figura 3.33, Figura 3.34 e Figura 3.35 apresentam os gráficos das tabelas citadas.

Tabela 3.9 – Medidas de temperatura com vidro de espessura de 0.5 cm.

Hora das Medidas	Iluminância [klx]	Área Iluminada [m ²]	Altura Lente > Feixe [cm]	Concentração Solar	Temp Ambiente	Temp Fibra POF	Fluxo Luminoso [lm/Fibra]
13:29	105	0.00785	35	20.25	32	40	6.68
13:38	104	0.00709	37	22.44	32	41.1	7.33
13:44	103	0.00442	38	36.00	32	44	11.65
13:54	104	0.00283	40	56.25	32	46	18.38
14:01	103	0.00238	42	66.94	32	51.70	21.66
14:09	102	0.00159	43	100.00	32	55.00	32.04
14:15	101	0.00031	44	506.25	32	63.00	160.63

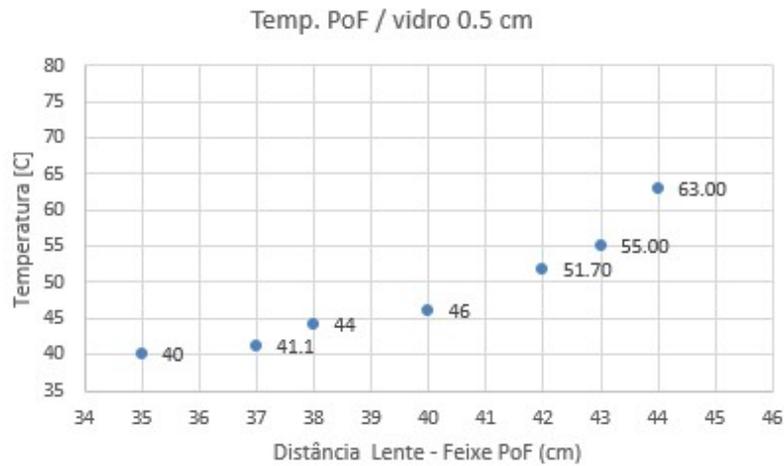


Figura 3.33 – Ensaio de temperatura em relação à distância lente Fresnel e feixe POF, para vidro de espessura 0.5 cm.

Tabela 3.10 - Medidas de temperatura com vidro de espessura 1 cm.

Hora das Medidas	Iluminância [klx]	Área Iluminada [m ²]	Altura Lente > Feixe [cm]	Concentração Solar	Temp Ambiente	Temp Fibra POF	Temp Vidro	Fluxo Luminoso [lm/Fibra]
12:13	105	0.00785	35	20.25	32	37.3	38.70	6.68
12:22	104	0.00709	37	22.44	32	42.6	45.80	7.33
12:28	103	0.00442	38	36.00	32	46.6	50.30	11.65
12:36	107	0.00283	40	56.25	32	47.8	50.80	18.91
12:45	108	0.00238	42	66.94	32	53.50	57.30	22.71
12:54	107	0.00159	43	100.00	32	59.90	55.30	33.62
13:03	108	0.00031	44	506.25	32	63.00		171.77
13:10	108	0.00008	45	2025.00	32	80.00		687.07

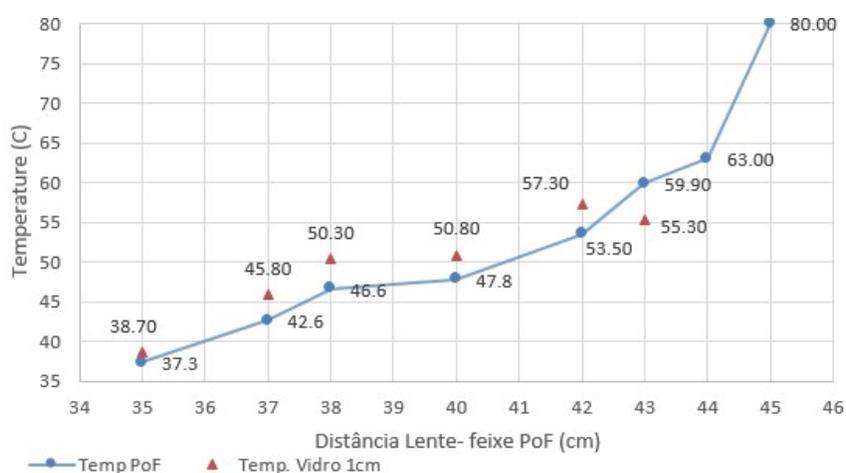


Figura 3.34 - Ensaios de temperatura em relação à distância lente Fresnel e feixe POF, vidro de espessura 1 cm.

Tabela 3.11 – Medidas de temperatura com vidro de espessura 2 cm.

Hora das Medidas	Iluminância [klx]	Área Iluminada [m ²]	Altura Lente > Feixe [cm]	Concentração Solar	Temp Ambiente	Temp Fibra POF	Temp Vidro	Fluxo Luminoso [lm/Fibra]
13:05	108	0.00442	35	36.00	30	38.7	39.00	12.21
13:11	108	0.00283	38	56.25	30	41.5	44.00	19.09
13:18	108	0.00238	42	66.94	30	47.6	52.00	22.71
13:26	108	0.00031	44	506.25	30	60.3	67.00	171.77

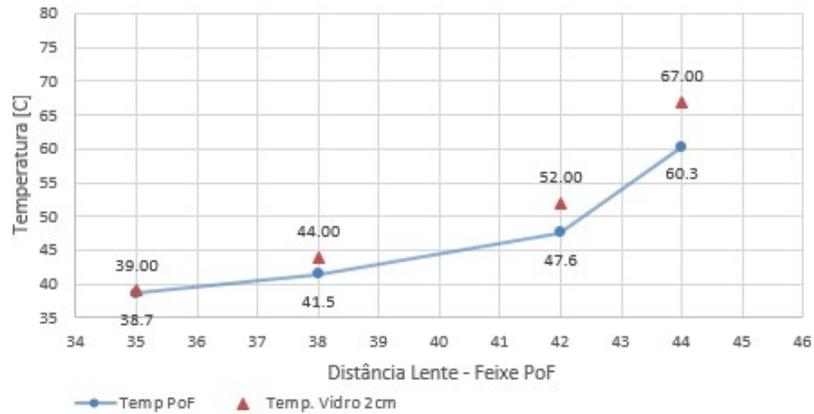


Figura 3.35 - Ensaio temperatura em relação à distância lente Fresnel e feixe POF, do vidro de espessura 2 cm e fibra POF.

A Tabela 3.12 apresenta as medidas de temperatura no feixe de POF com o uso de: um filtro óptico de infravermelho e a combinação do filtro IR + vidro de espessura de 1 cm.

Tabela 3.12 - Medidas com espelho Hot com incidência 0°.

Hora das Medidas	Iluminação [klx]	Área Iluminada [m²]	Altura Lente > Feixe [cm]	Concentração Solar	Temp Ambient	Temp Fibras POF	Temp Filtro IR	Temp Vidro + Filtro IR	Fluxo Luminoso [lm/Fibra]
11:40	108	0.00785	35	20.25	30	36.00	37.50		6.87
11:46	108	0.00442	38	36.00	29.9	42.20	40.30		12.21
11:54	108	0.00283	40	56.25	30	48.00	42.40		19.09
12:00	109	0.00238	42	66.94	30	56.00	43.00		22.92
12:08	108	0.00159	43	100.00	30	65.40	40.50		33.93
12:18	108	0.00159	43	100.00	30	55.00		72.00	33.93
12:31	108	0.00031	44	506.25	30	58.80		78.60	171.77
12:42	108	0.00008	45	2025.00	30	73.00		93.00	687.07

A Figura 3.36 mostra um gráfico comparando:

Temperatura POF com filtro IR

Temperatura POF com filtro IR + vidro 1 cm

Temperatura no Filtro IR

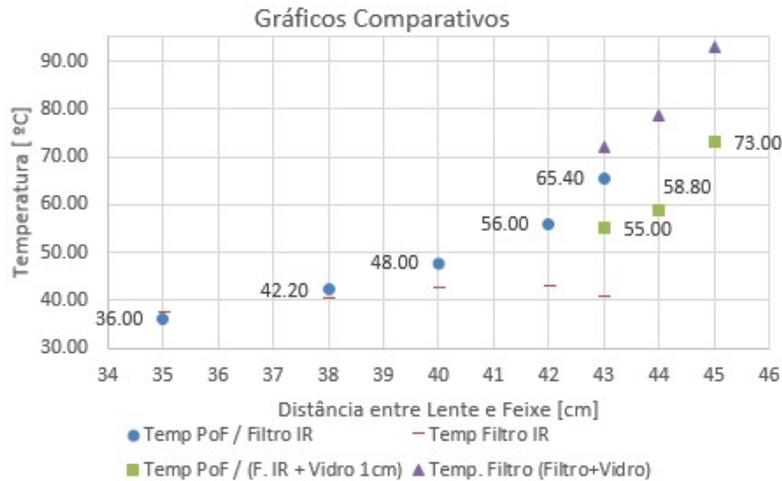


Figura 3.36 - Ensaios de temperatura em relação à distância lente de Fresnel e feixe POFs, para vários casos.

Foram realizados ensaios com o filtro IR em conjunto com um vidro de 1cm de espessura. Podemos observar que as temperaturas usando a combinação do filtro de IR e a lâmina de vidro, a redução foi maior quando se utiliza só o filtro IR. Além disso foi observado que a intensidade luminosa no feixe de fibras é menor do que só o filtro IR.

Portanto, evidenciou-se a necessidade do uso de um filtro IR como uma solução para resolver o problema de aquecimento das fibras e assim aproveitar a concentração máxima da intensidade óptica na distância focal de 46 cm e garantir a intensidade luminosa óptica adequada das microalgas no interior do PBR, segundo mencionado por [90] vêm ser 80 e 120 $\mu\text{mol.fótons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

3.5 Monitoramento de crescimento das microalgas nos protótipos propostos

Os trabalhos realizados e apresentados neste item foram: o processo de cultivo e inóculo de microalgas e processo de controle de crescimento, onde entre eles estão a Densidade celular (contagem celular) e o peso seco.

3.5.1 Processo de Cultivo e inóculo de microalgas

Nesta etapa é descrita a parte do cultivo e inóculo da espécie ou cepa de microalga a utilizar *Monoraphidium* sp. (MORF-1), de excelência linhagem promissora na produção de lipídios, para a produção de biodiesel. Esta cepa foi previamente cultivada em Erlenmeyer de 1 litro e posteriormente, em um garrafão de 20 litros que contém um meio de cultura ASM-1 [66].

Este processo foi realizado em bancada de laboratório com um fluxo de ar atmosférico de 4 L/min, mantendo um pH = 8 e iluminado com luz artificial fluorescente, até atingir uma quantidade de microrganismos da ordem de 5×10^6 cel/mL e posteriormente, inoculadas nos PBRs, como é mostrado na Figura 3.37.



Figura 3.37 - Processo de cultivo e inóculo de microalgas.

A composição do meio de cultivo em grama por litro (g/L) e o pH para cada solução estoque utilizada no preparo do meio para o cultivo nos fotobiorreatores são apresentadas na

Tabela 3.13. Estas soluções foram adicionadas em um garrafão de 20 L avolumando com água tratada em sistema MilliQ® registrado pela Millipore Corporation.

Tabela 3.13 - Composição e concentração das soluções de estoque do meio ASM-1.

Solução A, pH 4	Quantidade (g/L)
NaNO ₃	8,50
MgCl ₂ .6H ₂ O	2,05
CaCl ₂ .2H ₂ O	1,45
MgSO ₄ .7H ₂ O	2,45
Solução B, pH 6,5	Quantidade (g/L)
KH ₂ PO ₄	8,70
Na ₂ HPO ₄ .2H ₂ O	17,78
Solução C, pH 2	Quantidade (g/L)
FeCl ₃	6,50
CuCl	0,014
MnCl ₂ .4H ₂ O	13,90
H ₃ BO ₃	24,80
CoCl ₂ .6H ₂ O	0,19
ZnCl ₂	3,35
Solução D, pH 2	Quantidade (g/L)
Na ₂ EDTA.2H ₂ O	20,60

3.5.2 Processo de controle de crescimento do cultivo

O processo de controle de crescimento do cultivo de microalgas foi realizado através das medidas de peso seco e densidade celular.

As metodologias de monitoramento do crescimento das microalgas, que serão descritas a seguir:

3.5.2.1 Densidade Celular

Uma das metodologias para saber a quantidade de células (ou densidade celular, cel/mL) é aplicada a partir da coleta diária durante os cultivos realizados por contagem direta em um microscópio óptico (**modelo Olympus SC30**), com um aumento de 40 vezes. A densidade celular (cel/mL) foi expressa em número de células por mililitro de cultivo.

Durante o cultivo das microalgas, cerca de 50 mL de volume de amostra foram coletados, nos ensaios. A processo de avolumar e coleta de cultivo de *Monoraphidium* sp. sob POFs foram feitas no período da manhã, para efeitos comparativos principalmente no teor de massa seca entre as amostras. A partir das amostras coletadas, foram separados cerca de 2 mL em microtubo e esse foi agitado em agitador Vortex, sendo a cultura imediatamente analisada em câmara de Fuhs Rosenthal com auxílio de uma placa fina de vidro acima da câmara, para garantir o volume avaliado. Os dados de contagem celular eram obtidos em células de microalgas, por mL de cultura analisado. A taxa específica de crescimento (μ) foi obtida a partir da relação da equação 4.1, onde $\ln X_f$ e $\ln X_i$ é o logaritmo natural do crescimento celular ao término e início do cultivo nos respectivos tempos final e inicial, t_f e t_i , que nesse trabalho será considerado o período de cultivo.

$$\mu = (\ln X_f - \ln X_i) / (t_f - t_i) \quad (3.16)$$

3.5.2.2 Peso Seco

O peso seco é uma das metodologias de monitoramento do crescimento das microalgas que vem sendo adotada pelo CENPES/PETROBRAS (2013). Para isso, deve ser realizada a separação mecânica das microalgas presentes, como parte do substrato do meio de cultivo. Esta metodologia é aplicada para três membranas por dia (triplicata) para obter maior precisão do composto a ser medido, e conseqüentemente elaborar gráficos

em função do tempo (dia) no período do cultivo. A seguir, estão descritas as etapas deste procedimento.

Preparo de membranas

As membranas de vidro foram utilizadas para a floculação ou filtração das amostras do meio de cultivo, para evitar a degradação, devido às elevadas temperaturas dos fornos. As membranas foram colocadas no centro do suporte de filtração Kitassato (Funil Buchner de membrana de Filtração), para posteriormente serem lavadas com água destilada (15 mL), secas por uma mufla a 575 °C por 1h. Em seguida são pesadas em uma balança digital.

Depois de serem pesadas as membranas, transfere-se 15 mL de substrato do cultivo para cada membrana (com ajuda de uma pipeta de 5 mL) e filtra-se com ajuda de uma bomba de vácuo. Posteriormente, se procede com a lavagem das membranas com 15 mL de água isotônica (solução de NH_4HCO_3), com o objetivo de eliminar resíduos orgânicos. Posteriormente, a membrana deve ser retirada e colocada para secar em estufa a 60°C por 1h.

Após retirada a membrana da estufa, imediatamente, coloca-se em dessecador para que a temperatura ambiente seja atingida. Em seguida, as membranas são pesadas, como é mostrada na Figura 3.38.

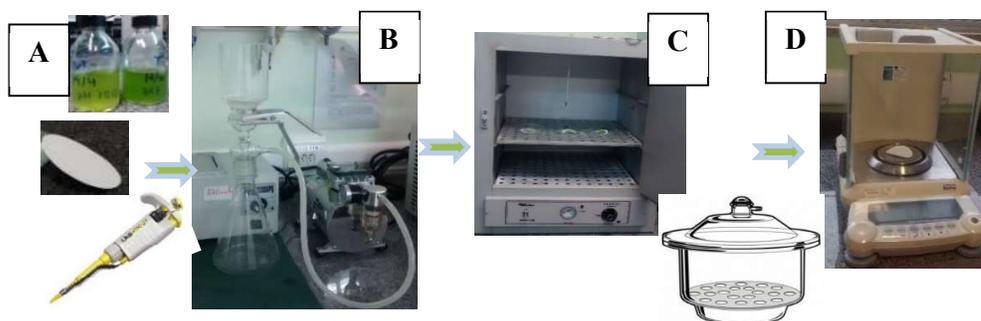


Figura 3.38 - Esquema do processo para a obtenção do peso seco como estimativa do crescimento a) amostras do substrato do cultivo – membranas de vidro b) Preparação de membranas e filtração de amostras c) Estufa e dessecador d) Balança digital.

Para calcular o peso seco (g/L), foram coletadas amostras uma vez ao dia para cada sistema no período do cultivo, usando três membranas, onde deve-se subtrair o valor do peso final da membrana com as microalgas (P_f) do peso inicial da membrana (P_i), e

realizar as devidas conversões, considerando o volume filtrado de microalgas, conforme os cálculos exemplificados a seguir.

Tabela 3.14 - Exemplificação do cálculo para determinação do peso seco da triplicata / dia.

