



Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia – FAENG
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – PGTA

Gabriel Bastos Braga

**Desenvolvimento de um fotobiorreator automatizado de
baixo custo para estudo de saturação de luz de microalgas**

Campo Grande – MS
Fevereiro de 2018



Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia – FAENG
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – PGTA

Gabriel Bastos Braga

Desenvolvimento de um fotobiorreator automatizado de baixo custo para estudo de saturação de luz de microalgas

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, na área de concentração em Tecnologias de controle da poluição.

Orientador: Prof. Dr. Marc Árpád Boncz

Banca Examinadora

Prof. Dr. Johannes Gerson Janzen
presidente – UFMS/PGTA

Dr. Alessandro Minillo
UEMS

Prof. Dr. Luciano Gonda
UFMS/FACOM

Dr^a. Mayara Leite Serejo
UFMS

Prof. Dr. William Marcos da Silva
UFMS/PGTA

Campo Grande – MS
Fevereiro de 2018

Dedicatória

Aos meus pais Mauricio e Ana Claudia!

Agradecimentos

À CAPES pelo investimento em meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Marc Árpád Boncz pelo seu valioso conhecimento e confiança na minha capacidade.

À Prof.a Dr.^a Paula Loureiro Paulo pelo seu constante apoio.

Ao Prof. Dr. Carlos Nobuyoshi Ide, pelas valiosas dicas.

À Mayara Leite Serejo, amiga de longa data, pela parceria.

Aos meus pais e aos meus irmãos, Pedro e Davi, pelo simples fato de serem quem são, em especial ao Pedro pelas infinitas calibrações dos sensores.

A todos os parceiros do LabE por sempre me apoiarem e torcerem por mim.

À mais bonita, Gabriela Lazari por me manter de pé quando a carga parecia ser insuportável.

Ao terceiro irmão João Paulo pela constante e imensurável ajuda.

A todos os demais professores do PGTA e da graduação que contribuíram com seu valioso conhecimento para a formação do meu.

E a toda equipe e comunidade do Arduino, pois sem a suas colaborações esse trabalho não poderia ter sido realizado.

Sumário

Dedicatória	II
Agradecimentos	III
Lista de Figuras	VII
Lista de Siglas e Abreviaturas	X
Lista de Símbolos	XII
Resumo	1
Abstract	2
1 Introdução Geral	3
1.1 A matriz energética e os biocombustíveis	3
1.2 Potencial energético das microalgas.....	4
1.3 Tecnologias de cultivo de microalgas	5
1.3.1 Sistemas Abertos	5
1.3.2 Sistemas Fechados.....	6
1.4 Incompatibilidades da produção em larga escala	6
1.4.1 Controle da temperatura em fotobiorreatores.....	7
1.5 Causas do superaquecimento.....	7
1.6 Efeito da luz intermitente	9
1.7 Escopo e Estrutura da Tese.....	10
1.8 Referências Bibliográficas.....	11
2 Desenvolvimento de um fotobiorreator automatizado para cultivo de microalgas	16
2.1 Introdução.....	16
2.2 Processo de dimensionamento e fabricação do reator.....	17

2.3	Sistema de controle da temperatura.....	20
2.3.1	Compartimento do fluido trocador de calor	20
2.3.2	Bomba de recirculação	21
2.3.3	Bloco trocador de calor	22
2.4	Sistema de ajuste da radiação luminosa	23
2.4.1	Método de ajuste do fluxo luminoso	24
2.5	Sistema de monitoramento dos parâmetros de cultivo	25
2.6	Sistema central de controle e processamento.	28
2.7	Referências Bibliográficas.....	33
3	Turbidímetro on-line de baixo custo para monitorar a qualidade da água	35
Resumo	35
3.1	Introdução.....	36
3.2	Material e Métodos.....	38
3.3	Resultados e Discussão.....	41
3.4	Conclusões.....	44
3.5	Referências Bibliográficas.....	45
4	Otimização da incidência de luz para redução do superaquecimento em fotobiorreatores.....	47
4.1	Introdução.....	47
4.2	Material e Métodos.....	50
4.3	Resultados e Discussão.....	51
4.4	Conclusões.....	53
4.5	Referências Bibliográficas.....	54
5	Efeito da luz intermitente em fotobiorreatores	57

5.1	Introdução.....	57
5.2	Material e Métodos.....	58
5.3	Resultados e Discussão.....	59
5.4	Conclusões.....	62
5.5	Referências Bibliográficas.....	63
6	Conclusões gerais e recomendações.....	64
6.1	Conclusões.....	64
6.2	Recomendações para trabalhos futuros	65

Lista de Figuras

- Figura 1.1** - Ilustrações de três modalidades de cultivo de microalgas, A – Sistema Aberto, *raceway pond*, B – Sistema Fechado, fotobiorreator tubular, C – Sistema Fechado, fotobiorreator de placa plana. 5
- Figura 1.2** - Curva de saturação de luz de um cultivo de microalgas e seus respectivos regimes..... 9
- Figura 2.1** - Perspectiva isométrica dos dois compartimentos do fotobiorreator e sus respectivas tampas, I - compartimento do fluido trocador de calor, II - tampa do compartimento do fluido trocador de calor, III–rebaixo para encaixe de compartimento de cultivo, IV - tampa do compartimento de cultivo, V - suporte dos sensores, VI - compartimento de cultivo..... 18
- Figura 2.2** - Vista Superior interna do fotobiorreator, I – compartimento de cultivo, II – compartimento do fluido trocador de calor, III – placa de LEDs, IV – dissipador de calor de alumínio da placa de LEDs, V – saída do fluido trocador de calor, VI – entrada do fluido trocador de calor..... 19
- Figura 2.3** - Esquema em três dimensões da montagem do bloco trocador de calor, da esquerda para direita temos: *cooler*, bloco dissipador de alumínio, duas pastilhas termoeletricas, bloco de cobre, anel de borracha, placa de acrílico e parafusos de fixação..... 22
- Figura 2.4** - Correlação entre o a intensidade da luz em lux (luxímetro Solara 2000) e o fluxo luminoso (sensor medidor de PAR LI-190R da LI-COR), resultado da iluminação por LED na cor branco frio, 6500 K..... 25
- Figura 2.5** - Vista superior da tampa do compartimento de cultivo com a indicação dos orifícios para inserção dos sensores, I - Sensor de condutividade elétrica, II - Sensor de oxigênio dissolvido, III - Sensor de temperatura do cultivo, IV - abertura para inspeção, V - sensor de turbidez, VI - Sensor de pH..... 27
- Figura 2.6** - Exemplo do registro dos dados dos sensores que não puderam ser conectados ao microcontrolador, I - condutividade elétrica, II - temperatura do cultivo, III - oxigênio dissolvido, IV - pH, V - temperatura do cultivo..... 28
- Figura 2.7** - Digrama das ligações elétricas do sistema central de controle e processamento. I - bomba de recirculação, II - cooler, III - série de pastilhas termoeletricas, IV - módulo de relê de 4 canais, V - módulo de relê de 1 canal, VI - placa de LED, VII - Arduino Uno R3, VIII - sensores de temperatura DS18B20, IX - PCI auxiliar do sensor de turbidez, X - Sensor de turbidez TSW-10. 30