Membranas	Filtrados	P_i (g)	P_f (g)	$P_f - P_i$ (g)	Biomassa (g.L ⁻¹)	Biomassa peso seco Média (g/L)
T1	15ml	0,1259	0,1262	0,0003	0,0200	0,02444
T2	15ml	0,1261	0,1266	0,0005	0,0333	
T3	15ml	0,1249	0,1252	0,0003	0,0200	

Cálculos:

Membrana T1 (Volume filtrado = 15 ml)

* Peso inicial membrana (P_i) = 0,1259 g

* Peso final membrana (P_f) = 0,1262 g

$$P_f - P_i \Rightarrow (0,1262) - (0,1259) = 0,0003 \text{ g}$$

$$0,0003\text{g} \quad \frac{\quad}{15 \text{ mL}}$$

$$\times \quad \frac{\quad}{1000 \text{ ml}}$$

$$X = 0,02 \text{ g.L}^{-1} \text{ (Biomassa g.L}^{-1}\text{)}$$

3.5.3 Avaliação da biomassa produzida

No final do cultivo o volume retirado do cultivo de biomassa foi centrifugado, a biomassa lavada com água destilada para remoção do sal adsorvido às células e seca com ventilação a 55 °C por 12 horas, após desta separação foi avaliada o teor lipídico e proteína na biomassa.

A fração do teor lipídico juntamente com alguns solventes dá como resultado a reunião de ácidos graxos, triglicerídeos, fosfolipídios, esteróides e hidrocarbonetos, sendo chamados de fração lipídica total [95].

Os lipídios produzidos pelas microalgas podem ser classificados em polares e neutros, onde são encontrados componentes de membranas. Estes são utilizados nas reações de esterificação para a produção de alquil ésteres de ácidos graxos. A composição de ácidos graxos na biomassa pode diferir significativamente dependendo das fases de

crescimento, além disso, as concentrações podem mudar com variações na concentração de nutrientes, temperatura, salinidade, pH e intensidade de luz.

Foram determinados os seguintes teores nos quais foram implementados as seguintes metodologias tais como:

Teor de lipídios convertíveis em biodiesel (LCB): pelo método de SchmidBonzynski-Ratzlaff (modificado) (IDF, 1986); teor de carboidratos: segundo o método descrito por Myklestad e Haug (1972) e teor de proteínas totais: pelo método de Kjeldahl clássico modificado A.O.A.C, (1995). Identifica-se também o perfil dos ácidos graxos presentes na fração lipídica utilizando cromatografia gasosa.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Cultivo de microalgas com sistema de iluminação baseada em: rastreamento solar, concentração solar no feixe de POF e PBR não transparente de polipropileno (30L)

Nesta capítulo será mostrado o resultado do cultivo de microalgas e sua respectiva análise de biomassa, através da montagem dos PBRs implementados nos ensaios de cultivos de microalgas, realizando a comparação do crescimento de biomassa por meio dos fotobiorreatores: fotobiorreator transparente – convencional (PBR-Janela) e o fotobiorreator não transparente - inovador (PBR-POF).

O PBR do tipo janela com capacidade volumétrica de 90 L, desenvolvido no laboratório do *Greentec*, o qual será comparado com o PBR inovador de 30 L, utilizando material não transparente que permite diminuir custos. Ambos os sistemas utilizam a luz solar como fonte de energia para a produção da fotossíntese.

Na Figura 4.1A, é mostrado o PBR-Janela construído com lâminas de policarbonato com espessura de 6 mm para suportar a degradação do material por causa da luz infravermelha do espectro solar. As dimensões deste PBR são: largura 110 cm, espessura 11,5 cm e altura 76 cm. São sistema de alto custo de manutenção e implementação de sistemas de controle de temperatura que geram elevado consumo de energia.

Por outro lado na Figura 4.1B, o PBR-POF, sistema inovador aqui proposto utiliza PBR plástico de polipropileno e como suporte e fixação das POFs, um acrílico transparente para facilitar a transmissão da luz no interior do PBR. As dimensões deste PBR são: diâmetro menor 29 cm, altura 40,7 cm e diâmetro maior 36 cm . Este sistema não necessita de sistema de refrigeração como no sistema de PBR Convencional.

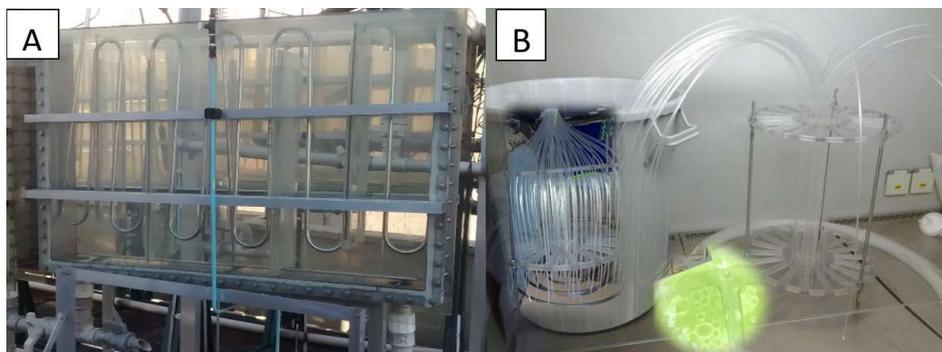


Figura 4.1 - Sistemas de cultivo implementados (a) PBR Janela (Convencional), (b) PBR-POF (inovador).

Os sistemas de cultivo, foram instalados em conjunto com o Rastreador solar no terraço do prédio da Escola de Química, no Laboratório de Tecnologia Verde – GreenTec, no Centro Tecnológico dentro do campus da Universidade Federal de Rio de Janeiro, como é mostrado na Figura 4.2.

Uma vez tendo sido concluída a montagem do sistema de iluminação, é importante que o rastreador solar esteja alinhado com a direção Norte-Sul, sabendo que o percurso do sol é de Leste-Oeste. Com isso, podemos apresentar uma limitação, pois existe um sombreamento nas primeiras horas do nascer do dia, causado pela presença do prédio do anexo Bloco I, que é maior e fica bem próximo ao local do processo de cultivo, como é mostrado na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Área destinada para o comissionamento dos dispositivos: 1) Rastreador solar; 2) PBR inovador 3) PBR de janela – convencional.

Na Figura 4.2, pode-se observar a localização onde estão instalados o sistema de iluminação e os sistema de cultivo, sendo identificados pela numeração: 1) o rastreador solar, instalado no terraço do prédio EQ –GreenTec do CT/UFRJ, situado um andar acima do nível onde foram realizados os sistemas de cultivo PBR-POE e PBR-Janela. A área onde foi instalado o rastreador é de 16 m². 2) O primeiro sistema de cultivo, denominado de Cultivo de janela – convencional (PBR-Janela), já existente, que pertence ao Laboratório de Tecnologia Verde, está localizado no mesmo terraço, entretanto em outro nível, como pode ser observado, na Figura 4.2. Este sistema consiste de três módulos paralelos de dez fotobiorreatores em série. Contudo, somente foi utilizado um PBR. 3) O segundo sistema de cultivo, denominado de Cultivo inovador PBR-POF, foi instalado no mesmo nível do terraço, onde se encontra o Cultivo de janela. Este PBR foi instalado sob um telhado, visando evitar o contato direto do Sol, mesmo sendo revestido o PBR com material isopor em forma aerossol (*spray*). Este cultivo foi iluminado por um feixe de 128 POFs com 8 metros de comprimento.

4.2 Resultados dos Cultivos

Neste item se apresenta a análise do desenvolvimento do crescimento para cada PBR mostrados nos gráficos abaixo. Sendo o PBR-Janela com capacidade volumétrica de 90 L e o PBR-POF com volume de 30 L. Estes dados de radiação PAR foram registrados através de um medidor de irradiação fotossinteticamente ativa PAR (QSL-2100 – Biospherical Instrumente Inc.) e coletados quatro vezes ao dia, por volta das 8:00, 11:00, 14:00 e 16:00 hrs.

A Figura 4.3, apresenta as medições da radiação PAR nos dois fotobiorreatores a realizar a comparação do cultivo de biomassa algal. Estes testes foram realizados em dias direntes no período da manhã observando que no PBR-POF inovador os valores de radiação se mantiveram constantes até as 15:00 hrs onde a partir desse horário os valores experimentam uma queda rápida daí para frente até 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{fótons}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ e no PBR-Janela os valores de radiação obtidos foram constantes em comparação com o PBR-POF que teve uma queda brusca, mesmo apresentando várias sombras no cultivo, por prédios e estruturas próximas a ele.

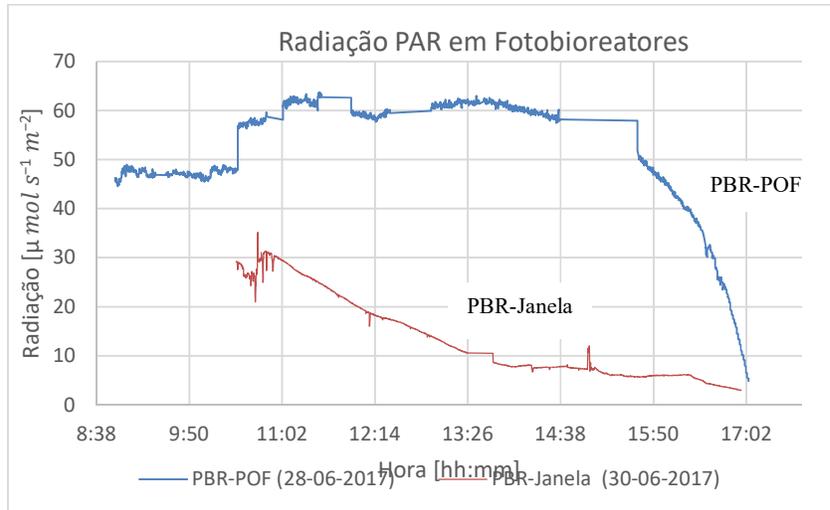


Figura 4.3 - Curva de radiação PAR no PBR-POF e PBR-Janela.

4.2.1 Resultados em Cultivo 1

Os ensaios do Cultivo 1 foram realizados por um período de 19 dias entre os dias 3-21/abril/2017, onde foram coletadas amostras de cultivo a cada dia, tanto do PBR-POF, e do PBR-Janela, para análise, acompanhamento do crescimento do cultivo e o estudo da intensidade luminosa (valor médio da radiação PAR por cada dia) como pode ser observado na Figura 4.4.

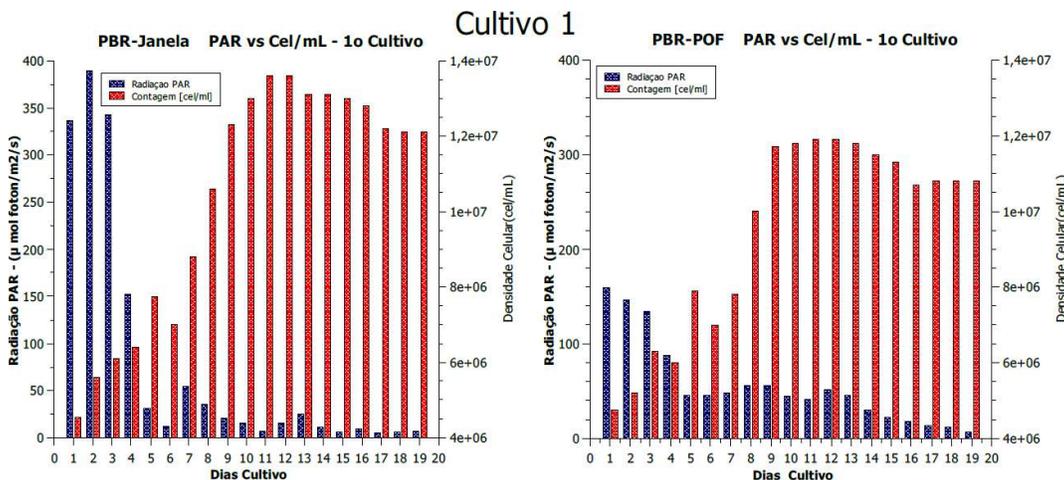


Figura 4.4 - Comparativo: Radiação PAR e Densidade celular no Cultivo 1.

As medidas de radiação PAR foram realizadas com medidor PAR por duas vezes ao dia as 8:00 e as 14:00 hrs, resultando a medida de cada PBR. As medidas de radiação solar foram realizadas no período do dia, através de um piranômetro.

Podemos verificar na Figura 4.4 os valores medidos da radiação PAR na fase inicial do cultivo no PBR-Janela foram maiores ($380 \mu\text{mol}\cdot\text{fótons}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) do que o PBR-POF inovador iluminado por POF (cerca de $160 \mu\text{mol}\cdot\text{fótons}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), além de ter produzido maior densidade celular. Entretanto, apresentaram sedimentação das células na superfície do PBR, ocorrendo uma diminuição na quantidade de luz no interior do cultivo. Contudo, a radiação PAR na etapa final do ensaio do PBR-Janela foi menor e para o PBR-POF foi constante.

Isto é justificado, por que no PBR-Janela a radiação PAR diminui, conforme o cultivo de microalgas aumenta. Enquanto, que no PBR-POF o valor é mantido constante devido à os microrganismos aderirem nas ranhuras da POF e a pobre distribuição da iluminação no interior do PBR e parte deste iluminação é distribuída só para o fundo.

Na Figura 4.5 é mostrada as medidas comparativas para o estudo diário tanto da radiação solar W/m^2 como também para a radiação fotossinteticamente ativa PAR de cada PBR, juntamente com a radiação solar.

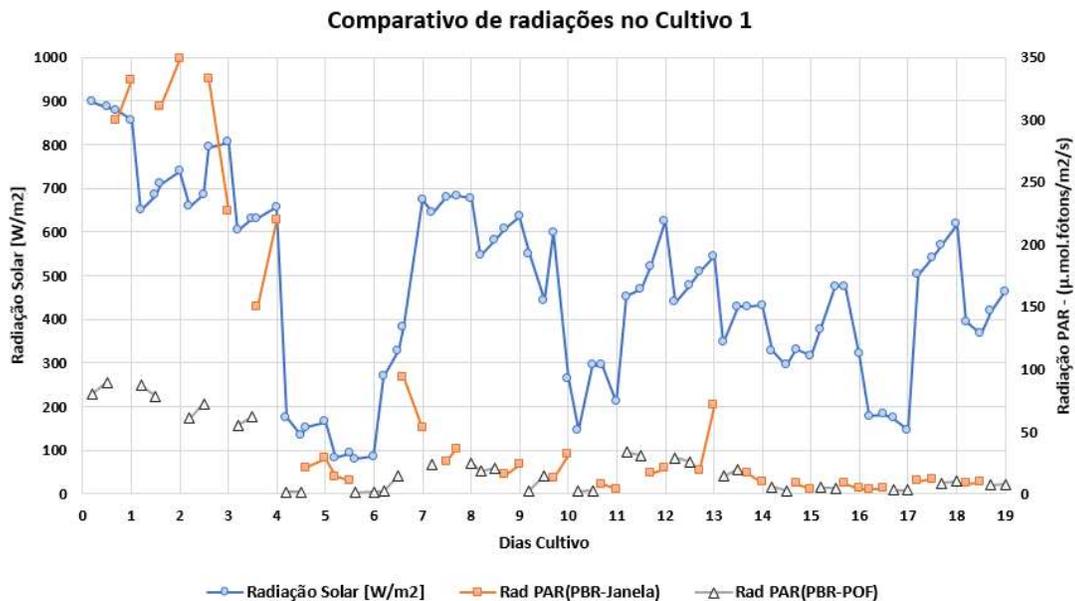


Figura 4.5 – Curvas comparativas Cultivo 1: Radiação solar e Radiação PAR em PBRs.

Neste experimento identificou-se algumas deficiências nas ranhuras das fibras, onde as POFs ficaram fragilizadas depois da exposição ao Laser de CO₂. Conseqüentemente, as POFs quebraram com a ação forte da aeração no interior do PBR e o resultado de uma elevada curvatura as fibra, formada entre o primeiro disco de fixação de fibras e o buraco de acesso das fibras para o interior do PBR, localizado na tampa do PBR, como resultado de isto, as fibras não foram fixadas nos dois níveis de iluminação, só permitindo instalar na parte baixa do PBR.

Devido estas deficiências e ao pequeno comprimento de ranhuras nas fibras, o crescimento das microalgas no sistema PBR-POF foi inferior comparado com o PBR-Janela.

Baseado nas deficiências identificadas e descritas, foram feitas algumas modificações no sistema de cultivo PBR-POF, com o objetivo de atingir a meta de igualar ou superar a produção de biomassa do PBR-Janela.

4.2.2 Resultados em Cultivo 2

Na Figura 4.6 é ilustrada os resultados de crescimento de microalgas e a densidade celular no Cultivo 2, realizados entre os dias 19/06/2017 – 07/06/2017, utilizando uma iluminação interna pontual no PBR-POF.

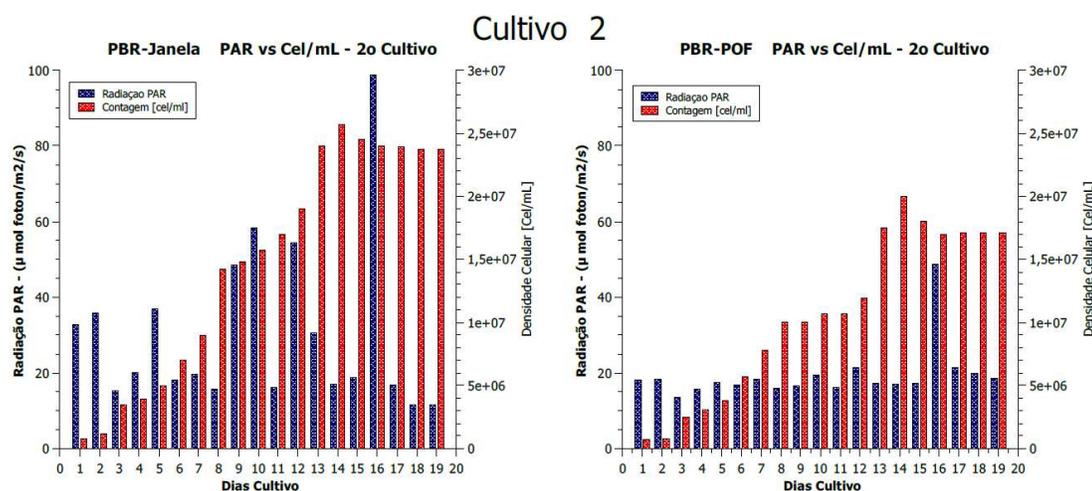


Figura 4.6 – Comparativo: Radiação PAR e Densidade celular no Cultivo 2.