Figura 2.8 - Trechos do código de programação do microcontrolador que fazem referência à implementação do controlador PID.....	31
Figura 2.9 - Performance do controlador PID sobre a temperatura de dois cultivos com intensidade de interferência distintas. Acima, iluminado com 1750 $\mu\text{mol}(\text{fótons}).\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, abaixo, 2500 $\mu\text{mol}(\text{fótons}).\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	32
Figura 3.1 - A) Esquema da ligação elétrica do sistema proposto. I - sensor de temperatura DS18B20, II - sensor de turbidez TSW-10, III - PCI auxiliar. B) Detalhe do funcionamento do sensor de turbidez de máquina de lavar roupas. I - fototransistor, II - Encapsulamento de plástico transparente, III - LED infravermelho, IV - pino 1, V - pino 2, VI - pino 3.....	39
Figura 3.2 - A) Diagrama elétrico do sensor de turbidez de máquina de lavar roupas. B) Detalhe do princípio de funcionamento do circuito eletrônico do fototransistor (dispositivo receptor de radiação).....	40
Figura 3.3 - Sinal obtido pelo sensor (em mV) a partir de determinada turbidez na amostra analisada. Detalhe: resultados a partir de amostras com turbidez entre 0 e 100 UNT.....	42
Figura 3.4 - Turbidez calculada a partir do sinal do sensor, comparado com a turbidez medida da amostra, média de C1 e C2. O gráfico à direita é uma parte do gráfico à esquerda. Transformação do sinal em um valor de turbidez usando uma função de terceiro grau permite boa precisão. Linha em vermelha identifica: $\text{turbidez}_{\text{medida}} = \text{turbidez}_{\text{calculada}}$	43
Figura 3.5 - Curva do sinal obtido em função da variação da temperatura, sensor submerso em água deionizada.....	44
Figura 4.1 - Resultado do monitoramento da produção de Oxigênio nos instantes iniciais de cada cultivo.....	51
Figura 4.2 - Taxa de produção das microalgas durante as 20 horas de cultivo, para os cultivos com turbidez inicial de 10, 50 e 100 UNT.....	52
Figura 4.3 - Gráfico da diferença entre a temperatura do cultivo e fluido trocador de calor em um período de uma hora em que ambas temperaturas permaneceram constante..	53
Figura 5.1 - Resultado do monitoramento da produção de Oxigênio nos instantes iniciais de cada cultivo.....	60
Figura 5.2 - Gráfico da resposta do experimento fatorial 2^k em termos da taxa da produção de microalgas (em $\text{mg}_{\text{microalgas}}.\text{L}^{-1}.\text{d}^{-1}$).	60
Figura 5.3 - Superfície da resposta do experimento fatorial 2^k	61

Figura 5.4 - Boxplot da diferença entre a temperatura do cultivo e da temperatura do fluido trocador de calor em um período de uma hora em que ambas temperaturas permaneceram constante..... 62

Lista de Siglas e Abreviaturas

ATP	<i>Adenosine Tri Phosphate</i> (Adenosina Trifosfato)
ATX	Advanced Technology Extended (Tecnologia Avançada Estendida)
BBM	<i>Bold's Basal Medium</i> (Meio de cultivo básico de Bold)
Bit	<i>Binary Digit</i> (Dígito Binário)
CE	Condutividade Elétrica
DC/DC	Corrente Contínua (<i>Direct Current</i>) para Corrente contínua
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
EVA	<i>Ethylene-Vinyl Acetate</i> (Acetato-Vinilo de Etileno)
IR	<i>Infrared</i> (Infravermelho)
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Tela de Cristal Líquido)
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i> (Resistor Dependente De Luz)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodos Emissores de Luz)
M5	Padrão de Rosca no Sistema Internacional de 5 mm
MDF	<i>Medium-Density Fiberboard</i> (Placa de Fibra de Média Densidade)
NPT	<i>National Pipe Thread</i> (Padrão Americano de Roscas para Canos)
NREL	<i>National Renewable Energy Lab</i> (Laboratório Nacional de Energias Renováveis)
OD	Oxigênio Dissolvido
PAR	<i>Photosynthetically Active Radiation</i> (Radiação Fotossinteticamente Ativa)
PCI	Placa de Circuito Impresso
pH	Potencial Hidrogeniônico
PID	Proporcional Integral Derivativo
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> (Policloreto de Vinila)
rpm	Rotações por Minuto
SMD	Surface-Mount Device (Dispositivos de Montagem Superficial)
SST	Sólidos Suspensos Totais
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i> (Poliuretano Termoplástico)

<i>Trimpot</i>	<i>Trimmer Potentiometer</i> (Potenciômetro em Miniatura Ajustável)
UV	<i>Ultraviolet</i> (Ultravioleta)
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbidez
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)

Lista de Símbolos

A	Ampere
\approx	Aproximadamente
cm	Centímetro
CO ₂	Dióxido de Carbono
g	Gramma
g.L ⁻¹	Gramma por Litro
gSST.l ⁻¹	Gramma de Sólidos Suspensos Totais por Litro
°C	Grau Celsius
Hz	Hertz
K	Kelvin
L	Litro
Lm	Lumen
Lx	Lux
MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	Mega Joule por Metro Quadrado por Dia
mg	Miligramma
mg.l ⁻¹	Miligramma por Litro
mg.l ⁻¹ .d ⁻¹	Miligramma por Litro por Dia
ms	Milissegundo
min	Minuto
µm	Micrômetro
µmol fótons .m ⁻² .s ⁻¹	Micro Mol de fótons por Metro Quadrado por Segundo
µS.cm ⁻¹	Micro-Siemens por Centímetro
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mV	Milivolt
mV.ua ⁻¹	Milivolt por Unidades Arbitrárias
M	Molar
nm	Nanômetro
N ₂	Nitrogênio Gasoso
Ω	Ohms

O ₂	Oxigênio Gasoso
¹ O ₂	Oxigênio Singlete
”	Polegada
KB	Quilobyte
kg	Quilograma
rpm	Rotações por Minuto
ua	Unidades Arbitrárias
V	Volt
W	Watt

Resumo

Apesar do seu grande potencial, o uso das microalgas para fins energéticos ainda não alcançou viabilidade econômica, devido ao elevado custo de produção das mesmas. Um dos principais gargalos de sua produção em larga escala é a quantidade de energia necessária para o controle da temperatura durante o cultivo em fotobiorreatores. O presente trabalho procurou entender as causas do superaquecimento em fotobiorreatores e traçar estratégias visando combatê-lo. Para tal foram obtidas experimentalmente as curvas de saturação de luz de microalgas a partir de três concentrações iniciais diferentes. Em cultivos com baixa concentração inicial de microalgas, a saturação de luz pode ser observada apenas avaliando a produção de oxigênio nos primeiros instantes. Entretanto, os efeitos do excesso de radiação são melhor observados ao considerar a produção de biomassa ao longo de um prazo maior de cultivo, pois estes efeitos podem demorar a se manifestar na taxa de produção, não afetando inicialmente, mas podendo inviabilizar a continuidade do crescimento a longo prazo. Uma boa estratégia para redução dos custos com dissipação de calor no cultivo de microalgas em fotobiorreatores, seria, além de evitar a incidência das radiações infravermelho e ultravioleta, limitar a radiação visível com intensidade acima de $1000 \mu\text{mol f\u00f3tons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Outra estratégia para reduzir o superaquecimento em fotobiorreatores pode ser o fornecimento de luz intermitente, alternando curtos intervalos de luz e escuridão; tal medida pode melhorar o desempenho da produção de microalgas e reduzir a demanda por dissipação de calor. Entretanto, deve-se investigar a aplicação de pulsos com frequências maiores que mantenham a taxa de produção com intervalos de escuro maiores visando aprimorar a eficiência energética. O presente estudo foi possibilitado através do desenvolvimento de um fotobiorreator automatizado de baixo custo. Dotado de um microcontrolador, o reator foi capaz de, através da implementação de controlador PID, controlar a temperatura de cultivo independente das interferências externas e automaticamente, capturar e armazenar *on-line* os dados dos diversos sensores utilizados para monitorar o cultivo experimental de microalgas. Com o uso do mesmo microcontrolador, também foi possível adaptar um sensor de turbidez de baixo custo e calibrá-lo para obter uma precisão comparável àquela dos equipamentos comerciais para laboratório, desde que respeitado o seu modo de operação: trabalhar com temperatura constante ou realizar uma segunda calibração com pelo menos 3 temperaturas diferentes dentro da faixa esperada de operação