Neste experimento temos o objetivo de comparar a densidade celular obtida nos PBR-POF do Cultivo 2 e Cultivo 1.

Observou-se maior produção de biomassa que no Cultivo 1. No Cultivo 1 foi obtida densidade celular de 1.2×10^7 Cel/mL e no Cultivo 2 o valor de 2×10^7 Cel/mL. Justificando o sistema de iluminação adotado. Neste experimento constatou-se a integridade das fibras ao final do cultivo, devido a ausência de ranhuras e exposição ao Laser de CO₂. No entanto, a concentração de biomassa continua inferior e deficiente no PBR-POF, em comparação ao PBR-Janela, neste Cultivo 2.

Isto pode ser justificado com a impossibilidade do sistema radiação solar no captar radiação nos dias nublados ou chuvosos em que ocorrem neste período de cultivo, como pode se observar na Figura 4.7. Podendo destacar, o 12º ao 13º dia alcançou cerca de 50 W/m^2 e o 14º dia onde a radiação solar alcançou cerca de 700 W/m^2 Ou seja, quando os raios do sol não incidem diretamente na lente, devido à interferência das nuvens, não permitindo que a luz do sol chegue no interior do tanque de cultivo e este fica totalmente escuro, dificultando-se o processo de fotossíntese e reduzindo-se a produção de biomassa.

A partir desta experiência, realizaram-se determinadas modificações no protótipo proposto, realizando algumas alterações na melhoria da homogeneização da iluminação interna e otimizar o sistema nos dias nublados. Porém, sempre visando igualar ou superar a produção de biomassa do PBR-Janela.

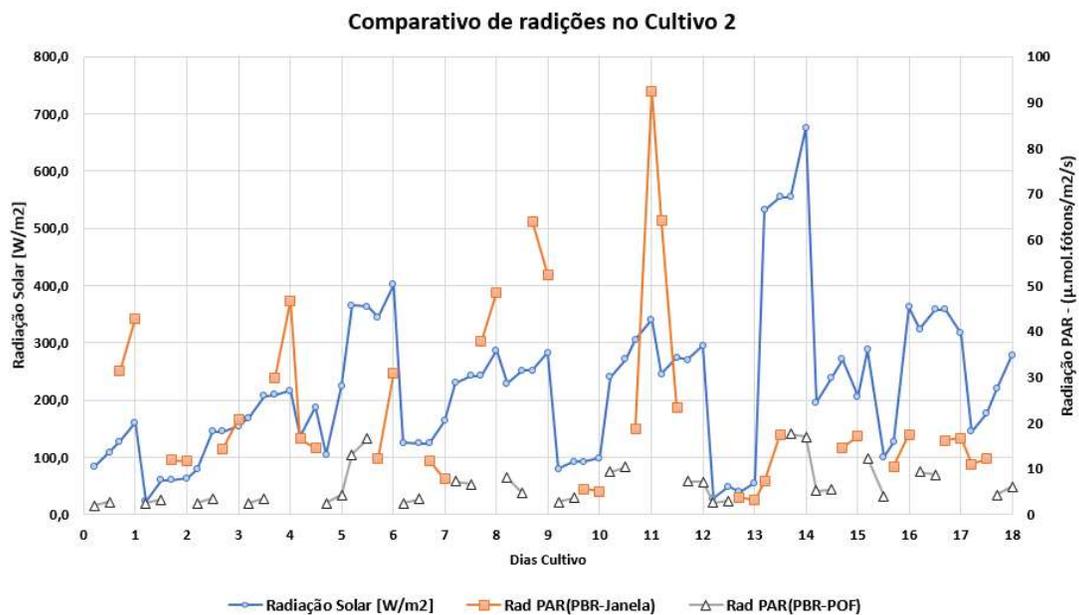


Figura 4.7 : Curvas comparativas cultivo 2: Radiação solar e Radiação PAR em PBRs.

4.2.1 Resultados em Cultivo 3

Na Figura 4.8 é ilustrada os resultados de crescimento de microalgas e a densidade celular no Cultivo 3, realizados entre os dias 20/11/2017 – 08/12/2017, utilizando uma iluminação interna pontual no PBR-POF.

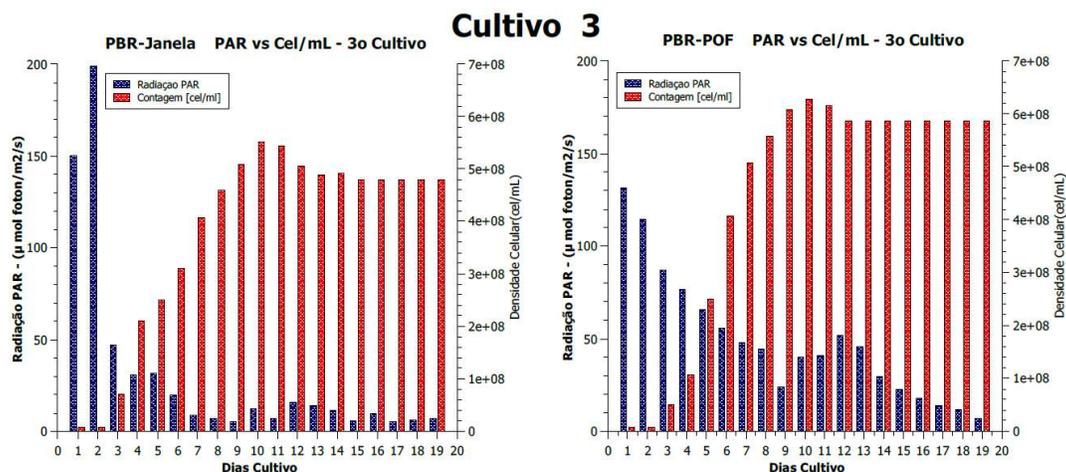


Figura 4.8 - Comparativo: Radiação PAR e Densidade celular no Cultivo 3.

Podemos observar que é comum nos primeiros dias de cultivo se obter elevada radiação PAR, como podemos confirmar nos gráficos da Figura 4.8. Observando que a produção de biomassa no PBR-POF neste cultivo foi de cerca de $6,3 \times 10^8$ Cel/mL, sendo superior a produção de 2×10^7 Cel/mL no Cultivo 2.

No entanto, nas novas condições de iluminação de cultivo, a concentração celular no PBR-POF foi $6,3 \times 10^8$ Cel/mL e no PBR-Janela $5,5 \times 10^8$ Cel/mL, ou seja, foi observado um aumento da concentração celular com o PBR-POF comparado com o PBR-Janela.

Este resultado foi alcançado a partir do quinto dia de cultivo e está relacionado com a distribuição interna e homogênea da luz em ambos os sistemas, além da aplicação de LED neste cultivo.

Na Figura 4.9 é mostrada as medidas comparativas para o estudo diário tanto da radiação solar W/m2 como também para a radiação fotossinteticamente ativa PAR de cada PBR, juntamente com a radiação solar.

Durante o dia do cultivo realizaram-se medidas de radiação por dia, usando um medidor PAR para a radiação PAR e coletados quatro vezes ao dia, por volta das 8:00, 11:00, 14:00 e 16:00 hrs, comparadas com a radiação solar, onde foi usado um piranômetro para a medição de radiação Wm^{-2} no dia todo.

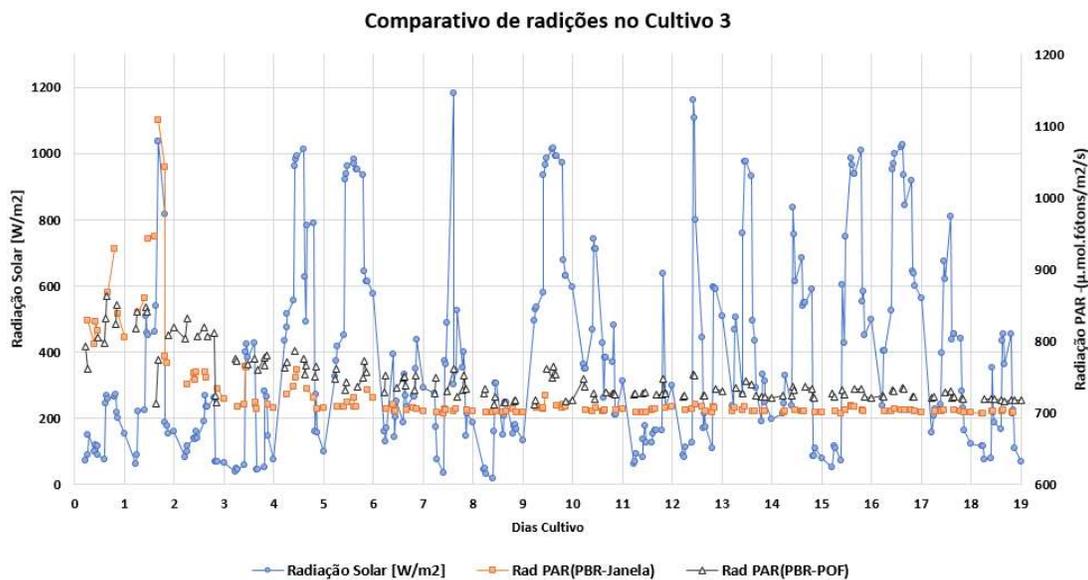


Figura 4.9 - Curvas comparativas cultivo 3: Radiação solar e Radiação PAR em PBRs.

A Figura 4.10 apresenta a comparação entre os sistemas de sistemas de iluminação dos Cultivos 2 e 3 quanto a produção de biomassa no PBR-Janela, PBR-POF e a radiação PAR, como também apresenta a radiação solar media por dia nos dois cultivos. Em ambos os gráficos, mostram as médias diárias da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) como pode-se observar nos gráficos da parte superior. Os gráficos de baixo apresentam a radiação solar externa medida por um piranômetro.

A Figura 4.10 a) mostra que o PBR-Janela produz maior densidade celular ($2,5 \times 10^7$ cel/mL) que o PBR-POF (2×10^7 cel/mL). Podemos notar, que a média da medida da radiação PAR dentro do PBR-POF foi muito baixa, enquanto que no PBR-Janela apresentou elevada iluminação. Isto se justifica, pelo fato que houveram muitos dias nublados durante o Cultivo 2. Com isso, afetando o cultivo no PBR-POF. Este fato, pode ser comprovado na Figura 4.10c), onde é amostrada a radiação solar média.

A Figura 4.10b) apresenta um sistema com iluminação solar e com LED no Cultivo 3, onde observamos que a densidade celular no PBR-POF foi mais alta ($6,3 \times 10^8$ cel/mL) que no PBR-Janela ($5,5 \times 10^8$ cel/mL). Podemos notar também que a radiação PAR medida no PBR-POF foi maior que no PBR-Janela, devido do uso de LEDs, compensados nos dias nebulosos. A Figura 4.10d) mostra a radiação solar média no período do Cultivo 3.

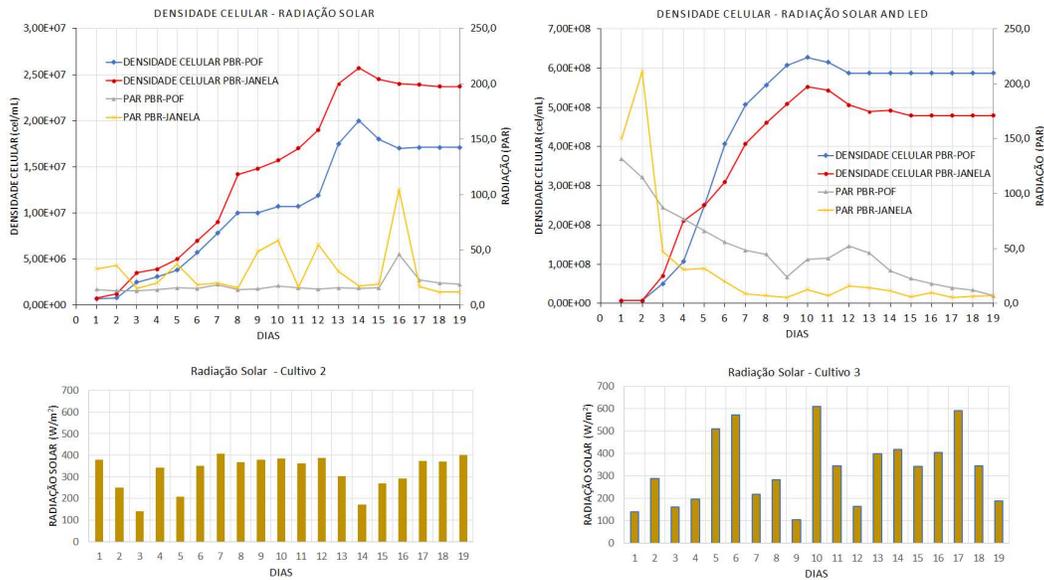


Figura 4.10 – Gráficos comparativos entre Cultivo 2 e 3, de crescimento de biomassa, com irradiação PAR e irradiação solar [96].

Para o primeiro e segundo dia dos cultivos os dias foram poucos ensolarados, com alguns picos rápidos de radiação solar, entretanto a radiação PAR não pode ser vista, uma vez que a medida PAR interna e a medida solar externa foram feitas em tempos diferentes.

As curvas referentes a radiação PAR na Figura 4.10b) mostram a iluminação do Cultivo 3 mais alta que a do Cultivo 2, justificando maior produção em ambos PBRs. Contudo, foi notado também que, mesmo com baixa iluminação solar, neste cultivo o PBR-POF apresentou radiação PAR maior, devido a uso dos LEDs.

A produção de biodiesel requer uma quantidade significativa de biomassa, conteúdo lipídico e ácidos graxos de interesse de cadeia media, constituindo o parâmetro mais direto e preciso para avaliar o potencial de microalgas como um material-prima para a produção de biodiesel. A fim de comparar a eficiência de ambos os cultivos, foi estudado o conteúdo lipídico de cada biomassa usando cromatografia gasosa.

A Figura 4.11 apresenta os Cultivos 2 e 3 com a respectiva com a respectiva distribuição de ácidos graxos. Onde os mais importantes componentes para a produção de biodiesel são os seguintes: ácidos graxos 16:0 (Palmitic), C18:1 (Olic), C18:2 (Linoleic) e C18:3 (Linolenic).

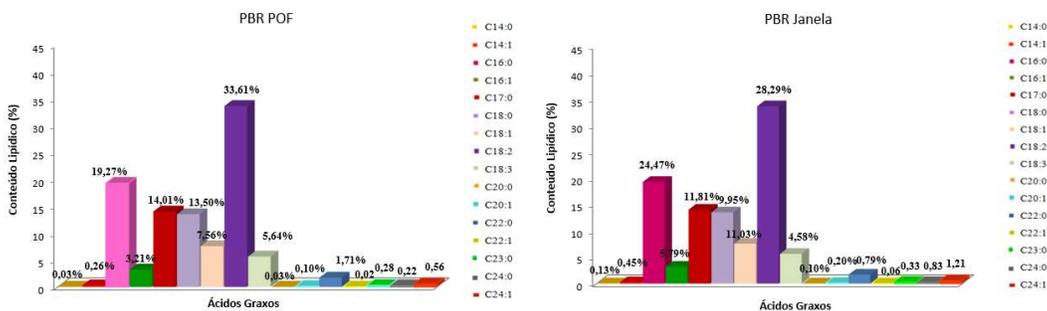


Figura 4.11 – Perfil lipídico de ambos cultivos, adaptado de [96].

Pode-se notar, que os resultados para os dois cultivos foram similares para ambos PBRs, onde nos permite concluir que a radiação solar proveniente do rastreamento solar, concentração solar em POFs pode ser uma boa opção para iluminar os cultivos de microalgas com baixo custo, através de PBR não transparente com adequada produção de biomassa.

Neste contexto, os resultados obtidos em relação ao teor de lipídios para os dois cultivos de biomassa, a partir de microalgas *Monoraphidium sp.*, mostrou potencial para a produção de biocombustível. Adicionalmente, os referidos níveis de LCB (Biocombustível por concentração de lipídios) calculados foram: $30,58 \pm 0,05\%$ para o PBR-POF e $29,88 \pm 0,22$ para o PBR-Janela, considerados ideais para a produção de biocombustível.

Finalmente, a Tabela 4.1 apresenta-se o valor médio dos resultados obtidos com os sistemas de iluminação de PBR com POF dos três cultivos.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos nos sistema de iluminação de PBR com POFs.

Amostras	Exerimentos	Resultados
1º Cultivo sob POF iluminação com ranhuras	PAR média ($\mu\text{.mol.fótons.m}^{-2}\text{.s}^{-1}$)	752,29
	Contagem Celular (Cel/mL)	$1,08 \times 10^7$
2º Cultivo sob POF Espelho + iluminação sem ranhuras	PAR média ($\mu\text{.mol.fótons.m}^{-2}\text{.s}^{-1}$)	713,57
	Contagem Celular (Cel/mL)	$1,71 \times 10^7$
3º Cultivo sob POF POF Espelho + LED e iluminação sem ranhuras	PAR média ($\mu\text{.mol.fótons.m}^{-2}\text{.s}^{-1}$)	745,07
	Contagem Celular (Cel/mL)	$5,87 \times 10^8$

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

No primeiro cultivo foi observada a fragilidade das fibras no momento da montagem no suporte de iluminação, comprometendo a integridade das POFs no momento da limpeza e preparo para os próximos cultivos.

No segundo cultivo houve uma otimização em relação ao primeiro, podendo citar a aplicação da POF sem ranhuras nas laterais, onde podemos concluir que o sistema de iluminação no PBR-POF teve produção de biomassa similar a produção com PBR-Janela. O sistema de iluminação do PBR-POF apresentou uma limitação relacionada aos dias nublados, em que não foi capaz de produzir iluminação suficiente ao cultivo.

Para contornar este problema, no terceiro cultivo adotou-se o uso de um banco de LEDs super-luminescentes conectados ao feixe de POFs, como alternativa para os dias nublados e com pouca radiação solar, visando compensar a iluminação do PBR nestes dias.

Algumas vantagens devem ser mencionadas, quanto à confecção do PBR-POF-inovador, comparado ao PBR-Janela. Podendo citar: o custo na produção do PBR-POF-inovador é muito menor do que os do PBR-Janela-convencional, pelas seguintes razões: não há necessidade de refrigeração, o que reduz, consideravelmente o consumo de energia elétrica e sem necessidade de policarbonato caro ou outro material transparente para a construção do PBR, com as vantagens adicionais da durabilidade e robustez.

Vale ressaltar uma informação importante observada, referente a integridade das POFs, no que diz respeito a não produção de biofilmes durante o processo dos cultivos. O que dificultaria ou até mesmo poderia impossibilitaria o crescimento celular das microalgas.

Desta forma, podemos concluir que a quantidade de células produzidas em ambos os tipos de PBRs analisados, o PBR-Janela-convencional e o PBR-POF-inovador, com a mesma radiação solar, foi comparável em ordem de magnitude. Com isso, comprovamos que é possível o cultivo de microalgas e consequentemente, a produção de biomassa e seus respectivos conteúdos lipídicos e ácidos graxos de interesse, para a produção de biocombustível em PBR confeccionado de material não transparente, utilizando o sistema

de iluminação desenvolvido baseado em concentração solar por lente de Fresnel e transmissão de energia por um feixe de POFs.

5.2 Trabalhos Futuros

Para tornar o sistema de cultivo de microalgas em PBR-POF superior ao sistema PBR-Janela é proposto os seguintes trabalhos futuros.

- As POF deverão suportar uma maior concentração solar, ou seja, adotar o uso de filtros IR, para temperaturas mais elevadas, e assim obter maiores valores de radiação solar dentro do cultivador.
- Para evitar a sedimentação no espelho o novo sistema de aeração deverá ser modificado, realizando a furação de saída do ar pela parte baixa do sistema de aeração.
- Como uma proposta ao crescimento de cultivo mantendo os parâmetros com os mesmos valores como aeração, distribuição de CO₂ e quantidade de nutrientes, e como único parâmetro variável a iluminação, para isto se propõe um projeto de um sistema de cultivo PBR-POF similar ao PBR-Janela, como mostrado nas figuras Figura 5.1 abaixo.
- Desenvolver algum algoritmo capaz de enviar alguns parâmetros relevantes referentes ao cultivo, para um dispositivo móvel, como celular, visando o monitoramento de dados informação do sistema de cultivo em tempo real.

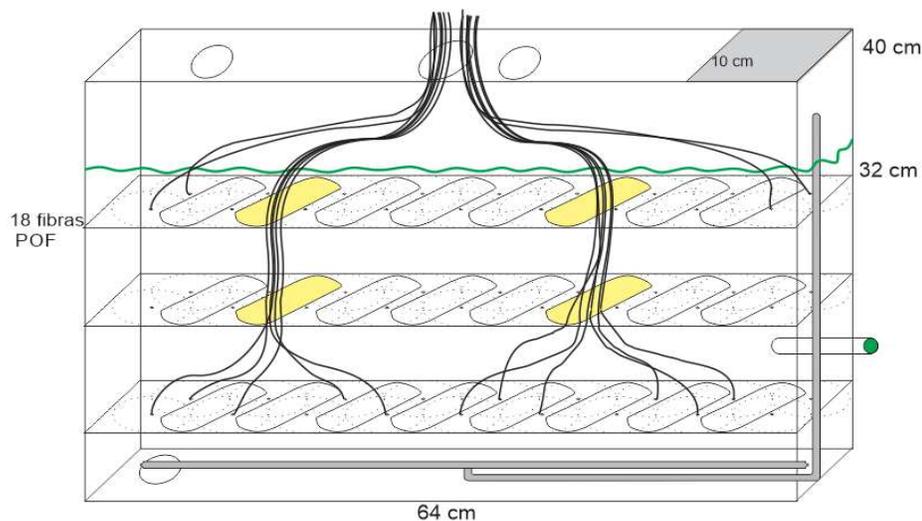


Figura 5.1 – Diagrama esquemático proposta de um PBR-POF futuro.

Capítulo 6

Referências bibliográficas

- [1] ENSO, B.P.; FERNANDO, R.M.; ANDRE, R.G.; RICARDO, R., “Atlas Brasileiro de Energia Solar” 2ª Ed. INPE, Instituto nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.
- [2] SOLARGIS., “Global Horizontal Irradiation and Direct Normal Irradiation”. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>, 2017, Online; acessado 20 de março de 2018.
- [3] WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V, “Atmospheric science: an introductory survey”. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2006.
- [4] IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. “Top Renewable Energy Capacity and Electricity Generation based on Bioenergy Technology”. <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=18>, 2016. Online; acessado 28 de março de 2018.
- [5] BARCELLOS, F.C.; OLIVEIRA, J.C.; CARVALHO, P.G.M., “Investimento ambiental em indústrias sujas e intensivas em recursos naturais e energia”. Rev. Iberoamericana de Economia Ecológica, v. 12, p. 33-50, 2009.
- [6] Introdução à Astronomia. Coordenadas Astronômicas. http://www.virtual.ufc.br/solar/aula_link/SOLAR_2/Curso_de_Graduacao_a_Distancia/LFIS/I_a_P/Introducao_a_Astronomia/aula_03/03.html . Online: acessado 28 março de 2018.
- [7] CHISTI, Y., “Biodiesel from microalgae”. Biotechnology Advances 25: 294-306, 2007.
- [8] Li, Q.; DU, W.; LIU, D., “Perspectives of microbial oils for biodiesel production, Applied Microbiology and Biotechnology”, vol. 80(5);749-756, 2008.
- [9] MEZZOMO, N.; SAGGIORATO, A.G.; SIEBERT, R.; TATSCH, P.O.; LAGO, M.C.; HEMKEMEIER, M.; COSTA, J.A.V.; BERTOLIN, T.E.; COLLA, L.M. “Cultivation of microalgae *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*) from biological treatment of swine wastewater”. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 30, n. 1, p. 173-178, 2010.

- [10] DAL MAGRO, C., HEMKEMEIER, M., COLLA, L.M., “Remoção de cromo VI e DQO de meio de cultivo adicionado de efluente com elevada concentração de cromo a partir da microalga *Spirulina platensis*”. XVIII Simpósio Nacional De Bioprocessos, 2011.
- [11] MORAIS, M.G., COSTA, J.A.V., “Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor”. *Journal of Biotechnology*, v. 129, p. 439 - 445, 2007.
- [12] DORAN, P. M., “Bioprocess Engineering Principles”. 1st Ed. Academic Press Limited, London, Reino Unido. 333-340, 1995.
- [13] MIYAMOTO K., “Renewable biological systems for alternative sustainable energy production”. Food and agriculture organization of united nations FAO, 2012.
- [14] BROWN, R., JEFFREY, S.W., VOLKMAN, J.K., DUNSTAN, G.A., “Nutritional properties of microalgae for mariculture”. *Aquaculture*. Australia, 1997.
- [15] FRAMPTON, M.F., GURNEY, R.H., DUNSTAN, G.A., CLEMENTSON, L.A., TOIFL, M.C., POLLARD, C. B. “Evaluation of growth, nutrient utilization and production of bioproducts by a wastewater-isolated microalga”. *Bioresour. Technol.* 130, 261–268. doi:10.1016/j.biortech.2012.12.001; 2013.
- [16] PIRES J. C. M., ALVIM-FERRAZ M. C., MARTINS F. G., SIMÕES M., “Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: engineering aspects and bio refinery concept”. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* v. 16, p. 3043-3053, (2012).
- [17] LOURENÇO, S.O., CAMPOS V. B., “Cultivo de microalgas marinhas: princípios e aplicações”. 2009.
- [18] RICHMOND, A., “Handbook of microalgae culture: biotechnology and applied phycology”. Book reviews. IN: (Ed).. Oxford: Blackwell Science, 566p. 2004.
- [19] GHORBANI, A., RAHIMPOUR, H. R., GHASEMI, Y., ZOUGHI, S., AND RAHIMPOUR, M. R. “A review of carbon capture and sequestration in Iran: microalgal biofixation potential in Iran”. *Renew. Sust. Energy Rev.* 35, 73–100. doi:10.1016/j.rser. 2014.03.013; 2014.
- [20] VONSHAK, A. *Spirulina platensis* (*Arthrospira*) Physiology, cell-biology and biotechnology. London: Taylor & Francis, 252 p; 1997.

- [21] SILVA, A. F. “Respostas fisiologicas e fotossinteticas da microalga marinha Rhidomonas SP. (cryptophyceae) A variavel de kuz e fontes de carbono.” Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008.
- [22] GONG, Y.; JIANG, M. “Biodiesel Production with Microalgae as Feedstock: from Strains to Biodiesel”. *Biotechnology Letters*, v. 33, p. 1269-1284; 2011
- [23] FALKOWSKI P. G., RAVEN J.A.. “Aquatic Photosynthesis” 2007.
- [24] KASPRZAK, P. KOSCHEI, R., “Chlorophyll a concentration across a trophic gradient of lakes”. *Limnologica* v.38 p. 327-338, 2008.
- [25] VITORIO, C. P., KUSTER, R. M., LAGE, C, L. S.”Qualidade de luz e produção de pigmentos Fotossinteticos em Plantas In vitro de *Phyllanthus tenellus* Roxb”.2007.
- [26] FOYER C.H., HARBINSON J. “Oxygen metabolism and the regulation of photosynthetic electron transport”. In: FOYER,C.H.; MULLINEAUS, P.M.(Eds.). *Causes of Photooxidative Stress and Amelioration of Defense System in Plants*. CRC Press, Boca Raton, FL, p1-42. 1994.
- [27] Disponível em: <https://biogilde.wordpress.com/2009/04/20/pigmentos-fotossinteticos-e-espectro-de-absorcao-luminosa/>. Acesso em 23 de março de 2018.
- [28] HALL, D.O., RAO, K.K.,”Photosynthesis, 6th edition”, Cambridge University Press, U.K.1999
- [29] VASUDEVAN, P.T.;BRIGGS,M. Biodiesel production – current state of the art and challenges. *Jornal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35(5):421-430; 2008.
- [30] PULLERITS, T., AND SUNDSTROM, V. “Photosynthetic light-harvesting pigment-protein complexes: Toward understanding how and why”. *Acc Chem. Res* 29:381-389;1996
- [31] JANSSEN M. “Cultivation of microalgae: effect of light/dark cycles on biomass yield”.Thesis Wageningen University; 2002.
- [32] RAVEN, J, FRS. “Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide”. *The Royal Society Policy Document*, London. Dez/2005.
- [33] JEFFREY M., GORDON., JUERGEN E. W. P. Ultrahigh bioproductivity from algae. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, v. 76, p. 969–975, 2007.

- [34] SCHMIDT, C. J. B.. “Aislamiento, purificación, y mantenimiento de cepas de microalgas”. In: VEGA, B.O.A.; VOLTOLINA, D.. Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal. 1ª Ed. La Paz: Centro de Investigaciones biológicas Del Noroeste (CIBNOR), p 1 – 16, 2007
- [35] KOMMAREDDY, A.R., ANDERSON, G.A. Mechanistic Modeling of Photobioreactor System. Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers. Paper No. 057007; 2005
- [36] SAYEGH, F.A. Q. E MONTAGNES, D. J. S. “Temperature shifts induce intraspecific variation in microalgal production and biochemical composition”. *Bioresource Technology*. 102, 3007–3013; 2011.
- [37] SINOVAS, C.; ALHO, L; BRITO, I. Microbiologia: Textos de apoio e Manual Prático. Departamento de Biologia: Universidade de Évora 2003/2004.
- [38] ADAMS, C. GODFREY, V. WAHLEN, B. SEEFELDT, L. BUGBEE, B. “Understanding precision nitrogen stress to optimize the growth and lipid content tradeoff in oleaginous green microalgae”; 2003.
- [39] HONG-YU, R. BING-FENG, L. CHAO MA. NAN-QI, R. “A new lipid-rich microalga *Scenedesmus* sp. Strain R-16 isolated using Nile red staining: effects of carbon and nitrogen sources and initial pH on the biomass and lipid production”; 2013.
- [40] BARSANTI, L., GUALTIERI, P. “Algae-Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology”. 1st Ed. Taylor e Francis Group. London, England. 209-249; 2006.
- [41] GOUVEIA, L. “Microalgae as a Feedstock for Biofuels”. 1st Ed. Springer, Lisboa, Portugal. 13- 20; 2011.
- [42] MATA, T. M., MARTINS, A. A. E CAETANO, N. S. “Microalgae for biodiesel production and other applications: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 217–232; 2010.
- [43] MAZZUCA SOBCZUK T, GARCÍA CAMACHO F, MOLINA GRIMA E, CHISTI Y. “Effects of agitation on the microalgae *Phaeodactylum tricorutum* and *Porphyridium cruentum*”. *Bioprocess Biosyst Eng* 2006;28: 243–50; 2006.
- [44] ANDERSEN, R.A. *Algal Culturing Techniques*. Elsevier Academic Press. Burlington, USA. 589; 2005

- [45] GROBBELAAR J. U. “Algal Nutrition – Mineral Nutrition. Richmond, A., (Eds). Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology”. Blackwell Science Ltd. Oxford, London, 97-115; 2004.
- [46] RAMIREZ, N. N. V. Estudo do crescimento da microalga *Scenedesmus* sp. em vinhaça. 2013. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- [47] RADMANN, E. M.; COSTA, J. A. V. Conteúdo lipídico e composição de ácidos graxos de microalgas expostas aos gases CO₂, SO₂ e NO. *Química Nova*, v. 31, p. 1609-1612, 2008. ISSN 0100-4042.
- [48] BECKER, E. W. *Microalgae: Biotechnology and Microbiology*. In: ON, C.-P. (1st Ed.). Eberhard-Karls- Universität Tübingen, Germany, 1993. p.304. ISBN 9780527350504.
- [49] MATSUNAGA, T. Characterization of marine microalga, *Scenedesmus* sp. Strain JPCC GA0024 toward biofuel production, *Biotechnol Lett*, v. 31, p.1367 – 1372, 2009.
- [50] ZHAO, G. et al. Ultrasound assisted extraction of carbohydrates from microalgae as feedstock for yeast fermentation. *Bioresource Technology*, v. 128, n. 0, p. 337-344, 1// 2013. ISSN 0960-8524.
- [51] TEIXEIRA, C. “Novo Sistema de Cultivo de Microalgas para Biodiesel”. INT. Rio de Janeiro, 2007.
- [52] ABALDE, J. “Microalgas: cultivo e aplicaciones”. España: Univ. da Coruña, 1995. 210p. BIANCHINI, R. *Microalgas, produtos e aplicações*. Ciência Rural. Santa Maria nov/dez; 2006.
- [53] UGWU, C. U., AOYAGI, H., &UCHIYAMA, H. “Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*”, 99(10), 4021-8. doi: 10.1016/j.biotech.2007.01.046; 2008.
- [54] Sistemas de cultivo aberto. Disponível em: <http://engenharia-química.blogspot.com.br/2011/02/sobre-cultura-de-microalgas-em.html>. Acesso em 06 de junho de 2016.
- [55] BEN-AMOTZ. “Large-Scale Open Algae Ponds”. Seminario ; 2008. <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/benamotz.pdf>

- [56] 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*, 14(2), 557-577. doi: 10.1016/j.rser.2009.10.009; 2010.
- [57] TREDICI MR, ZITTELLI GC. “Efficiency of sunlight utilization: tubular versus flat photobioreactors”. *Biotechnol Bioeng*. 57:187–197. doi: 10.1002/(SICI); 1998.
- [58] SINGH J., GU S. “Commercialization potential of microalgae for biofuels production”. *Renew. Sustain Energy Rev.*, 14, pp. 2696-2610; 2010.
- [59] MOHEIMANI, N. R. “The culture of Coccolithophorid Algae for carbon dioxide bioremediation”. PhD thesis, Murdoch University; 2005.
- [60] GRIS, B., MOROSINOTTO, T., GIACOMETTI, G. M., BERTUCCO, A., AND SFORZA, E. “Cultivation of *Scenedesmus obliquus* in photobioreactors: effects of light intensities and light–dark cycles on growth, productivity, and biochemical composition”. *Appl. Biochem. Biotechnol*. 172, 2377–2389. doi:10.1007/s12010013-0679-z; 2014.
- [61] JANSSEN, M., TRAMPER, J., MUR, L. R., AND WIJFFELS, R. H. “Enclosed outdoor photobioreactors: light regime, photosynthetic efficiency, scale-up, and future prospects”. *Biotechnol. Bioeng*. 81,193–210. doi:10.1002/bit.10468; 2003.
- [62] FLICKINGER, M. C., STEPHEN, W. D., Editor. 1999, *Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis, and Bioseparation*. New York: John Wiley & Sons, Inc. p. 408
- [63] ERIKSEN, N. T. “The technology of microalgal culturing”. *Biotechnol Lett*. 30, 1525–1536; 2008.
- [64] KANTARCI, N., BORAK, F. ULGEN, O. “Bubble column reactors”. *Process Biochemistry*. 40, 2263–2283; 2005.
- [65] AHAMED, A. E VERMETTE, P. “Effect of mechanical agitation on the production of cellulases by *Trichoderma*”. reesei RUT-C30 in a draft-tube airlift bioreactor. *Biochemical Engineering Journ*. 49, 379–387; 2010.