Abstract

Despite its great potential, the use of microalgae for energy production purposes is not economically viable yet, due to their high production costs. One of the major bottlenecks for their large-scale production is the energy consumption for temperature control in photobioreactors used for their cultivation. The present work sought to understand the causes of overheating in photobioreactors, in order to outline strategies to reduce this overheating. Thus, microalgae light saturation curves were experimentally obtained for cultivation starting from three different initial concentrations. In cultures with low initial microalgae concentration, the light saturation can be observed directly, by simply evaluating the initial oxygen production rate. However, the effects of excess radiation are best observed when considering the biomass production over a longer period of growth, as inhibitory effects may be slow to manifest themselves in the rate of production. The biomass production rate is not affected initially, but excess illumination may impede continued growth in the long run. A good strategy to reduce heat dissipation costs in photobioractors for microalgae cultivation would be not only to avoid the incidence of infra-red and ultraviolet radiation, but to limit visible radiation with intensity above $1000 \mu\text{mol}_{\text{photons}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Another strategy to reduce overheating in photobioreactors may be to provide flashing light, alternating short intervals of light and dark. Such a measure improves the performance of microalgae production and reduces the demand for heat dissipation. This flashing was investigated here, but the use of higher frequencies, in order to maintain a production rate with large ranges and increasing energy efficiency, must still be evaluated. Executing this study required the development of an automated low cost photobioreactor. Equipped with a microcontroller, this reactor was able, through the implementation of a PID controller, to control the growth temperature regardless of external interferences and automatically capture and store online data of the sensors used to monitor the experimental microalgae growth, including the amount of heat dissipation. Through the use of the same microcontroller, it was also possible to adapt a low-cost turbidity sensor and calibrate it to measure turbidity continuously, with an accuracy comparable to that of commercial laboratory equipment, provided that it operates in one of two modes: either operating at constant temperature, or operating after carrying out a second calibration with at least 3 different temperatures within the expected range of operation.

1 Introdução Geral

1.1 A matriz energética e os biocombustíveis

Desde a revolução industrial, a maior parcela da demanda energética global é suprida por combustíveis fósseis (derivados do petróleo, carvão mineral e gás natural). O uso extensivo de tais recursos resulta em uma enorme emissão de dióxido de carbono, entre outros poluentes, na atmosfera, provocando efeitos nocivos ao meio ambiente. Além disso, os combustíveis fósseis são recursos finitos. Por essas razões, torna-se evidente a necessidade de explorar fontes alternativas de energia renováveis e sustentáveis (Simionato *et al.*, 2013).

Dentre as diferentes possibilidades, os organismos fotossintetizantes se destacam devido a sua capacidade de armazenar quimicamente a energia proveniente do sol. Nesse processo, a radiação eletromagnética é utilizada para formação de ligações químicas durante a síntese da biomassa, essa por sua vez, pode ser transformada em biocombustível através de diferentes processos, como a fermentação de carboidratos na produção de etanol, a transesterificação de lipídeos na produção de biodiesel (Ríos *et al.*, 2013), ou a digestão anaeróbia de compostos orgânicos na produção de biogás (De Schamphelaire & Verstraete, 2009).

Os diversos biocombustíveis atualmente disponíveis no mercado, são produzidos principalmente a partir de plantas terrestres, também chamados de biocombustíveis de primeira geração, como, por exemplo, o etanol, proveniente da cana-de-açúcar ou milho, e o biodiesel, produzido a partir de plantas oleaginosas como soja, girassol, canola, mamona ou palma. Entretanto, tais culturas demandam extensas áreas agricultáveis, um intenso volume de água potável e fertilizantes. Por consequência, causam pressão sobre o preço dos alimentos, bem como ameaçam a biodiversidade e os ecossistemas locais (Chen *et al.*, 2011; Leite *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2011).

Torna-se, assim, necessário o desenvolvimento de tecnologias que sejam mais eficientes quanto ao uso do solo, que passem a permitir a utilização de áreas improdutivas e que incluam também o aproveitamento de efluentes no seu processo produtivo. Uma das alternativas que

atende aos requisitos mencionados e que vem tendo bastante atenção da comunidade científica é a produção de biocombustíveis a partir da biomassa de microalgas, assunto explorado pela primeira vez no hoje extinto “Aquatic Species Program” do National Renewable Energy Lab (NREL) nos EUA na década de 1970, como resposta às duas sucessivas crises do petróleo (Sheehan *et al.*, 1998).

1.2 Potencial energético das microalgas

As microalgas são microrganismos unicelulares, autotróficos e fotossintetizantes. Devido a sua estrutura simples, toda energia recebida é direcionada para seu crescimento e reprodução, o que as difere das plantas terrestres. Segundo Demirbas (2009), as microalgas possuem o mais rápido crescimento dentre todos os organismos fotossintetizantes. Algumas espécies conseguem dobrar sua massa várias vezes durante um único dia (Singh *et al.*, 2011). As microalgas podem produzir de 30 a 100 vezes mais energia por hectare em comparação às culturas terrestres convencionais (Demirbas, 2010). Trata-se de um microrganismo altamente resistente, capaz de se desenvolver em condições adversas, encontrado em todos os ecossistemas existentes na Terra (Mata *et al.*, 2010).

A biomassa das microalgas é constituída principalmente por três componentes: carboidratos, proteínas e lipídios (Rawat *et al.*, 2012). Há ainda a possibilidade de, ao se controlar as condições de cultivo, um destes grupos de componentes ser acumulado em maior proporção no interior de suas células, por exemplo, para aumentar o aproveitamento das microalgas para fins energéticos (George *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2013). Através de processos (bio) químicos, os lipídios e os carboidratos podem ser convertidos em biodiesel ou etanol, respectivamente (Ríos *et al.*, 2013), ou ainda em biogás (De Schamphelaire & Verstraete, 2009).

As microalgas possuem uma simples necessidade nutricional. Para produzirem biomassa, de forma autotrófica, dependem essencialmente de luz solar, dióxido de carbono, macronutrientes (como nitrogênio e fósforo), e alguns micronutrientes (Amaro *et al.*, 2011). Devido à capacidade das microalgas em utilizar no seu metabolismo os nutrientes encontrados em efluentes domésticos e industriais, mesmo após um tratamento convencional, recentemente, tem se dado ênfase ao tratamento de esgoto em combinação com a produção de microalgas como matéria prima para biocombustíveis. Essa combinação apresenta potencialidade para diminuir os custos de ambos os processos (Aravantinou *et al.*, 2013;

Chinnasamy *et al.*, 2010; Christenson & Sims, 2011; Kumar *et al.*, 2010; Lizzul *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2013).

1.3 Tecnologias de cultivo de microalgas

Os sistemas de cultivo de microalgas são comumente classificados entre sistemas abertos e fechados. Por definição, as principais características que os distinguem tratam-se de que nos sistemas fechados a luz não incide diretamente sobre a superfície do cultivo, uma vez que, não há um contato direto entre a cultura e a atmosfera. Cada um dos sistemas, portanto, contem suas vantagens e desvantagens (Grobbelaar, 2009).

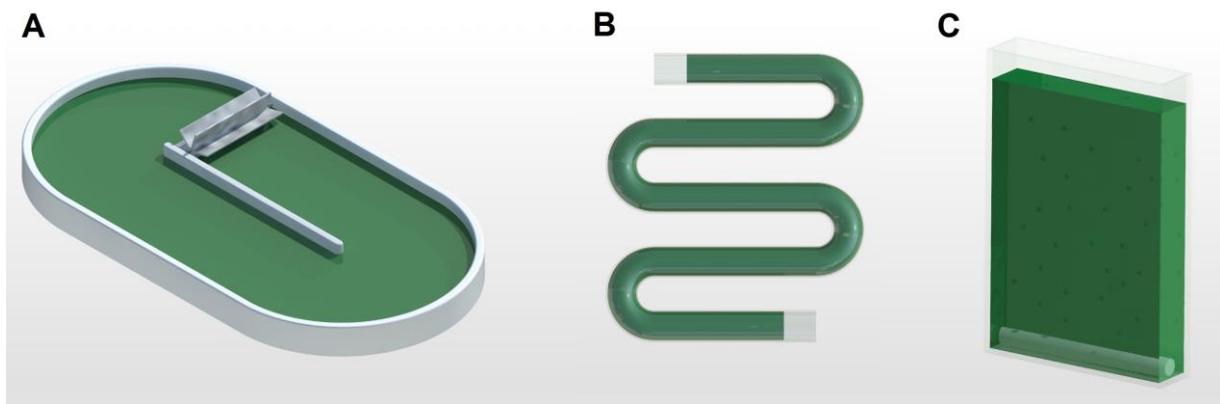


Figura 1.1 - Ilustrações de três modalidades de cultivo de microalgas, A – Sistema Aberto, *raceway pond*, B – Sistema Fechado, fotobiorreator tubular, C – Sistema Fechado, fotobiorreator de placa plana.

1.3.1 Sistemas Abertos

Os sistemas abertos correspondem ao mais simples e antigo método de produção de microalgas, suas vantagens incluem construção e operação fáceis e de baixo custo. Dentre os formatos o mais amplamente utilizado são as chamadas lagoas abertas ou *raceway ponds*, Figura 1.1A, que consistem em tanques rasos de 20 a 45 cm de profundidade, em forma de canais cíclicos, que para prover a circulação da solução são dotados de um agitador de paletas ou *paddle wheel*. Escavados no solo, para evitar a infiltração da água, os canais são revestidos por concreto ou uma membrana plástica (Demirbas, 2010; Zhou *et al.*, 2015).

Devido à utilização de uma espessa lamina d'água e por disporem de uma agitação pouca intensa, as lagoas abertas não contam, porém, com aproveitamento eficiente da luz. O efeito de auto sombreamento de suas células impede a penetração da luz em camadas mais profundas resultando em baixas concentrações de microalgas, o que posteriormente eleva o

custo de separação, pois maiores volumes necessitam ser processados. Demais desvantagens dos sistemas abertos incluem perda de água por evaporação, susceptibilidade às variações climáticas e contaminação por espécies invasoras (Arbib *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2013).

1.3.2 Sistemas Fechados

Visando obter um ambiente de cultivo com alto nível de controle foram desenvolvidos os sistemas fechados, também denominados de fotobiorreatores. Para permitir a penetração de luz solar ou artificial, os fotobiorreatores são tanques feitos a partir de materiais como vidro, acrílico ou outros plásticos transparentes. Dentre os diversos formatos desenvolvidos, os mais frequentemente estudados são: placa plana, Figura 1.1C, tubular, Figura 1.1B, helicoidal, e coluna de bolhas ou *airlift*. Todos estes tipos de reatores contam com elevado controle dos parâmetros de cultivo como: temperatura, pH, e concentrações de CO₂ e O₂ (Demirbas, 2010).

Devido à elevada taxa de mistura da solução em um ambiente altamente controlado, com maior aproveitamento da luz, essa modalidade de cultivo obtém maior eficiência na produção de microalgas, cuja concentração atingida pode ser até 30 vezes superior em comparação às lagoas abertas (Pegallapati *et al.*, 2012).

Em contrapartida, a manutenção de condições controladas nos sistemas fechados resulta em um consumo maior de energia. Como para aprimorar a penetração da luz, utilizam uma reduzida lamina d'água ou caminho ótico (*light path*) e não permitem a evaporação da água do meio de cultivo, esses sistemas são mais propensos ao superaquecimento, mesmo em poucas horas de exposição à luz solar, o que torna necessário o uso de dispositivos de resfriamento, elevando os custos operacionais (Hindersin *et al.*, 2013).

1.4 Incompatibilidades da produção em larga escala

Apesar de muito promissora, a exploração de microalgas como fonte de energia ainda enfrenta alguns obstáculos. Historicamente, as atuais tecnologias de produção de microalgas foram desenvolvidas para atender à demanda de indústrias como cosmética, farmacêutica e de suplemento alimentar. Tais tecnologias visam o fornecimento de biomassa de microalgas para a extração de compostos orgânicos de alto valor, tais como pigmentos, antioxidantes, proteínas e ácidos graxos poli-insaturados (Batista *et al.*, 2013). Dessa forma, portanto, não foram priorizados processos com alta eficiência energética, tornando a aplicação dessas tecnologias inadequadas, em larga escala, para a produção de biocombustíveis.

Uma das principais incompatibilidades das atuais tecnologias de produção de microalgas para fins energéticos é o custo com controle de temperatura em fotobiorreatores. Segundo Morweiser e colaboradores (2010), o custo com controle de temperatura é um parâmetro crítico do processo e causa um grande impacto em seu balanço energético.

1.4.1 Controle da temperatura em fotobiorreatores

A temperatura ótima de cultivo varia de acordo com a espécie de microalga. Mas, independente da espécie cultivada, um superaquecimento pode trazer prejuízo às taxas de crescimento, podendo até causar um colapso no cultivo. Possuindo temperaturas ótimas em torno de 30 °C, a *Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp. são dois gêneros de microalgas amplamente utilizadas em estudos visando a produção de biocombustíveis.

Para então garantir a eficiência da produção de microalgas em fotobiorreatores, sob a ação de condições externas, há a necessidade de se adotar sistemas de controle de temperatura. Os dispositivos descritos na literatura são basicamente os trocadores de calor (Briassoulis *et al.*, 2010; Kochem *et al.*, 2014; Masojídek *et al.*, 2003; Sierra *et al.*, 2008) ou sistemas de evaporação de água pulverizada na superfície do reator (Cheng-Wu *et al.*, 2001; Chini Zittelli *et al.*, 1999; Torzillo *et al.*, 1986). Todavia, tais práticas implicam no aumento do custo operacional em função de seu constante consumo de energia. O problema principal é que estas alternativas paliativas não combatem as causas do superaquecimento, buscam apenas conter seus efeitos.

1.5 Causas do superaquecimento

Dentre as diversas fontes de luz existentes, um sistema de produção de biomassa ideal deve conseguir aproveitar a luz solar, uma vez que em um sistema de cultivo baseado em luz artificial o consumo de energia, referente à iluminação, sempre será maior que o teor energético armazenado pelas microalgas. O Brasil apresenta excelentes condições para a produção de microalgas devido à intensa incidência solar ao longo de todas as estações do ano, podendo chegar, em determinadas regiões, a uma insolação média diária de aproximadamente 24 MJ.m⁻².dia⁻¹ por até 10 horas, segundo ao Atlas Solarimétrico do Brasil (ASB, 2000).

Entretanto, nem toda energia proveniente do sol pode ser aproveitada pelas microalgas. A radiação solar chega à superfície terrestre com espectro de radiação variando entre 300 e

4000 nm, porém a radiação com comprimento de onda superior a 750 nm (infravermelho, *infrared* - IR), representando de 40% a 55% da energia total proveniente do sol (Goetz *et al.*, 2011; Morweiser *et al.*, 2010), não possui energia quântica suficiente para as transformações químicas ocorridas na fotossíntese, assim, tem como efeito apenas o aumento da temperatura (Carvalho *et al.*, 2011).

Por sua vez, a radiação ultravioleta, cujo comprimento de onda é inferior a 380 nm, correspondendo a 5% da energia total proveniente do sol, possui efeito ionizante e assim é altamente nociva às microalgas (Carvalho *et al.*, 2011). Para o controle eficaz da temperatura, tanto a radiação infravermelha quanto a ultravioleta devem ser evitadas.