- [66] FORTES, M. M. “Fotobiorreatores para o cultivo de microalgas destinadas á produção de Biodiesel”. Defesa D.sc., Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.
- [67] SÁNCHEZ M. A., CONTRERAS G. A., GARCÍA C. F., GRIMA E. M., CHISTI Y. “Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae”. *Journal of Biotechnology*. Vol 70 pp 249-270; 1999.
- [68] Disponível em : <http://tishabordon.blogspot.com.br/2012/02/biorreatores-e-processos-fermentativos.html>. Acesso em 27 de julho 2016.
- [69] VELEA, S., LIE, L., STEPAN, E., CHIURTU, R. “New Photobioreactor Design for Enhancing the Photosynthetic Production of *Chlorella homosphaera* Culture”. *Revista de Chimie*, 2(1), 1-5; 2014
- [70] KOUSHIK, A. P., ARUDCHELVAM, Y., NIRMALAKHANDAN, N. “Energy-efficient photobioreactor configuration for algal biomass production”. *Bioresource Technology* 266-273; 2012.
- [71] SKJANES, K., LINDBLAD P., MULLER J. “ BioCO₂ – A multidisciplinary, biological approach using solar energy to capture CO₂ while producing H₂ and high value products”. *Biomolecular Engineering*. Pp 405-413; 2007.
- [72] SLEGGERS, P. M., VAN BEVEREN, P. J., WIJFFELS, R. H., VAN STRATEN, G., AND VAN BOXTEL, A. J. (2013). Scenario analysis of large scale algae production in tubular photobioreactors. *Appl. Energy* 105, 395–406. doi:10.1016/j.apenergy.2012.12.068
- [73] ABDUL-RAHMAN, H. AND WANG, C. “Limitations in Current Day Lighting Related Solar Concentration Devices: A Critical Review,” *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 5, No. 18, 2010, pp. 2730-2756.
- [74] SMIDERL. C., BOFF D. Fibras Ópticas, Universidade de Caxias Do Sul - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia Automatização Industrial Professor Valner Brusamarelo, 2003.
- [75] RESENDE, S. M. Materiais e Dispositivos Eletrônicos, 2ª ed Editora Livraria da Física, São Paulo, 2004.
- [76] BAILEY, D. Practical Fiber Optics. Perth: Elsevier, 81-93, 2003.

- [77] L.D. INCOLL., S.P. LONG AND M.A. ASHMORE. "SI units in publications in plant science. In: Commentaries in Plant Sci". Vol. 2, pp. 83-96, Pergamon Press, Oxford, 1981.
- [78] International lighting vocabulary, 3rd edn. Bureau Central de la CIE. Paris. 1970.
- [79] LANG, O.L., P. NOVEL, P.S., OSMOND, C.B., ZIEGLER. H. "Photosynthetically active radiation. In: Physiological plant ecology" (ed). Vol. 12A, Encyclopedia of plant physiology. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York. 1981
- [80] THIMIJJAN, R.W., HEINS, R. D. "Photometric, Radiometric, and Quantum Light unit of measure: A review of procedures for interconversion". v18. Dec, 1983
- [81] McCREE, K. J. "Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data". Agricultural Meteorology. v10,:443-453, 1972.
- [82] PEGALLAPATI, A.K., ARUDCHELVAM, Y., NIRMALAKHANDAN, N."Energy-efficient photobioreactor configuration for algal biomass production", Bioresource Technology 266-273, 2012.
- [83] AMBICA K.P., YALINI A., NAGAMANY N. "Energy-efficient photobioreactor configuration for algal biomass production"; 2012.
- [84] OGBONNA JC. "An integrated solar and artificial light system for internal illumination of photobioreactors" J Biotechnology, 0:289-97, 1999.
- [85] MUNISAMI J. "Novel Technique for Solar Power Illumination using Plastic Optical Fibers" Illumination Optics, edited by Tina E. Kidger, Stuart R. David. Proc. of SPIE Vol. 7103, 2008.
- [86] Medidor de potencia. Acessado de https://physics.ucsd.edu/neurophysics/Manuals/Newport/1936-2936_Power_Meter_User's_Manual.pdf , dia 06/06/2016.
- [87] Sensor de fotodiodo de alto desempenho. Acessado de <https://www.newport.com/p/918D-SL-OD3R> , dia 06/06/2016.
- [88] XUE, S., ZHANG, Q., WU, X., YAN, C., AND WEI, C. "A novel photobioreactor structure using optical fibers as inner light source to fulfill flashing light effects of microalgae". Bioresour.Technol.138,141-147.doi:10.1016/j.biortech.2013.03.156; 2013.
- [89] BAYLESS, D. "Apparatus and Method for Growing Biological Organisms for Fuel and Other Purposes". United States of America Patent 0264708.2007.

- [90] HINCAPIE, E., STUART, B. J. “ Design, construction, and validation of an internally lit air-lift photobioreactor for growing algae”. 2015.
- [91] SLEGGERS, P. M., VAN BEVEREN, P. J., WIJFFELS, R. H., VAN STRATEN, G., AND VAN BOXTEL, A. J. “Scenario analysis of large scale algae production in tubular photobioreactors”. *Appl. Energy* 105,395–406. doi:10.1016/j.apenergy.2012.12.068; 2013.
- [92] JARAMILLO, OA. “A thermal study of optical fibers transmitting concentrated solar energy”. *Journal Phys: Appl. Phys.* 32,1000-1005; 1999.
- [93] EMSLIE CHRISTOPHER. “Polymer optical fibers”. *Journal of materials Science.* 23, 2281-2293. Doi 10.1007;1988.
- [94] Filtro Mirror -Hot IR. <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-filters/shortpass-edge-filters/shortpass-filters/64668/>
- [95] GIOIELLI, J.A. Modificação Industrial de óleos gorduras. Curso de pós-graduação em Tecnologia Bioquímico-Farmacêutica, São Paulo, 2011
- [96] ALLIL R.C., MANCHEGO A. C. “Solar Tracker Development Applied to Environment Illumination and Microalgae Cultivation” *Appl. Journal Solar Energy* Jun-2018.

Anexos

Produção Científica

- **CONGRESSOS**

D.A.P. Da Ponte, A., Cordova, I.A. S. Salazar, M.M. Werneck, Y.R. Cruz, R.C. Allil, D.A.G. Aranda, "LIGHTING SYSTEM FOR PHOTOBIOREACTOR BY POF WITH TRACKING SOLAR AND LED HIGH BRIGHTNESS", 23rd International Conference on Plastic Optical Fibers - POF2014, Keio University, Hiyoshi Campus, Yokohama, Japan, October 8-10, 2014.

D.A.P. Da Ponte, A. Cordova¹, M.M. Werneck, Y.R. Cruz, R.C. Allil, L.G. Carvalho, R.C.V. Paula, I.V. Rodrigues, A.S. Allil, D.A.G. Aranda, "Lighting Optimization Through POFs for Microalgae Cultivation In Opaque Tanks Aiming Biofuels Production" 24th International Conference on Plastic Optical Fibers, held at Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nuremberg, Germany, 22nd to 24th September, 2015.

RODRIGUES, A.S. ALLIL, R.C.B. ALLIL AND M.M. WERNECK, "STUDY OF THE MAXIMUM SOLAR LIGHT AMOUNT IN A BUNDLE OF POFs", 25TH International Conference on Plastic Optical Fibers, September, 2016.

Alexandre S. Allil, Igor V. Rodrigues, Alfredo O. C. Manchego, Regina C. S. B. Allil and Marcelo M. Werneck, "Solar Lighting System for Smart Buildings", presented at the Light Transmission session, XL Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, Armação dos Búzios, RJ, Brasil, from August 27 to 31, 2017.

Alexandre Allil, Alfredo Manchego, Igor Rodrigues, Regina Allil and Marcelo Werneck, "Solar Tracker Development Applied to Ambientes Illumination and Microalgae Cultivation", Paper 80, Proceedings of the 26th International Conference on Plastic Optical Fibres, POF2017, held at Melia Ria Hotel & Spa, Aveiro, Portugal, ISBN: 978-989-97345-2-4, September 13 to 15, 2017.

- **PUBLICAÇÃO EM PERIÓDICO – SOLAR ENERGY EM ANÁLISE
(SUBMETIDO EM 10/JUNHO/2018)**

Solar Tracker Development Applied to Environment Illumination and Microalgae Cultivation, Regina Célia Allil, Alfredo Manchego, Alexandre Allil, Igor Rodrigues, Arthur Werneck, Gisel Chenard Diaz, Fabio Toshio Dino, Yordanka Reyes and Marcelo Werneck

Solar Tracker Development Applied to Environment Illumination and Microalgae Cultivation

Regina Célia Allil^{1*}, Alfredo Manchego¹, Alexandre Allil¹, Igor Rodrigues¹, Arthur Werneck¹, Gisel Chenard Diaz², Fabio Toshio Dino², Yordanka Reyes² and Marcelo Werneck¹

¹Photonics and Instrumentation Laboratory, Electrical Engineering Program

²Laboratório de Tecnologias Verdes-Greentec – Escola de Química

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.

*Corresponding author: regina@lif.coppe.ufrj.br

Key words: solar tracker, illumination, plastic optical fiber, photobioreactor, microalgae cultivation, Fresnel lens

Abstract

Although within the group of countries with the highest solar irradiation index in the world, Brazil still underuses its natural power. Brazil's hydropower energy today makes up 68,5% of the total energy produced, in contrast, however, photovoltaic energy production is still only 0.01%.

As an effort to open up new frontiers for solar energy uses, the main objective of this project was to use solar energy in form of light to reduce the power consumption required for continuously lighting any kind of environment as well as to propose a new technology for illuminating a photobioreactor (PBR) in the cultivation of micro algae for biofuel production.

The system is composed by a solar tracker, an electromechanical control, a Fresnel lens and a plastic optical fiber (POF) bundle, in which the lens concentrates the solar light. Therefore, at the other end of the bundle, the POFs can be distributed homogeneously in any local where one wants to illuminate. The solar tracker is able to track the Sun from sunrise to sunset using an innovative algorithm whose function is to calculate the Sun position according to the local time and latitude using an equatorial mount structure. In addition, some sensors are employed for monitoring relevant parameters, for instance, the light intensity inside the POF bundle, the right ascension and declination angles of the tracker and the solar radiation. These parameters can be downloaded in real time through a specially designed mobile application.

As an application of the solar tracker, two projects were developed and described in this paper: two kinds of solar luminaires for illumination of internal ambiances and a POF illuminated PBR. Both projects were compared in performance with their conventional counterparts and, as a conclusion, it is shown that in both cases the projects here described substitute their conventional counterparts with advantages.

1. Introduction

Belonging to the group of countries with the highest solar irradiation index in the world, Brazil still underuses its natural power. Although Brazil's hydropower makes up 68,5% of total energy produced, we have only 5.3% in eolic production and a meagre 0.01% in photovoltaics (Matriz Energética Brasil, www.sua.pesquisa.com/energia/matriz_energetica_Brasil.htm, accessed in 06/05/2018). In fact, considering the solar irradiation all over the word, our country is among the regions with the highest solar irradiation, according to Solargis (Weather data and software for solar power investments, <https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview>, accessed in 05/04/2018). Table 1 summarizes the average annually solar energy, also known as direct normal irradiation for some of the most irradiated countries on the planet.

Table 1. Average yearly irradiation of some countries (Solargis, 2018).

Country	Average annually energy (kWh/m ²)
Australia	3000
Chile	2740
Sub-Saharan Africa	2560
Saudi Arabia	2400
Brazil	2300
South Africa	2270
USA	2200
China	2120
Spain	1800
Germany	1200

Notice that Brazil's solar radiation is just below that of Saudi Arabia and Germany, despite having a very small solar irradiation is investing heavily in photovoltaics.

In 2015, solar power covered only about 1% of global electricity demand in the world. In three countries in Europe – Italy, Germany and Greece – solar photovoltaic supplies more than 7% of the electricity demand (REVE-Wind Energy and Electric Vehicle Magazine-<https://www.evwind.es/2015/06/12/photovoltaic-solar-energy-passes-1-global-threshold/52716>, accessed in 01/12/2018).

Indeed, Germany is the world leader in photovoltaic generation. In a total of 178 GW global solar photovoltaic in 2015, Germany generates 38 GW, whilst China comes in second with 28 GW, and then, Japan with 23 GW, Italy with 19 GW and USA with 18 GW (Solar Power Europe, <http://www.solarpowereurope.org>, accessed in 01/12/2018).

Of the total energy usage all over the world, illumination consumes about 20%, catalysing the research in solar energy for illumination.

Inspired in these facts, the objective of this work was to develop a solar illumination system by the use a solar tracker that follows the Sun from sunrise to sunset. The lighting system aims to apply the solar tracker in two interfaces: first, as an alternative and innovative technology in the lighting of a photobioreactor (PBR) for microalgae cultivation in the biomass process, aiming the production of biofuel, and second, lighting generation in environments such as study rooms, museum, warehouses, underground parking, commercial buildings, for instance.

The solar tracker consists of an electromechanical project, which uses a motor, an electronic set up for control and an optical system comprised of a Fresnel lens and a plastic optical fiber (POF) bundle. In addition, some sensors are employed to monitor the process such as the light intensity captured by the optical fibers, ascension and declination angles, using an accelerometer and the overall solar radiation with a pyranometer. These parameters are stored in the main computer and can be downloaded via web to a mobile application, in order to be possible to control the system performance at distance. The sensors data are stored in real-time via a web system, entitled "LIF-Remoto", which allows access to the sensor data remotely.

The tests in illumination were carried out at the same building where the solar tracker is used to illuminate the photobioreactor. For this, a study room was totally darkened with windows sealed against external natural illumination to be used as a laboratory for the solar illumination tests.

The system was totally developed at the Photonics and Instrumentation Laboratory of the Electrical Engineering Program at the Universidade Federal do Rio de Janeiro. Currently, the system is installed on the terrace of the building where microalgae is studied at the biofuel process.

2. Microalgae and Photobioreactors

Photobioreactor (PBR) are devices used to cultivate photosynthetic organisms such algae and microalgae, providing an ideal culture environment. Algae are used in various industrial processes, as for instance, cosmetic pigments, fatty acids, antioxidants and biofuel.

Microalgae are photosynthetic microorganisms capable of producing biomass during the whole year, with lower water consumption as compared to macro vegetables such as sugarcane, corn and rapeseed. The challenge of the use of microalgae as a raw material for biodiesel resides in the selection of promising species with a high triglyceride content, their optimum conditions of cultivation, adaptation and growth of the cultures in the large-scale cultivation systems and, above all, the reduction of costs of production (Fernandes, B. D., 2010; Xue, S., 2013).

The simplest type of PBR is a natural (or artificial) lagoon with paddle wheels for water agitation. This design is known as open PBR, which requires a large amount of land area and suffer from natural temperature and light fluctuations. The main problem, however, with open PBRs is in the exposure to foreign microorganism contaminants that usually compete with the algae, interfering with the growth rate of the organism of interest (Hincapie, E., 2010, 2010).

For circumventing these problems, some other designs were developed such as the closed PBRs. They consist of a container such as a tube, a box or a serpentine, inside which the microalgae culture is made to circulate. Light, nutrients, CO₂ and temperature control are provided by various methods inside the system.

Other systems, known as “window PBR”, are narrow boxes, just like a window, made of transparent material, such as polycarbonate, for allowing the Sun light to go in and yet, circumventing the problems listed above. However, due to the exposure to the Sun, the water tends to heat up to 60°C and since the culture temperature cannot exceed 30°C, these systems spend a lot of energy for refrigeration. The method used to control the temperature is by the use of a serpentine with cold water that circulates inside each window.

The idea of using the solar tracker with an optical fiber bundle is to produce the same microalgae culture as a window type PBR, but without the necessity of the temperature control. The reason for this is that this PBR is kept protected from the Sun heat, inside a closed room for instance. In this paper, we will compare the microalgae production of a window PBR with the production of the fiber optic illuminated PBR, showing that the production costs of the system proposed in this paper is smaller than the cost of the same production using a window PBR.

The great differential of this lighting system is not only eliminating the necessity of a costly temperature control, but also to open up the possibility of using non-transparent materials, much cheaper and with greater durability.

3. Solar Illumination Systems

The technique of illumination by light guides has been studied since before the time of the invention of low attenuation optical fiber in the 70's. More recently, with the greater availability of POFs, these studies have intensified and many researchers have developed lighting designs using optical fibers. The advantage of POFs is their larger diameter when compared to silica, which allows the capture of more light, in addition to having a density 2.5 times smaller than that of silica. On the other hand, the maximum temperature of 80°C for POFs of PMMA (Poly-Methyl-Methacrylate) or 105°C for POFs of polycarbonate limits the solar concentration, making necessary the use of filters.