Dessa forma, apenas o intervalo de espectro de 380 a 750 nm, no qual está compreendida a luz visível, pode ser usado para a atividade fotossintetizante. Todavia, se a intensidade de luz visível incidente ultrapassar a quantidade de energia requerida para as microalgas, essa é dissipada na forma de calor como medida de defesa para preservar a integridade das proteínas responsáveis pela fotossíntese, através dos carotenoides (Carvalho *et al.*, 2011; Masojídek *et al.*, 2003).

A relação fundamental entre a intensidade de luz e a taxa de fotossíntese das microalgas é descrita pela curva de saturação de luz, Figura 1.2, a qual possui três regimes de luz distintos: limitação, saturação ou inibição (Béchet *et al.*, 2013), como detalhado a seguir:

1. No primeiro regime, a luz, fornecida em intensidade abaixo do requerido pelas microalgas, encontra-se em condição de limitação. A taxa de crescimento das microalgas usualmente se correlaciona linearmente com a intensidade de luz. Assim, um aumento na intensidade de luz provoca um acréscimo na taxa de crescimento;
2. Quando a intensidade da luz atinge um limite de saturação, as microalgas se tornam “saturadas pela luz”. No qual o aumento na intensidade de luz não mais provoca um acréscimo na taxa de crescimento. Nesse regime a radiação visível excedente é dissipada na forma de calor como mecanismo de defesa;
3. Se a intensidade da luz continuar aumentando e ultrapassar um segundo limite, de inibição, a taxa de crescimento das microalgas passa a decrescer com o aumento da intensidade de luz. Uma vez esgotada a capacidade de dissipação por calor, a energia

excedente provoca a formação de radicais livres, responsáveis pela desativação de proteínas chaves para fotossíntese (Morweiser *et al.*, 2010).

Em condição de fotoinibição, substâncias altamente oxidativas, como o radical livre oxigênio singlete (1O_2), são formadas próximas aos pigmentos. Tais substâncias podem facilmente degradar os pigmentos e proteínas responsáveis pela fotossíntese. Para preservar sua sobrevivência, a microalga passa a utilizar a energia que seria empregada em seu crescimento e reprodução para ressintetizar às moléculas danificadas, afetando negativamente sua taxa de crescimento (Simionato *et al.*, 2013).

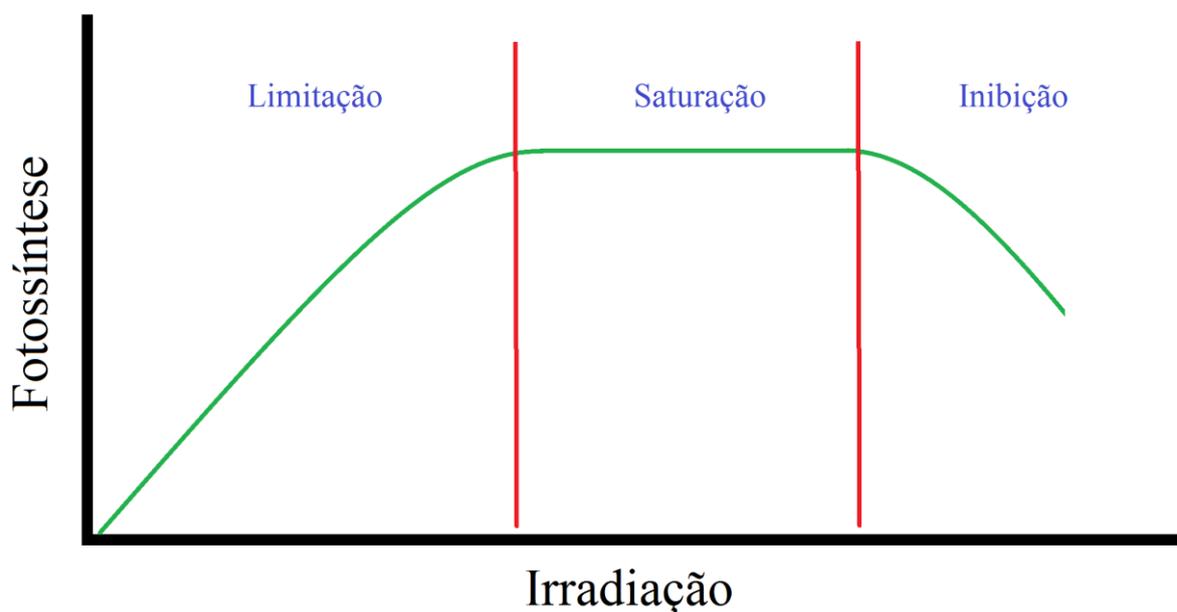


Figura 1.2 - Curva de saturação de luz de um cultivo de microalgas e seus respectivos regimes.

Para combater o superaquecimento e não afetar a taxa de crescimento das microalgas em fotobiorreatores, devem ser evitadas não apenas as radiações infravermelha e ultravioleta, mas também a radiação visível fornecida além do nível de saturação. Por outro lado, a incidência de luz visível não deve ser reduzida de forma generalizada, pois em períodos de menor insolação, intensidade da luz pode tornar-se limitante para o crescimento.

1.6 Efeito da luz intermitente

As unidades fotossintéticas das microalgas necessitam aproximadamente de 100 milissegundos para converter a energia luminosa em ATP. Durante tal período, qualquer fóton que atingir a unidade fotossintética será desperdiçado. Por consequência, células

expostas à luz intermitente com ciclos de claro/escuro na ordem de 100 ms desperdiçam menos energia luminosa em comparação àquelas expostas a luz contínua. O aumento da eficiência da fotossíntese resultante da exposição à luz intermitente denomina-se de efeito da luz intermitente ou *flashing light effect* (Béchet *et al.*, 2013).

Estudos recentes mostram que, as microalgas conseguem manter a eficiência do crescimento quando irradiadas a uma intensidade luminosa em até oito vezes superior ao seu nível de saturação de luz, caso esta seja fornecida intermitentemente (Simionato *et al.*, 2013). Em ciclos na ordem de milissegundos alternados por um intervalo escuro, o fornecimento de luz em pequenos pulsos, possibilita que a energia excedente acumulada seja devidamente dissipada, antes que se formem os radicais livres. O que reduz a degradação dos pigmentos e proteínas chaves responsáveis pela fotossíntese, conseqüentemente, favorecendo a taxa de crescimento das microalgas (Carvalho *et al.*, 2011; Morweiser *et al.*, 2010).

1.7 Escopo e Estrutura da Tese

Uma vez que a radiação eletromagnética fornecida pelo sol, em recorrentes instantes do dia, incide em quantidade e qualidade além do requerido pelas microalgas, para combater as causas do superaquecimento em fotobiorreatores, faz-se necessário adotar estratégias que limitem parcialmente a radiação incidente, diminuindo a energia total absorvida pelas microalgas.

Entretanto, para definir uma estratégia eficiente de limitação da radiação incidente é primeiro necessário estudar as necessidades energéticas das microalgas, ou seja, obter experimentalmente as curvas de saturação de luz das mesmas, conforme Figura 1.2. Para tal é necessário criar um ambiente de cultivo altamente controlado, de modo que seja possível isolar as diversas variáveis envolvidas no cultivo de microalgas e variar apenas a entrada na qual seu efeito na resposta deseja ser avaliado, e de preferência monitorar os demais parâmetros de modo a garantir que os mesmos permaneceram controlados durante toda a duração do cultivo experimental.

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um protótipo de fotobiorreator, em escala de bancada, de baixo custo, capaz de criar um ambiente controlado para cultivo de microalgas e automaticamente capturar e armazenar *on-line* os dados dos parâmetros de cultivo, de modo a possibilitar a obtenção das curvas de saturação de luz das microalgas. E

subsequentemente, dotado de tais informações, ser capaz de traçar estratégias que visam combater as causas do superaquecimento em fotobiorreatores.

No Capítulo 2, denominado “Desenvolvimento de um fotobiorreator automatizado para cultivo de microalgas”, é apresentada a descrição detalhada do processo de construção e funcionamento do protótipo do fotobiorreator automatizado.

O Capítulo 3, denominado “Turbidímetro *on-line* de baixo custo para monitorar a qualidade da água”, apresenta um artigo científico submetido para publicação que descreve a adaptação e calibração de um sensor de turbidez de máquina de lavar roupas, instalado no fotobiorreator, para monitorar a turbidez do cultivo experimental de microalgas.

O Capítulo 4, denominado “Otimização da incidência de luz para redução do superaquecimento em fotobiorreatores”, contém a descrição do cultivo experimental de microalgas que resultou na obtenção das curvas de saturação de luz e discute sobre a estratégia de combate ao superaquecimento de fotobiorreatores por meio da atenuação da incidência de luz.

O Capítulo 5, denominado “Efeito da luz intermitente em fotobiorreatores”, apresenta o resultado da investigação do efeito da luz intermitente na taxa de crescimento das microalgas e avalia sua aplicação no combate ao superaquecimento de fotobiorreatores.

As conclusões gerais e recomendações da tese são apresentadas no Capítulo 6.

1.8 Referências Bibliográficas

- Amaro, H.M., Guedes, A.C., Malcata, F.X. (2011). Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Applied Energy*, **88**(10), pp. 3402-3410.
- Aravantinou, A.F., Theodorakopoulos, M.A., Manariotis, I.D. (2013). Selection of microalgae for wastewater treatment and potential lipids production. *Bioresource Technology*, **147**, pp. 130-134.
- Arbib, Z., Ruiz, J., Alvarez-Diaz, P., Garrido-Perez, C., Barragan, J., Perales, J.A. (2013). Long term outdoor operation of a tubular airlift pilot photobioreactor and a high rate algal pond as tertiary treatment of urban wastewater.(Report). *Ecological Engineering*, **52**, pp. 143-153.

- ASB. (2000). Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres. Chigueru Tiba coordenador do projeto, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Grupo Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia da UFPE, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, Ministério de Minas e Energia, ELETROBRAS, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.
- Batista, A.P., Gouveia, L., Bandarra, N.M., Franco, J.M., Raymundo, A. (2013). Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products. *Algal Research*, **2**(2), pp. 164-173.
- Briassoulis, D., Panagakis, P., Chionidis, M., Tzenos, D., Lalos, A., Tsinos, C., Berberidis, K., Jacobsen, A. (2010). An experimental helical-tubular photobioreactor for continuous production of *Nannochloropsis* sp. *Bioresource Technology*, **101**(17), pp. 6768-6777.
- Béchet, Q., Shilton, A., Guieysse, B. (2013). Modeling the effects of light and temperature on algae growth: State of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation. *Biotechnology Advances*, **31**, pp. 1648-1663
- Carvalho, A., Silva, S., Baptista, J., Malcata, F.X. (2011). Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **89**(5), pp. 1275-1288.
- Chen, C.-Y., Yeh, K.-L., Aisyah, R., Lee, D.-J., Chang, J.-S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, **102**(1), pp. 71-81.
- Cheng-Wu, Z., Zmora, O., Kopel, R., Richmond, A. (2001). An industrial-size flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis* sp. (Eustigmatophyceae). *Aquaculture*, **195**(1-2), pp. 35-49.
- Chini Zittelli, G., Lavista, F., Bastianini, A., Rodolfi, L., Vincenzini, M., Tredici, M.R. (1999). Production of eicosapentaenoic acid by *Nannochloropsis* sp. cultures in outdoor tubular photobioreactors. *Journal of Biotechnology*, **70**(1-3), pp. 299-312.

- Chinnasamy, S., Bhatnagar, A., Hunt, R.W., Das, K.C. (2010). Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications. *Bioresource Technology*, **101**(9), pp. 3097-3105.
- Christenson, L., Sims, R. (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnology Advances*, **29**(6), pp. 686-702.
- De Schampelaere, L., Verstraete, W. (2009). Revival of the biological sunlight - to - biogas energy conversion system. *Biotechnology and Bioengineering*, **103**(2), pp. 296-304.
- Demirbas, A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*, **50**(1), pp. 14-34.
- Demirbas, A. (2010). Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management*, **51**(12), pp. 2738-2749.
- George, B., Pancha, I., Desai, C., Chokshi, K., Paliwal, C., Ghosh, T., Mishra, S. (2014). Effects of different media composition, light intensity and photoperiod on morphology and physiology of freshwater microalgae *Ankistrodesmus falcatus* - A potential strain for bio-fuel production. *Bioresource Technology*, **171**, pp. 367-374.
- Goetz, V., Le Borgne, F., Pruvost, J., Plantard, G., Legrand, J. (2011). A generic temperature model for solar photobioreactors. *Chemical Engineering Journal*, **175**(0), pp. 443-449.
- Grobbelaar, J. (2009). Factors governing algal growth in photobioreactors: the "open" versus "closed" debate. *J. Appl. Phycol.*, **21**(5), pp. 489-492.
- Hindersin, S., Leupold, M., Kerner, M., Hanelt, D. (2013). Irradiance optimization of outdoor microalgal cultures using solar tracked photobioreactors. *Bioprocess Biosyst Eng*, **36**(3), pp. 345-355.
- Kochem, L.H., Da Fré, N.C., Redaelli, C., Rech, R., Marcílio, N.R. (2014). Characterization of a Novel Flat - Panel Airlift Photobioreactor With an Internal Heat Exchanger. *Chemical Engineering & Technology*, **37**(1), pp. 59-64.

- Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Sahu, A., Zhang, Q., Dewulf, J., Malcata, F.X., van Langenhove, H. (2010). Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in Biotechnology*, **28**(7), pp. 371-380.
- Leite, G.B., Abdelaziz, A.E.M., Hallenbeck, P.C. (2013). Algal biofuels: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, **145**, pp. 134-141.
- Lizzul, A.M., Hellier, P., Purton, S., Baganz, F., Ladommatos, N., Campos, L. (2013). Combined remediation and lipid production using on wastewater and exhaust gases. *Bioresource Technology*, **151**, pp. 12-18.
- Masojídek, J., Papáček, Š., Sergejevová, M., Jirka, V., Červený, J., Kunc, J., Korečko, J., Verbovikova, O., Kopecký, J., Štys, D., Torzillo, G. (2003). A closed solar photobioreactor for cultivation of microalgae under supra-high irradiance: basic design and performance. *Journal of Applied Phycology*, **15**(2-3), pp. 239-248.
- Mata, T.M., Martins, A.A., Caetano, N.S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(1), pp. 217-232.
- Morweiser, M., Kruse, O., Hankamer, B., Posten, C. (2010). Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **87**(4), pp. 1291-1301.
- Pegallapati, A.K., Arudchelvam, Y., Nirmalakhandan, N. (2012). Energy-efficient photobioreactor configuration for algal biomass production. *Bioresource Technology*, **126**, pp. 266-273.
- Pereira, D.A., Rodrigues, V.O., Gómez, S.V., Sales, E.A., Jorquera, O. (2013). Parametric sensitivity analysis for temperature control in outdoor photobioreactors. *Bioresource Technology*, **144**, pp. 548-553.
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., Bux, F. (2012). Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied Energy*, **103**, pp. 444-467

- Ríos, S.D., Torres, C.M., Torras, C., Salvadó, J., Mateo-Sanz, J.M., Jiménez, L. (2013). Microalgae-based biodiesel: Economic analysis of downstream process realistic scenarios. *Bioresource Technology*, **136**, pp. 617-625.
- Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., & Roessler, P. (1998). Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae; Close-Out Report. Golden, CO. <https://doi.org/10.2172/15003040>.
- Sierra, E., Acién, F.G., Fernández, J.M., García, J.L., González, C., Molina, E. (2008). Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, **138**(1-3), pp. 136-147.
- Simionato, D., Basso, S., Giacometti, G.M., Morosinotto, T. (2013). Optimization of light use efficiency for biofuel production in algae. *Biophysical Chemistry*, **182**, pp. 71-78.
- Singh, A., Nigam, P.S., Murphy, J.D. (2011). Renewable fuels from algae: An answer to debatable land based fuels. *Bioresource Technology*, **102**(1), pp. 10-16.
- Torzillo, G., Pushparaj, B., Bocci, F., Balloni, W., Materassi, R., Florenzano, G. (1986). Production of Spirulina biomass in closed photobioreactors. *Biomass*, **11**(1), pp. 61-74.
- Wang, L., Li, Y., Chen, P., Min, M., Chen, Y., Zhu, J., Ruan, R.R. (2010). Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp. *Bioresource Technology*, **101**(8), pp. 2623-2628.
- Zhang, X., Yan, S., Tyagi, R.D., Surampalli, R.Y. (2013). Energy balance and greenhouse gas emissions of biodiesel production from oil derived from wastewater and wastewater sludge.(Report). *Renewable Energy*, **55**, 392-403.
- Zhou, X., Yuan, S., Chen, R., Ochieng, R.M. (2015). Sustainable production of energy from microalgae: Review of culturing systems, economics, and modelling. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **7**(1), pp. 392-403.