There are many examples in the literature of describing the use of optical fibers for illumination purposes. (Cariou et al., 1982) suggest the possibility of using a fiber bundle to guide the light, aiming the environment illumination. (Lianga et al., 1998) concentrated the Sun in optical fibers, from parabolic mirrors. The concentration leads to an increase in temperature, which motivated (Jaramillo, 1999) to study the thermal behavior of a solar concentration system in optical fibers.

(Matsunaga et al., 1991) used a 1.5-m of POF bundle for the production of glutamate from a culture of cyanobacterium. They used a special type of POF, made of PMMA core with a sheath of fluororesin around the core to diffuse the light along the fiber. They did not use the Sun, rather a metal-halide lamp to simulate sunlight.

In terms of efficiency of solar systems, (Tsangrassoulis et al., 2005) covers an unexplored gap, which is the transmission capacity of different systems, in terms of the relation between the light input from the Sun and the power delivered to the region to be illuminated.

We can also mention the work of (Munisami and Kalymnios, 2008) in which they present a review of solar lighting systems, including the use of optical fibers.

(Ogbonna et al, 1999) used a commercial available system (Himawari, see below) to illuminate a photobioreactor with sunlight. He also used a metal halide lamp in another fiber bundle to switch on during the night.

(Hincapie and Stuart, 2015) used a 44 POF fiber bundle to illuminate a transparent photobioreactor using microscope light bulb. Their results with algae production will be compared later with our results.

There are companies that commercialize these types of tracker for applications in the area of lighting. They are the Swedish company Parans, the Japanese Himawari and the German Sollektor.

The Swedish company Parans, founded in 2003, presents an altazimuth system with several converging lens that promises to guide concentrated sunlight for distances up to 100 meters. The company promises to cover from floor 1 to 30 with up to 20 points of light in buildings (PARANS. About us: Parans. <http://www.parans.com>, 2018, accessed in 02/12/ 2018).

The Japanese company Himawari, founded in 2006, presents a sun tracker controlled by a set of photodetectors that directs the tracker to the Sun position. The fiber used are silica type, 1 mm in diameter with one fiber per each 105 mm diameter Fresnel lens with a total of 12 lenses. The company promises to guide light up to 15 meters away (HIMAWARI. About us: Himawari. <http://www.himawari-net.co.jp>, 2018, accessed in 02/07/2018).

The German company Sollektor, which closed its activities in June 2017 due to financial difficulties, promised to drive solar energy up to a distance of 40 meters. They used an array of injection molded lenses in which each lens concentrates direct sunlight to one individual POF with 0.75 mm in diameter. Up to 800 POF in several bundles were used to transport the light to remote sites inside a building (M. Bloos et al., 2015).

4. Solar Tracking Techniques

There are two main assemblies or mounts for tracking an object in the sky, termed as azimuthal or alt-azimuth and equatorial. Both have advantages and disadvantages, of course, and the choice of which type of structure to use will always depend on the application and the existing resources. These mounts are applied in telescopes, both large ones and portables ones.

Alt-Azimuth have two axes of movement: altitude (up/down), and azimuth (left/right). As an object like the Sun moves across the sky, it will be necessary to adjust both of these directions every now and then to keep the star in the center of the scene.

The equatorial mount moves the telescope in an arc, allowing to track objects much more easily as they move across the sky. This means that one has to adjust a single axis to track the object to keep it in the field of view.

Alt-azimuth needs two motors to track an object, one for each axis and their speed is not constant as the object crosses the sky. On the other hand, the equatorial mount needs only one motor and its speed is constant during all the time of observation.

In equatorial mounting, there are two axes. The primary axis is mounted precisely parallel to the Earth axis, that is, at the local latitude angle. The secondary axis allows movement in the direction of declination, that is, the direction of sunrise, and it varies from 0° at East direction, to + 90° at the north celestial pole, and -90° at the celestial south pole. This axis varies little during a day and can be manually adjusted from day to day; it is enough to know the corresponding declination of the sunrise. The Fresnell lens attached to the POF bundle rotates around the primary axis, forming the angle known as right ascension, meaning the instantaneous angle measured from sunrise to the actual Sun position. The right ascension shaft rotates at a constant speed, equal to that of the sidereal day. By adjusting the system to the sunrise declination, it is just necessary to start the motor at a constant speed and it will follow the Sun during its journey through the sky. The telescope should be rotated with the rate of one turn (360°) for each sidereal day (23 hours 56 minutes and 4 seconds) in the opposite direction to that in which the Earth rotates. This speed represents approximately 15° per hour or four minutes for each degree of rotation.

5. Plastic Optical Fibers

Plastic optical fibers were used in this work rather than silica fiber for the several advantages POF offers. One of the best characteristic is their diameter and numerical aperture that allows can capture more light than the silica ones. On the other hand, one must mention the greatest disadvantage of POF that is the larger attenuation in the visible spectrum, as compared with silica fibers.

Table 2 shows the relevant characteristics of POF as compared with silica fibers.

Table 2. Comparison of different characteristics between POF and silica fiber

Parameter	POF	Silica Fiber
Diameter	2 mm	0.45 mm
Attenuation at visible spectrum	100 dB/km	8 dB/km
Numerical Aperture	0.5	0.22
Price per meter	1 US\$/m	
Maximum temperature	80°C	Up to 900°C
Specific mass	1 g/cm ³	2.5 g/cm ³
Bundle Flexibility	high	low

Notice that we choose two different diameters for silica and POF. In reality there are many choices for each fiber type but these two diameters are cited as examples for lightening applications. The greater the diameter the greater the amount of light captured. However, the greater diameter the greater the losses when making a bundle as the empty spaces between fibers increases.

Attenuation is a serious issue when large distances between solar trackers and illumination site have to be covered. For silica fiber, the attenuation is much smaller than that of POF, however as the silica density is higher, the bundle will be heavier and also much less flexible than a bundle made of POF.

Temperature is another important factor because every incident photon from the Sun that is not guided by the fiber, will turn into heat. Figure 1 shows the attenuation of POF compared with silica fiber and the solar irradiance available at Earth surface (ASTM-Reference Solar Spectral Irradiance - ASTM G-173 from the American Society for Testing and Materials, accessed in 05/22/2018)

<http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/astmg173/astmg173.html>). Notice that POF does not transmit well the near infrared part of the solar spectrum whereas silica does. Therefore, POF will heat more than silica, which will make it necessary the use of an infrared filter because the limited operating temperature of PMMA. On the other hand, since POF does not transmit IR, the illumination provided by a POF system will be much more natural as no invisible light will be lost in the ambience.

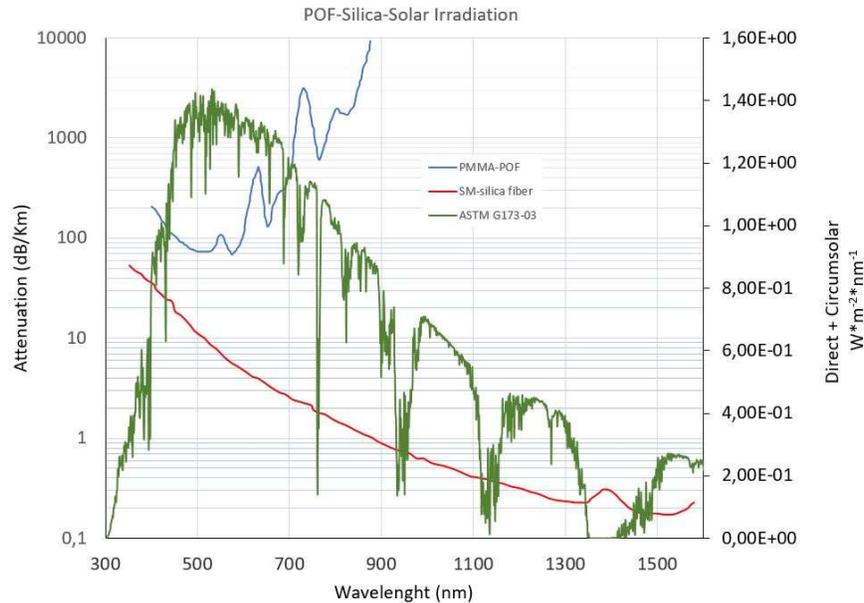


Figure 1. Comparison of solar spectrum with attenuation of silica fiber and POF (ASTM, 2018).

6. Materials and Methods

This section describes the two methodologies applied in this paper to use the sunlight: a photobioreactor for microalgae cultivation and a luminaire lighting system for a study room. The system is comprised of a Fresnel lens connected to a solar tracker driven by a stepper motor, following an algorithm that calculates the Sun position. The Fresnel lens focuses the sunlight into a POF bundle that is directed either to the environment to be illuminated or to the photobioreactor for microalgae cultivation. Figure 2 shows a simplified schematic diagram of the system.

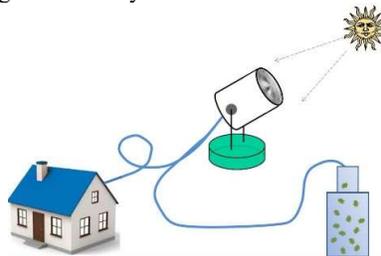


Figure 2. Simplified illustration of the solar tracker connected to a house and a photobioreactor.

6.1. The solar tracker

The system is able to follow the Sun from the sunrise to the sunset using an algorithm that calculates the Sun position based on the time of year, the longitude and the latitude of the location.

In order to perform the tracking, the algorithm was developed to calculate the time of sunrise and sunset at any time, given the latitude and longitude coordinates of the location. After the calculation of the sunrise and sunset data, it is possible to calculate the duration of the day and then the initial and final right ascension angle values. Hence, with the sunrise and sunset hour data, the whole tracking system works completely independent through the days along the year.

The algorithm was implemented in C++ and uploaded into an Arduino microprocessor. The microprocessor controls a stepper motor driven by a power transistor bridge. Figure 3 shows the block diagram of the full system.

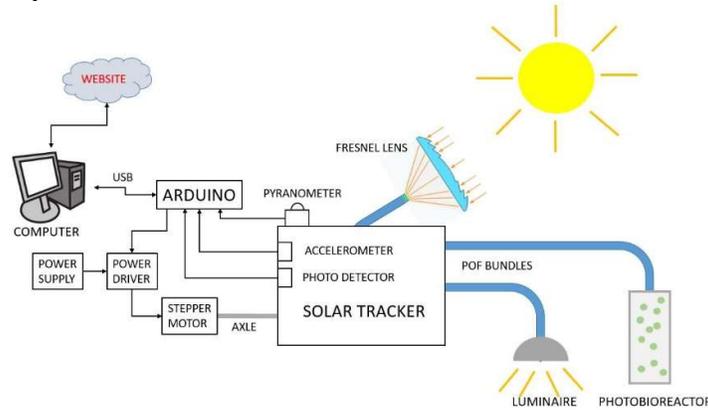


Figure 3. Block diagram of the full system.

An Arduino microcontroller is responsible for the control of the tracker through a power driver and a stepper motor. The pyranometer (Apogee AE-SP-110 with sensitivity of 0.20 mV/W/m^2) tells the system the amount of available solar light. The photodetector receives the light from one single fiber from the POF bundle and, together with the pyranometer information, it is possible to know the amount of light captured by the solar tracker. This two information should be always proportional, otherwise the tracker is missing the solar direction.

The accelerometer gives the information of the tilt angle of the tracker; this information is fed to the control system in order to control the motor to direct the tracker to the Sun direction. An external computer receives all information from the solar tracker and uploads them to a website to be available to the users. The computer also serves to upload upgrades of the control software.

For the motor control, the microcontroller sends pulse commands to the power drive, an H-Full-Bridge circuit, as shown in Figure 4 (Left), allowing speed control as well as the direction of rotation of the motor. Figure 4 shows the power and control schematics where digital pins 1 and 2 represent the microcontroller digital output.

With the data obtained from the accelerometer, it is possible to compare the actual rotational angle of the tracker, $\theta(t)$, with the desired angle (represented by the setpoint, $r(t)$), at which the tracker should remain to perform the correct solar tracking. The difference between the desired angle and the actual angle as depicted in Figure 4 (Right), is the error signal ($e(t)$) that is fed to the motor.

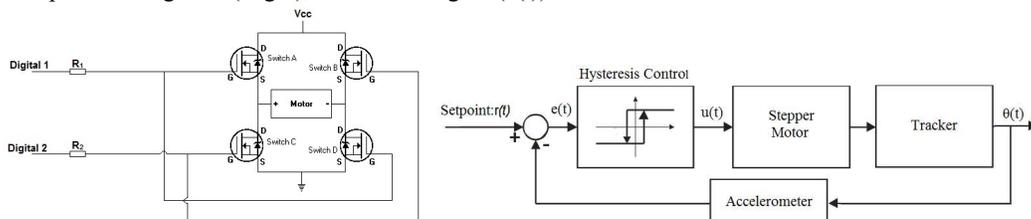


Figure 4. H-Bridge and control schematics.

Initially the system was developed and tested at the laboratory. Figure 5 shows the solar tracker being assembled at the Photonics and Instrumentation Laboratory.

In Figure 5, The motor (1), drive by the control box (2) can turn the frame (3) following the Sun all over the sky since sunrise to sunset, according to the algorithm responsible by the calculation of the sunrise time. The Fresnel lens (4) rotates together with the frame of the system focusing the light into the tip of the POF bundle (5). In (6) there is the POF bundle support.

In (7) there is the adjustment of the declination angle that will be carried out manually in a weekly schedule. Since the Sun rises every day at a different position, the Fresnel lens support can be turned manually to that specific direction every 4 to 5 days. This is an advantage of the equatorial mount, the declination changes very little in an interval of a few days.

The latitude setting (8) coincides with the inclination angle of the Earth axis and has to be adjusted according to geographical position of the installation



Figure 5. Right: The solar tracker being assembled in laboratory. 1) Stepper motor, driven by the control box (2). 3) Rotatory frame the follows the Sun. 4) Fresnel lens. 5) Support of POF bundle at focus point of the lens. 6). POF bundle. 7) Declination adjustment. Left: Another view showing the inclination adjustment of the local latitude (8). Lower Left: POF bundle support in test with short fibers illuminated by an artificial light.

6.2. Optic system

The optical system is the most important part of the system in the sense that there are many challenges in producing a light guide illuminated by the Sun. First, there is a tradeoff between the concentration factor, i.e. the ratio between the lens area and the focus area, and the temperature. The larger the concentration factor, the more light is conducted by the waveguide, but, because the POF does not transmit infrared, this part of the spectrum will be converted in heat (see Figure 1). Since the PMMA, as all polymers in fact, is a thermal insulator, it is not possible to dissipate this heat. The solution is then, either controlling the concentration factor, by defocusing the lens to increase the focus area or decreasing the lens diameter. In any case, the amount of guided light will decrease. Another way to control the temperature is by filtering out the infrared part of the spectrum, since this part not only cannot be used for illumination, but also is not transmitted by the fiber.

The ideal filter would cut off the end of the visible spectrum, around 750 nm. Figure 6 shows the transmission spectrum of a 12.5 mm diameter IR cutoff filter (Edmund Optics, New Jersey, USA). Clearly, the heat that would be generated in the fiber will be transferred to the filter, but one can fix the filter much higher in the light cone so that the light concentration at the filter position is much smaller than that on the bundle end. In any case, the filter is made of silica, that supports much more temperature than the PMMA.

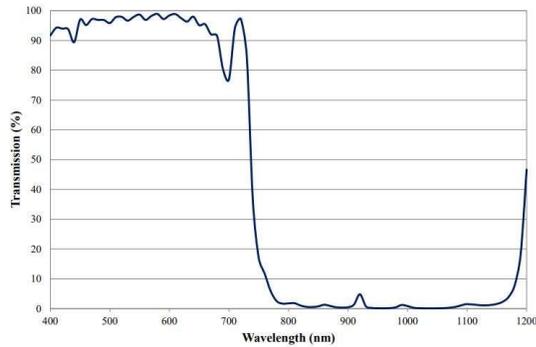


Figure 6. Cutoff spectrum of a IV filter (Edmund Optics, 2018).

An alternative to the low pass filter, is a dichroic mirror. This means that the rejected band will not be absorbed by the filter but reflected back. With this option, one can position the dichroic mirror in a more concentrated position, because it will heat up less, as most of the light is reflected back, instead to be absorbed by the glass. This will save money, as the cost of the mirror is proportional to its diameter.

The other difficult decision in constructing an optical fiber bundle is the tradeoff between the fiber diameter, the bundle flexibility, the total length of the fibers and the packing-factor. In a few words, the larger the fiber diameter the harder will be the bundle do curve, that is, the smaller its flexibility. But as one decreases the fiber diameter, the more and more fiber will fit inside the bundle and more difficult will be to join the bundle extremity in one single compact piece.

For instance, in a bundle with 25 mm in diameter will fit 120 fibers with 2 mm diameter, whereas in the same bundle diameter will fit 483 fibers with 1 mm in diameter. In the first case, for each 10 m of bundle we will have about 1.2 km of fiber. In the second case, each 10 m of bundle will need about 4.8 km of fiber. We opted for the 2-mm diameter fiber even considering the lower flexibility of the bundle.

The other challenge in making a bundle is the arrangement of its tip in order to keep the packing factor as tight as possible. The reason for this is that any light that falls on the space between two fibers will not be guided. This means that not only some captured light will be lost but also that the lost light will produce heat, something that must be avoided due to the limited operating temperature of the PMMA.