2

Desenvolvimento de um fotobiorreator automatizado para cultivo de microalgas

2.1 Introdução

Visando criar um ambiente controlado para o cultivo de microalgas foi construído um fotobiorreator em escala de bancada, dotado de um sistema microcontrolado capaz de realizar o controle da temperatura do cultivo, bem como, a captação e armazenamento *on-line* dos dados dos sensores de monitoramento de forma automatizada. O reator também contou com iluminação artificial por meio de diodos emissores de luz - LED e agitação magnética.

O presente capítulo apresenta os parâmetros e critérios de dimensionamento do fotobiorreator, descrevendo também o seu processo de fabricação. Os princípios e diretrizes que basearam o processo de dimensionamento e construção do fotobiorreator foram:

- Baixo custo;
- Disponibilidade de materiais;
- Fabricação manual;
- Automatização dos processos de controle e monitoramento;
- Precisão e acurácia dos sensores de monitoramento.

O material escolhido para fabricação do fotobiorreator foi o acrílico, disponível no mercado em chapas planas, canos ou tarugos, possui a capacidade de ser processado, ou seja, cortado, furado ou dobrado por processos que possibilitam a utilização de ferramentas domésticas manuais, reduzindo seu custo de fabricação. O fotobiorreator foi construído contendo dois compartimentos, o primeiro, destinado ao cultivo de microalgas, fica localizado no interior de um segundo compartimento, no qual contém o fluido trocador de calor, agindo como um banho termostático. Os diferentes sistemas de controles implementados no fotobiorreator estão listados a seguir:

- Sistema de controle da temperatura;
- Sistema de ajuste da radiação luminosa;
- Sistema de monitoramento dos parâmetros de cultivo;
- Sistema central de controle e processamento.

2.2 Processo de dimensionamento e fabricação do reator

O processo de fabricação do reator ocorreu basicamente de forma manual com exceção de duas peças, nas quais a precisão necessária exigiu corte computadorizado a laser. O reator foi fabricado utilizando uma placa de acrílico transparente, do tipo *cast*, de 6 mm de espessura, exceto a face inferior do compartimento de cultivo que utilizou, também uma placa de acrílico transparente, porém, com espessura de 1 mm.

Primeiramente, as dimensões das peças foram riscadas na placa de acrílico, em seguida, cada peça foi cortada utilizando uma serra elétrica de fita, depois, as peças tiveram suas arestas retificadas por meio de uma fresadora manual, dotada de uma fresa com rolamento, que seguiu o gabarito de uma régua de alumínio. As peças foram fixadas umas nas outras, com adesivo próprio para acrílico, pelo processo de colagem por capilaridade, processo esse que, devido às arestas das peças possuírem retificação adequada, já garantiu a vedação do reator. Com a finalidade de evitar a entrada de luz ambiente durante o cultivo o reator e as tampa de ambos os compartimentos, foram revestidos externamente com uma película autoadesiva totalmente opaca.

Com intuito de facilitar a manutenção e limpeza do compartimento de cultivo, este não foi fixado no reator, apenas encaixado, permitindo sua remoção. A Figura 2.1 apresenta os compartimentos de cultivo e do fluido trocador de calor separados, e suas respectivas tampas. Na tampa do compartimento de cultivo foram feitos os orifícios para inserção dos sensores, e para a fixação de um segmento de cano PVC de 25 mm de diâmetro, com a finalidade de realizar inspeções durante o cultivo, dosar reagentes e coletar amostras, este, durante o cultivo, pode ser vedado utilizando um Cap soldável de PVC apenas encaixado. Para manter os sensores em uma posição fixa vertical, na tampa no compartimento de cultivo, foi fixado um suporte para os sensores.

Visando aprimorar a homogeneização do cultivo, foi instalado um sistema de agitação magnética (lab disc, IKA, Alemanha), o agitador de 127 V possui potência de 5 W, a base do agitador foi posicionada sob o reator e a barra magnética no interior do compartimento de cultivo.

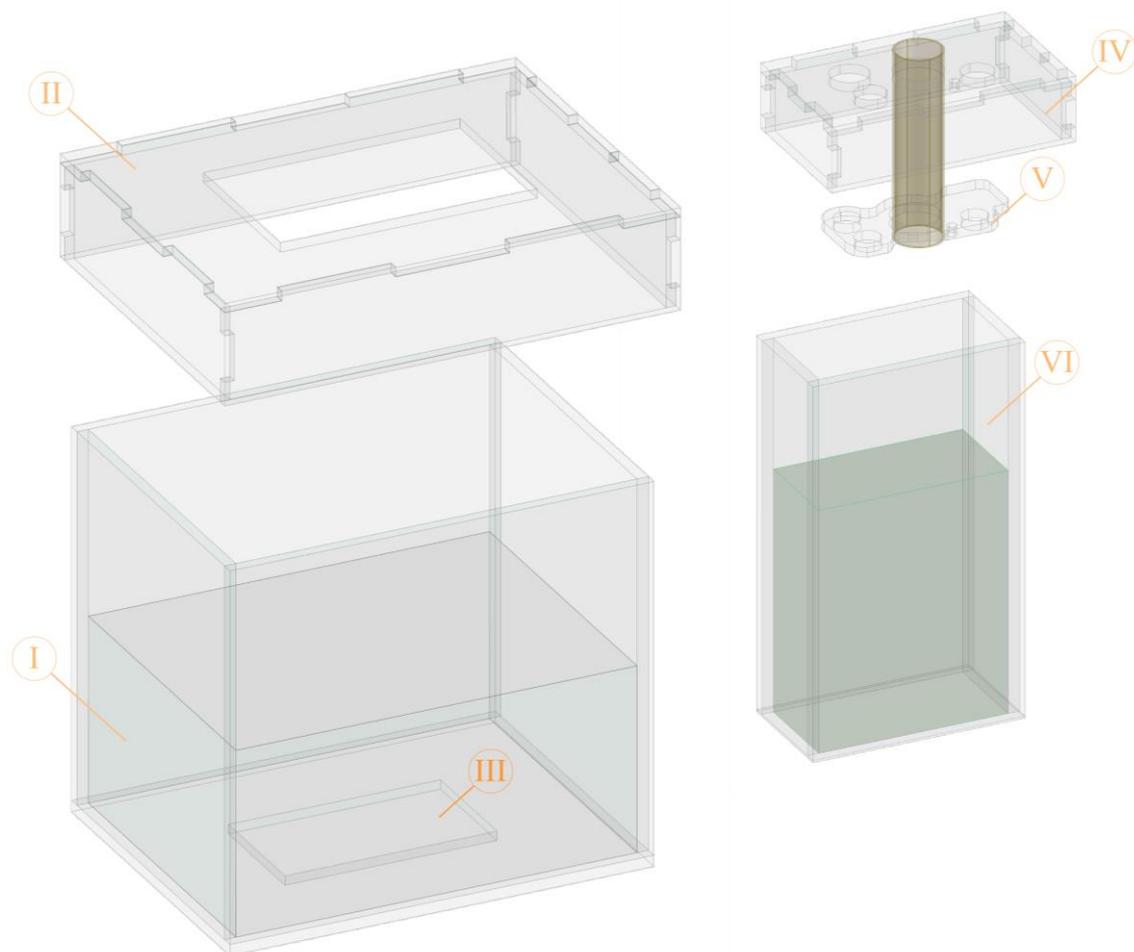


Figura 2.1 - Perspectiva isométrica dos dois compartimentos do fotobiorreator e sus respectivas tampas, I - compartimento do fluido trocador de calor, II - tampa do compartimento do fluido trocador de calor, III–rebaixo para encaixe de compartimento de cultivo, IV - tampa do compartimento de cultivo, V - suporte dos sensores, VI - compartimento de cultivo.