For a 25 mm bundle diameter, the maximum number of 2-mm diameter fibers is 120, for an ideal packing factor (bundle area divided by the total fiber area) of 1.31. It is also necessary to polish the tip after gluing in order to each fiber capture the same amount of light. Figure 7 (Left) shows the tip of the bundle after the polishing process. By heating the bundle tip close to the melting point temperature and compressing it inside an adjustable ring, one can eliminate the empty spaces between the fibers, seen in Figure 7 (Left). Figure 7 (Right) shows the result, after the compression, where it is possible to notice the hexagonal fiber tip format. With this approach one can obtain packing factors near 100%.

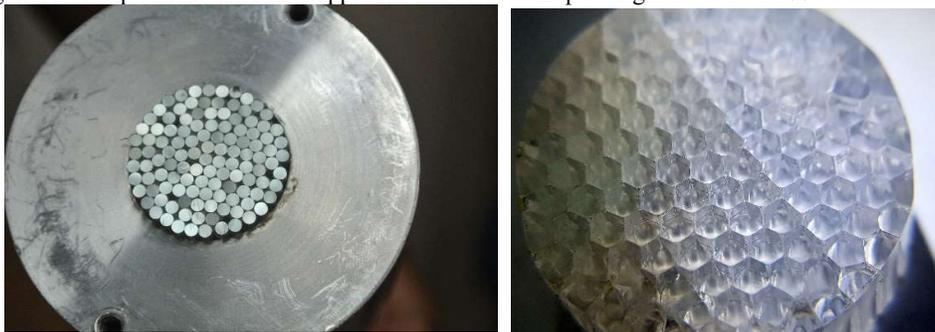


Figure 7. Left: The tip of the bundle after the polishing process. Right: Tip of the bundle after compression under heat.

6.3. Luminaires

Two types of luminaires were developed, one for diffuse lighting and another one for focused lighting. Ambient lighting can be diffused when you want to illuminate an area uniformly or it can be

focused in one place so as to illuminate a decoration or a painting. One POF bundle with 120 fiber and 7 m in length was constructed for each luminaire.

For the spot luminaire, all fibers were inserted and glued into a 50-mm diameter PMMA disk with 120 equally spaced holes. After the gluing, the disk face must be polished so as to all fibers illuminate equally and homogeneously. Then, the disk, with the fixed fibers was inserted into a commercial parabolic reflector. The focus divergence can be calculated from the POF numerical aperture shown in Table 2, $NA=0.5$. Since $NA=\sin^{-1}(\alpha)$ and being $2(\alpha)$ the acceptance angle, we have the divergence of 60° .

For making the diffuse luminaire it is necessary to modify the fiber so that the light leaves the fiber laterally at several angles. As the goal is to spread the light as much as possible, the part of the fiber to be modified must extend a few centimeters from the end of the fiber.

Several ways of modifying the fiber in order to allow the escape of light from the sides were studied, among them: mechanical abrasion with sandpaper, chemical abrasion with chloroform, acetone and ethyl acetate, holes and longitudinal grooves with CO_2 laser and mechanically carved cross grooves.

Abrasion with sandpaper removes the cladding creating a rough surface, making the guided light to leave the fiber in many directions. However, the lateral light was weak as most of the light kept guided up to the fiber tip, where it would have no use. The other technique, chemical abrasions, depending on the substance used, either had no effect or severely damaged the fiber to the point of breaking. Finally, laser holes and grooves showed a reasonable result, but the fibers became fragile and brittle after the process. The better solution was the transversal grooves that were made with the use of a die to carve a continuous thread along the fiber end. Figure 8 shows a microscopic picture of one fiber tip, after the process.

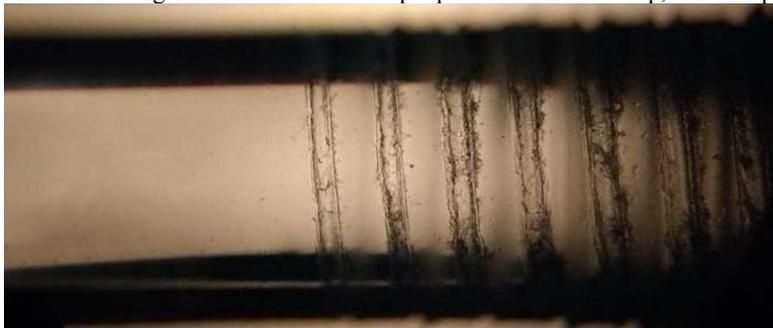


Figure 8. A microscopic picture of a fiber tip, after the threading process.

The fibers of this luminaire were grooved in their last 20 centimeters, because with this length it was found experimentally that all light left the fiber and only a meager illumination was still at the fiber end. We used a commercial fluorescent light reflector to case the fibers. As this luminaire is 1.2 m in length, we used six 20-cm sections with 20 fibers each to fill the entire space of the luminaire.

6.4. Photobioreactor

As stated above, the system aims to illuminate a closed and yet, non-transparent photobioreactor with the solar tracker and compare the results of microalgae culture with a conventional transparent photobioreactor. We have two advantages with this system as compared with conventional window PBR: a stable internal temperature because the PBR is protected from the solar heat and the possibility of using cheap material in its construction, such as PVC (polyvinyl chloride) with greater durability.

In order to obtain a lateral illumination, the fibers inside the PBR were treated with the same technique as describes in the last section for the diffuse luminaire. Figure 9 (Left) shows the fiber arrangement inside de 30-liter PBR. The fibers were fixed equally spaced in a squirrel cage fashion, in order to homogeneously illuminate the interior of the PBR. It is also possible to notice the lower serpentine with holes for aeration and CO_2 supply and the light sensor, used to compare the illumination inside both PBR. Figure 9 (Right) shows the PBR ready, at the beginning of the cultivation. It is possible to notice the CO_2 piping coupled to the PBR cap and the light sensor wiring. Notice also, in both pictures, the thermal protection around the PBR to protect the cell culture against outside thermal oscillations.



Figure 9. Left: Fiber arrangement inside de 30-liters PBR. The lower serpentine contains holes for aeration and CO₂ supply. The cylinder at top is the light sensor. Right: PBR closed, at the beginning of the cultivation. In both pictures it is possible to notice the thermal protection around the PBR to protect the cell culture against outside thermal oscillations.

Figure 10 (Left) shows the location of the PBR, protected from the Sun and, at same time, illuminated by the solar tracker at the roof of the building. Notice the POF bundle connecting the PBR to the solar tracker, inside a black polyethene jacket. In Figure 10 (Top-right) it is shown a detailed view of the POF arrangement inside the PBR. At Figure 10 (Lower-right) the conventional window PBR. Notice the complex infrastructure necessary for microalgae cultivation in a window type PBR including a cold water pump and a refrigerator for temperature control.



Figure 10. Left: Location of the PBR illuminated by the solar tracker at the roof of the building. The POF bundle connecting the PBR to the solar tracker is inside a black polyethylene jacket. Top-right: A detailed view of the POF arrangement inside the PBR. Lower-right: The conventional window PBR with its complex infrastructure, including a cold water pump and a refrigerator for temperature control.

6.5. Microalgae cultivation

This study was carried out in a comparative way, evaluating in parallel the cellular growth of the species *Monoraphidium* sp. in the window PBR and in the POF illuminated PBR. The comparison was performed through cell count and dry weight analyzes. The following procedure was used in both PBR:

- 30 L of the microalgae species *Monoraphidium* sp. was cultivated in an ASM-1 medium (Gorham, P. R. et al., 1964);
- The temperature was controlled between 20-35°C;
- A turbulence was forced through an aeration around 1 to 7 L/min;
- pH was automatically controlled between 7.0 and 8.0 by CO₂ injection;
- Each feed started at a concentration of 6.05x10⁶ cells/mL;
- Experiment was performed over a period of 19 days;
- Cell growth was monitored daily by counting cell numbers and dry weight measurements;
- The photosynthetically active radiation (PAR) was measured every day of cultivation with a radiometer (QSL-2100 model, Quantum Scalar Laboratory, California, USA).

6.6. Development of a web-based system for data acquisition through cellphone application

In this project, we incorporated the capability of a constant data monitoring complement. This monitoring allows the control of the device to make corrections and future projections of its capabilities in each environment that is installed. The system provides the most relevant data in a mobile application, that is, the luminous intensity captured by the POF bundle, the solar radiation, the ambient temperature, the right ascension angle of the apparatus and meteorological data collected from a nearby meteorological system. All data are collected in real time and can be available as a graph in the user's cellphone.

This type of monitoring technology is already a constant in our field of research around the world. As described (Zhang, X., Du et al, 2017), the researchers were able to save in a database information withdrawn during the day from solar panels. This system used USB ports supported by the panel itself.

At a (GAJANUR, N. R. et al., 2016), the same group described the monitoring of solar panels conditions installed on the roof of a train running on China's countryside. The application allowed the passengers to observe the conditions of the system in real time, however, without a database storing the information.

In a 2015 a (KABALCI, E., et al, 2015) a team proposed to monitor solar panels by a mobile application as the system keeps sending packet data every two hours to its customers.

The project focuses on the use of an Arduino microprocessor with a GSM/GPRS module. External communication uses the Python software to capture the required information that will be sent out of the device. The storage occurs by capturing this information on the allocated server to store this data in a database. As a security measure, this server saves all received files in the cloud, which comes in dat format. SQL software is used as the standard instrument for structuring the database. The final mobile application, developed in Android, serves as the receiver of data already saved on the central server. The software allows search operations within the database to retrieve old information from the device, as well as showing the latest information.

Figure 11 shows the block diagram of the information system. At the solar tracker, the Arduino microcontroller (1) running in Arduino C++ controls the system rotational angle and the desired angle, given by the algorithm, and upload both angles and the current time to the Local Computer (4) running in Python. At the same time, the Meteorological Station (3) receives continuously, all data from the Meteorological Tower (2) and uploads the data to the Local Computer. This computer, through an Internet link, uploads all data to the Laboratory Server (5), running in SQL/PHP. This data is available to local users but it is also uploaded to a cloud to store all history of the system. Users anywhere in the planet that have the cellphone application can connect to the cloud and see the desired data in form of a graph.

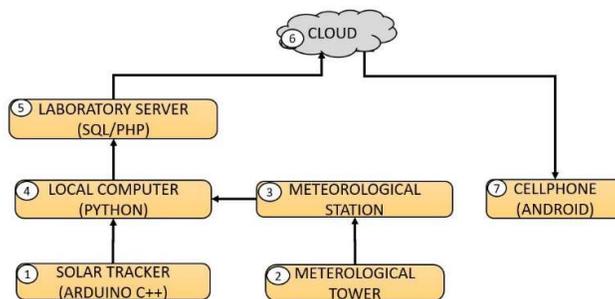


Figure 11. Block diagram of the monitoring system.

7. Results and Discussions

This section will show results and discussion on the three fronts that constitute the objectives of this project: the solar tracker performance, the illumination results and the microalgae cultivation.

7.1. Solar tracker

Figure 12 shows the solar tracker installed in field, at the roof of the Greentech building, where research of biofuel is taking place.



Figure 12. Upper: Solar tracker system installed on the roof of the Technology Center at the Universidade Federal do Rio de Janeiro. Bottom left: Details of the solar tracker, showing the stepper motor at center left, the microprocessor control box at bottom left, the Fresnel lens and the IR filter at the lens focus. Bottom right: Adjustment of the declination angle which allows the tracker to be directed to the sunrise direction.

In order to verify the tracking performance, the web-based data storage platform was used. In this data base all important data is recorded, among them, the calculated right ascension angle by the algorithm and the true right ascension angle, given by the accelerometer. These data are shown in Figure 13 in the interval of 30 minutes. It is possible to notice that the average error is smaller than one degree. Since the focal point of the Fresnel lens is located below the POF bundle tip and the Sun focus at the bundle tip is a circle larger than the tip itself, there are a few degrees of freedom in which small errors of tracking are allowed, that is, the Sun focal point is always fully illuminating the bundle tip. The behavior in this graph was repeated over the days, demonstrating the efficiency of the proposed methodology for solar tracking.

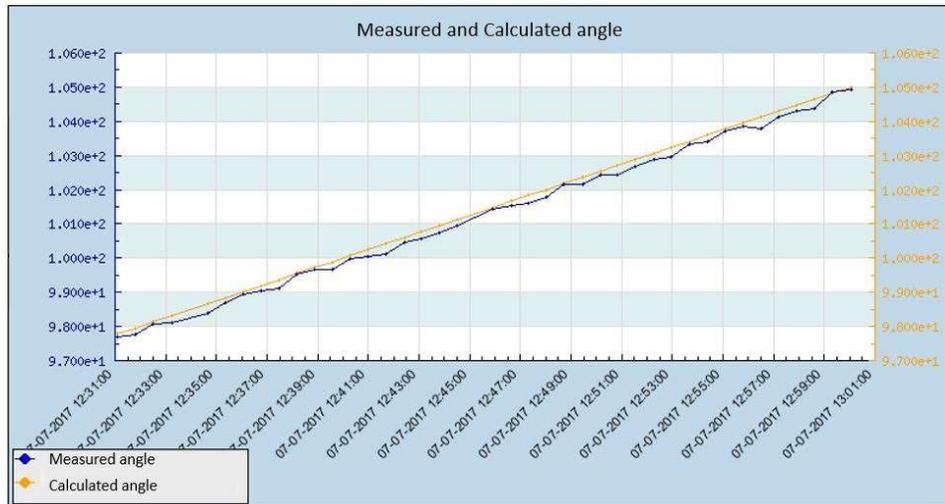


Figure 13. Measured and calculated right ascension angle. Notice the average error smaller than one degree which guarantees a full illumination of the bundle tip all over the day.

7.2. Environment Illumination

Due to the POF attenuation of about 0.1 dB per meter at the center of visible spectrum, we will experience an attenuation of 50% per each 30 m of fiber bundle. In this experiment we used a fiber length of 7 m which would provide an attenuation of 0.7 dB or about 15%. This is a better result than [Ogbonna et al \(1999\)](#), that used a commercial solar collector known as Himawari with 10 m of silica fiber to illuminate a PBR and they calculated that 38% of the collected radiation was transmitted into the reactor, presenting, therefore, an attenuation of 72%.

Aiming at an avaluation of the color distortion due to the PMMA attenuation spectrum, we measured the spectra of the Sun and that of the light guided by the POF bundle using an optical spectrum analyzer (Model HR4000 Ocean Optics, Florida, USA). Figure 14 shows the solar spectrum (small dots) superimposed over the fiber attenuation spectrum (solid line) and the measured spectrum at the end of the bundle (dashed line). Notice that the spectrum at the end of the bundle coincides with that of the Sun, except at about 620 nm (orange) where the PMMA presents a strong attenuation. After that point, however, there is another transmission window at 650 nm (red) where the POF bundle spectrum presents a red peak. For a relatively small length such as the one used here, there will not be much color modification on the spectrum, but for longer lengths, however, there will be less red and blue, which will distort the spectrum to a greenish tone.

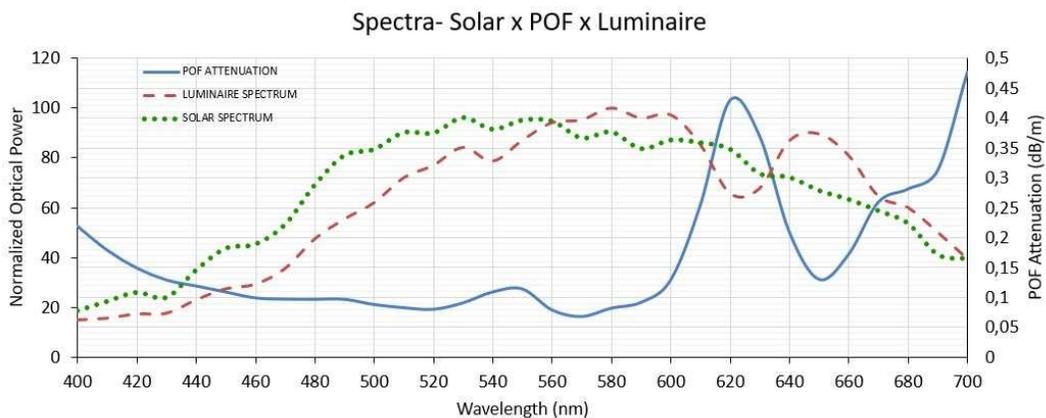


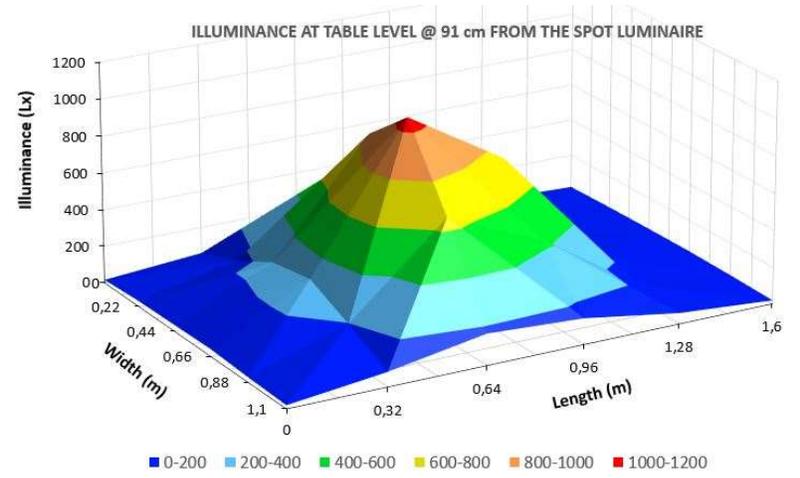
Figure 14. The solar spectrum superimposed on the POF attenuation spectrum and the measured spectrum at the end of the POF bundle.

As detailed in the Materials and Methods section, two luminaires were built, one spot and one diffuse. The two luminaires are show in Figure 15, at left the spot luminaire and at right the diffuse luminaire.



Figure 15. Luminaires developed and their illumination effect. Top left: Spot luminaire; Bottom left: Illumination obtained with the spot luminaire; Top right: Diffuse luminaire; Bottom right: Illumination obtained with diffuse luminaire.

To evaluate the distribution of light in the illuminated areas by the POF luminaires, light intensity measurements were taken at various points in the room using a lux meter (Model Extech HD450, New Hampshire, USA). Measurements were taken at approximately from 80 cm from the floor level. At the moment of making these measurements we did not have a IR filter therefore used a lower concentration for controlling the temperature. Figure 16 shows the measurements at table level.



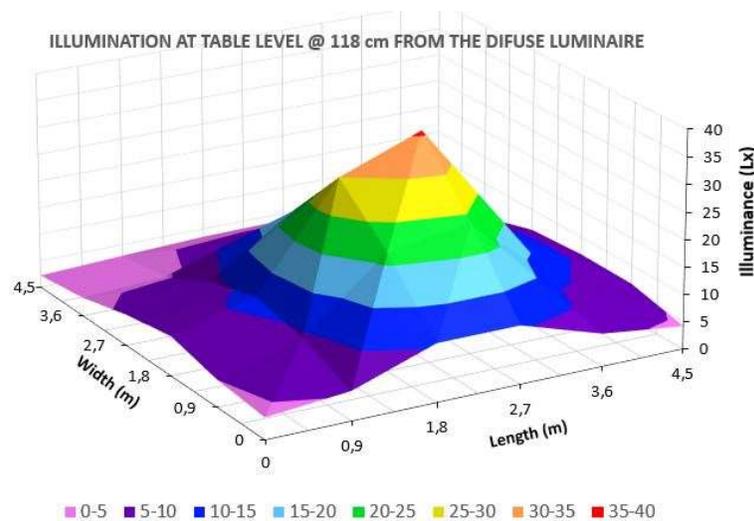


Figure 16. Results from measurements of illuminance of spot luminaire (top) and diffuse luminaire (bottom).

In order to maintain the temperature at the tip of the bundle below 70°C, we controlled the system concentration by adjusting the focus position of the Fresnel lens. Experimental measurements confirmed that the best concentration was 74. At this concentration, the fibers receive on a normal day (illuminance 100,000 lux) 7.4 MLux. Since the optical fiber has an area of $3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, the number of lumens received per fiber is 23.25 lumens.

Each luminaire has 120 fibers, so each one receives 2,790 lumens. In order to determine how many lumens the luminaires provide to the environment to be illuminated, we can use the data in Figure 14 which give us 0.1 dB per meter or 0.7 dB of light losses in 7 m. According to the equation below, we can calculate the transmittance ratio.

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) = 10 \log_{10} (Transmittance)$$

In this equation, P_{in} is the input power in the bundle, P_{out} is the output power

This means that the bundle transmittance is about 0.85 presenting a loss of 15%. Now we can calculate the number of lumens arriving at the end of the POF bundle available to illuminate the ambience: 2,371.5 lumens.

According to (DiLaura et al., 2011) a training room should have 500 lux, or 500 lumens/square meter. Therefore, to illuminate a training room with 9 m^2 we would need 4,500 lumens or about two solar trackers or one solar tracker with two Fresnel lenses.

7.3. Microalgae production

As described above, two PBRs were used in this study. The first one in the traditional cultivation method, a window-type transparent bioreactor with direct solar illumination and the other, a non-transparent container illuminated by a POF bundle.

During the growing phase, that extends up to 20 days, of the cultivation, a limitation was identified, related to the internal illumination of the photobioreactor on cloudy or rainy days. Different from the window type PBR that receives light from every direction even in in cloudy or rainy days, the solar concentrator does not illuminate in cloudy days, even if it is a bright day. The reason for this is that the solar concentration effect caused by the Fresnel lens, only receives light from a small spot on the sky. Therefore, light rays coming from nearby reflections, do not reach the bundle top inside the acceptance cone, that is the cone within which light rays may be coupled into the bound modes of the optical fiber forming the bundle.

For this reason, this cultivation was debilitated by the lack of sun and its results could not be compared with the window type PBR since the cultivation in it was not impaired by the low illumination.

To circumventing this problem, in rainy or cloudy days, we connected the end of the POF bundle to a bank of super luminescent LED and adjusted the output light power to match that of each day. In this way, for the next cultivation, both PBRs could be equally illuminated during all time of the growing period.

The comparison between the two PBRs cultivations method was by the cell density production (cell/mL) and the lipid profile with the fatty acid identification. The cell count was performed daily by direct count under an optical microscope and the fatty acid contents by gaseous chromatography.

Figure 17 presents two cultivations of both PBRs, the one at the left side with only solar illumination and the one at right with solar illumination and LED for cloudy days. Each upper graph presents the cultivation of microalgae based on the cell density for both PBRs, together with the daily averages of the photosynthetically active radiation (PAR) measured every day during the cultivation with a radiometer, as described above. To bottom graph, presents the outside solar radiation as measured by a pyranometer.

The upper-left graph, shows that the window-type PBR produced a higher count ($2.5E+07$) than that of the POF PBR ($2.0E+07$). Notice however, that the PAR average measurement inside the POF PBR was very low and the PAR measurement inside the window PBR presented an averaged higher illumination. This was due to the fact that we had in that period many cloudy days which affected the algae growing inside the POF PBR. This can be observed by the bottom left graph, which shows a very low average solar radiation in this period (normal illumination is about $1,100 \text{ W/m}^2$).

In the cultivation with solar illumination and LED (graph at upper-right) we can observe that the cell counts of the POF PBR was higher ($6.2E+08$) than that of the window PBR cultivation ($5.5E+08$). Notice the PAR measurement of the POF PBR that presented a higher than that of the window PBR due to use of the LEDs, that compensated the cloudy days.

For days 1 and 2 a quick sunshine at the time of measurement made a peak on the PAR graph which does not show on the lower graph. The reason for this is that the measurements of inside PAR and outside solar illumination are done in different times with different sensors.

The lower-right graph shows that the average illumination of the second experiment was higher than that of the first one, therefore justifying a higher production in both PBRs. Notice however that, even with low solar illumination, the POF PBR presented a PAR measurement higher, due to the LED use.

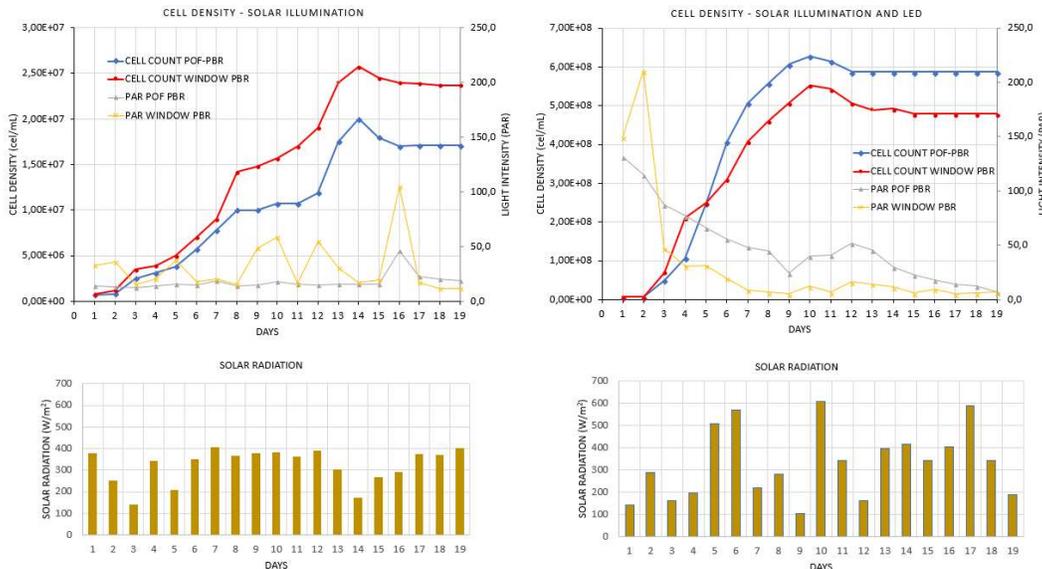


Figure 17. Cell count and solar irradiation of both PBRs. Top-left: Cell count of the PBR with only solar illumination; Top-right: Cell count of the PBR with solar illumination and LED. In both graphs the lower traces show daily averages of the photosynthetically active radiation (PAR). The bottom graphs present the outside solar radiation as measured by a pyranometer.

The production of biodiesel requires a significant amount of biomass, lipid content and fatty acids of medium chain interest, constituting the most direct and precise parameter to evaluate the potential of microalgae as a raw material for the production of biodiesel.

In order to compare the efficiency of both cultivations, we studied the lipid content of each biomass using a gaseous chromatography. The study centered on the lipid profile with each fatty acid identification. Figure 18 shows, for each cultivation, the fatty acid distribution. The most important components for biodiesel production are the fatty acids C16:0 (Palmitic), C18:1 (Oleic), C18:2 (Linoleic), and C18:3 (Linolenic).

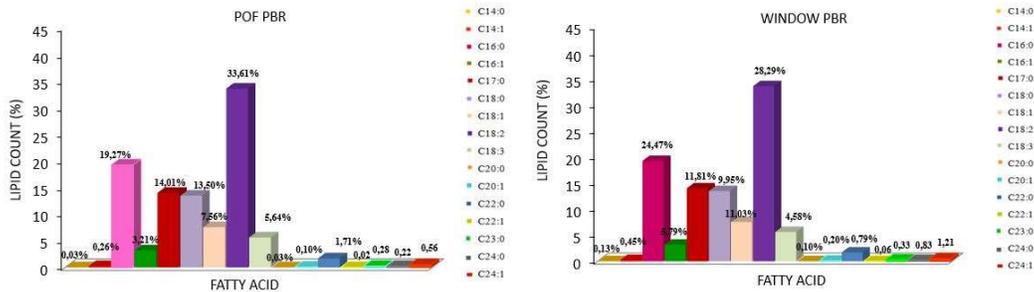


Figure 18. Lipid profile of both cultivations.

We can therefore notice that the results for both cultivations are similar for both PBRs, which allows us to conclude that the proposed solar tracker with low-cost, robust and non-transparent container can be a good solution for a lower cost microalgae production.

In this context, the results obtained in regarding the lipid content for both biomasses of the microalgae *Monoraphidium* sp. showed its potential for the production of biodiesel. Additionally, the biomass of *Monoraphidium* sp. presented LCB level of 30,58±0,05% (POF PBR) and 29,88±0,02% (window PBR) considered to be ideal for biodiesel production.

Conclusion

In relation to microalgae culture, it was verified that the amount of cells produced in both window type PBR and POF PBR with the same solar radiation, was comparable in order of magnitude, showing that it is possible to produce microalgae inside non-transparent low-cost tanks internally illuminated by the proposed system using POFs.

The production costs of the POF PBR is much smaller than that of the conventional window type PBR for the following reasons: No need of refrigeration which saves electric energy, no need of expensive polycarbonate or other transparent material, with the additional advantages of the durability and robustness. The POF PBR presented a limitation related to cloudy days, in which it is not capable of producing any illumination. For circumventing this problem one can use a bank of super luminescent LEDs connected to the POF bundle in order to improve illumination.

The choice of the equatorial mount proved to be very efficient, since it only needs one motor consuming very little energy. Manual declination adjustment during prototype testing has shown to be necessary only every 7 or 15 days (depending on the season) with oversized lens.

The system is able to delivery to a mobile device, such as a cell phone, operational information of the system with less than 20 minutes in delay. Additionally, all past history of the system, as much as a year of operation information is available to the users as all information is saved in a cloud.

With respect to ambience illumination, the solar tracker proved to be able to substitute a 40 W fluorescent light bulb. Thus, considering the irrelevant energy costs of running a stepper motor, each system is capable of saving about 0.5 kWh per day when substituting a light bulb for a 10-hour daily usage.

References

[1] MATRIZ ENERGÉTICA BRASIL, www.suapesquisa.com/energia/matriz_energetica_Brasil.htm, 2018, (accessed in 06/05/2018).

[2] SOLARGIS. Global HORIZONTAL IRRADIATION, www.solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/world, 2017, (accessed in 01/05/2018).

[3] REVE-Wind Energy and Electric Vehicle Magazine, www.evwind.es/2015/06/12/photovoltaic-solar-energy-passes-1-global-threshold/52716, (accessed in 01/12/2018).

[4] SOLAR POWER EUROPE, www.solarpowereurope.org, (accessed in 01/12/2018).

- [5] Fernandes, B. D., Dragone, G. M., Teixeira, J. a., & Vicente, A. a., 2010. Light regime characterization in an airlift photobioreactor for production of microalgae with high starch content. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 161(1-8), 218–26. DOI: 10.1007/s12010-009-8783-9.
- [6] Xue, S., Zhang, Q., Wu, X., Yan, C., & Cong, W., 2013. A novel photobioreactor structure using optical fibers as inner light source to fulfil flashing light effects of microalgae. *Bioresource Technology*, 138, 141–7. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.03.156
- [7] ESTEBAN HINCAPIE, Design, Construction and Validation of an Internally-Lit Airlift Photobioreactor, Design, Construction and Validation of an Internally-Lit Airlift Photobioreactor, MSc thesis at the Russ College of Engineering and Technology, Ohio University, August 2010.
- [8] CARIOU, J. M., DUGAS, J., MARTIN, L., 1982. Transport of solar energy with optical fibres. *Solar Energy*, vol 29, n0 5, 397-406. DOI: doi.org/10.1016/0038-092X(82)90076-7.
- [9] LIANGA, D., MONTEIROA, L. F., 1998. Fiber-optic solar energy transmission and concentration, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol 54, pp. 323 - 331. DOI.org/10.1016/S0927-0248(98)00083-X.
- [10] JARAMILLO, O. A., RIO, J. A., HUELSZ, G., 1999. A thermal study of optical fibres transmitting concentrated solar energy. *Journal of. Physics D: Applied Physics*. Vol. 32, 1000-1005.
- [11] MATSUNAGA T., TAKEYAMA, H., SUDO, H., OYAMA M., et al., 1991. Glutamate production from CO₂ by Marine Cyanobacterium *Synechococcus* sp. Using a novel biosolar reactor employing light-diffusing optical fibers. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. Vol 28/29, 157-167.
- [12] TSANGRASSOULIS, A., DOULOS L., SANTAMOURIS M., 2005. On the energy efficiency of a prototype hybrid daylighting system, *Solar Energy*. Vol 79, n. 79, pp. 56 – 64. DOI: doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.014.
- [13] MUNISAMI, J., KALYMNIOS D., 2008. Novel Technique for Solar Power Illumination using Plastic Optical Fibres Illumination Optics. *SPIE Proceedings 7103, Illumination Optics, 71030D*. DOI: doi.org/10.1117/12.799518.
- [14] OGBONNA J. C., SOEJIMA, T., TANAKA, H., 1999. An integrated solar and artificial light system for internal illumination of photobioreactors. *Journal of Biotechnology*. Vol 70, 289-297.
- [15] HINCAPIE, E., STUART, B., Design, construction, and validation of an internally lit air-lift photobioreactor for growing algae, *Energy Research*, January 2015, DOI: 10.3389/fenrg.2014.00065
- [16] PARANS. About us: Parans. <http://www.parans.com>, 2018. (accessed in 02/12/ 2018).
- [17] HIMAWARI. About us: Himawari. <http://www.himawari-net.co.jp>, 2018, (accessed in 02/07/2018).
- [18] SOLLEKTORR,
<https://www.bavarianoptics.de/solutions/sollektor>;
OU
M. Bloos, P. M. Gotz, H. Poisel, K. Friedrich, International POF Conference 2015, Nurnberg, 2015.
- [19] (ASTM-Reference Solar Spectral Irradiance - ASTM G-173 from the American Society for Testing and Materials (accessed in 05/15/2018).
- [20] <http://redc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/astmg173/astmg173.html>).
- [21] Edmund Optics IR filters, available at <https://www.edmundoptics.com/optics/optical-filters/shortpass-edge-filters/12.5mm-diameter-ir-cut-off-filter/> (accessed in 05/20/2018).

- [22] GORHAM, P. R., 1964. Toxic algae as a Public health hazard. Journal – American Water Works Association. 56, 1481-1488. DOI: doi.org/10.1002/j.1551-8833.1964.tb01355.x
- [23] GAJANUR, N. R., SINGH, A., JAIN, A., 2016. Solar powered railway track monitoring system. IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Shangai, China, 21-23, October 2016. DOI: 10.1109/ICPRE.2016.7871198
- [24] Zhang, X., Du, J., Chengguo F.; Liu, D.; Fang ; J., Wang, L.,. 2017. A Wireless Sensor Monitoring Node Based on Automatic Tracking Solar-Powered Panel for Paddy Field Environment. IEEE Internet of Things Journal. Vol 4, 1304-1311. **DOI:**10.1109/JIOT.2017.2706418
- [25] KABALCI, E., CALPBINICI, A., KABALCI Y., 2015. A single-axis solar tracking system and monitoring software. 7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). Bucharest, Romania, 25-27, June 2015. DOI: 10.1109/ECAI.2015.7301193
- [26] DiLaura, D., Houser, K., Mistrick, R., Steffy, G., Eds, The Lighting Handbook, Illuminating Engineering Society of North America, New York, ISBN 978-087995-241-9, 2011.