O reator foi apoiado sobre um suporte de MDF, no qual possui uma cavidade para acomodar a base do agitador, e para seu funcionamento adequado, foi feito um rebaixo, com a fresadora manual, na face inferior do compartimento do fluido trocador de calor, com 5 mm de profundidade, o qual diminui a distância entre a base e a barra magnética. O rebaixo resultou em um encaixe para o compartimento de cultivo, mantendo-o sempre na mesma posição.

O compartimento de cultivo, com seção retangular, foi dimensionado de modo a possuir as dimensões internas de 100 mm x 50 mm x 200 mm, sendo comprimento x largura x altura, resultando em um volume total de 1000 ml e volume útil de 650 ml.

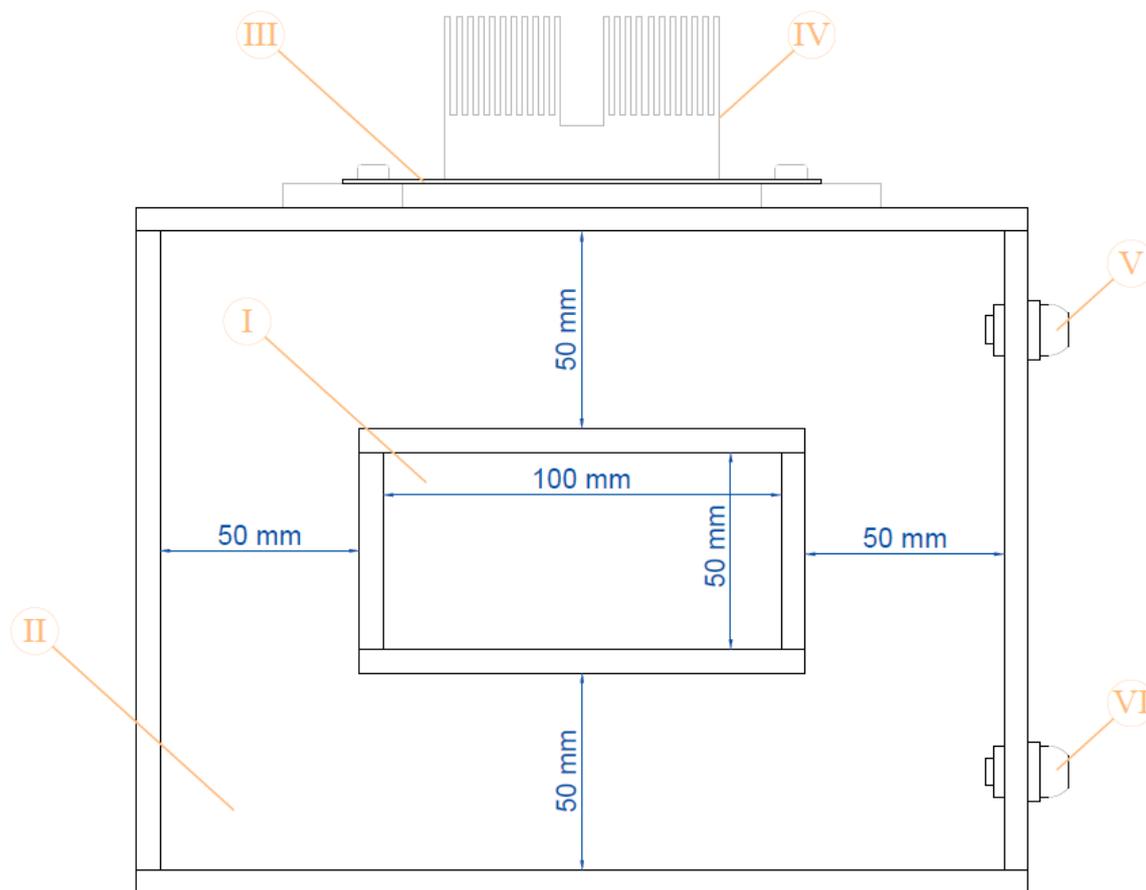


Figura 2.2 - Vista Superior interna do fotobiorreator, I – compartimento de cultivo, II – compartimento do fluido trocador de calor, III – placa de LEDs, IV – dissipador de calor de alumínio da placa de LEDs, V – saída do fluido trocador de calor, VI – entrada do fluido trocador de calor.

O compartimento do fluido trocador de calor, também com seção retangular, foi dimensionado de modo que suas faces ficassem equidistantes em 50 mm a partir das faces externas do compartimento de cultivo, com altura de 200 mm, possui volume interno total de 6,9 L e 5,5 L, sem e com o compartimento de cultivo respectivamente, com volume interno útil de 3,6 L, conforme ilustrado na Figura 2.2.

2.3 Sistema de controle da temperatura

Um dos parâmetros determinantes da cinética de crescimento das microalgas, a temperatura, deve ser devidamente controlada para obtenção de resultados experimentais confiáveis. O sistema de controle de temperatura é composto por:

- Circuito trocador de calor;
- Unidade de processamento e controle.

O Circuito trocador de calor corresponde ao caminho no qual o fluido trocador de calor circula pelo sistema. A Unidade de processamento e controle corresponde à parte lógica do sistema, que é capaz de receber e interpretar os sinais dos sensores de temperatura, processá-los e decidir quanto à ativação dos atuadores. O Circuito trocador de calor, por sua vez, é composto por:

- Compartimento do fluido trocador de calor;
- Bomba de recirculação;
- Bloco trocador de calor;
- Demais mangueiras e conexões.

O sistema de controle da temperatura implementado no reator possibilitou operação totalmente automatizada, para tal, foram utilizados: dois sensores de temperatura, três atuadores, sendo eles a bomba de recirculação, duas pastilhas termoeletricas, um *cooler* de dissipação de calor e a unidade de processamento e controle, um microcontrolador, Arduino Uno R3 (Arduino, Itália).

2.3.1 Compartimento do fluido trocador de calor

O compartimento do fluido trocador de calor contém o compartimento de cultivo, cujo o qual é o objeto do controle da temperatura, o calor é trocado entre o fluido e o compartimento de cultivo buscando sempre mantê-lo em uma temperatura pré-estabelecida. Como fluido trocador de calor foi utilizada água de torneira.

Em uma das faces do compartimento trocador de calor, estão localizadas a entrada e a saída do fluido, sendo a saída posicionada mais abaixo e a entrada mais acima, induzindo

recirculação no interior do compartimento, Figura 2.2 itens V e VI. Uma vez no interior do compartimento, o fluido tem seu fluxo na direção da bomba, em seguida do bloco trocador de calor e por fim retorna ao compartimento.

Os componentes do circuito trocador foram conectados entre si por mangueiras de poliuretano termoplástico (TPU), semirrígidas, com diâmetro no padrão de 3/8". No total foram usados três segmentos de mangueira, uma conectando o compartimento do fluido trocador de calor à bomba de recirculação, o segundo conectando a bomba ao bloco trocador de calor e por fim, o terceiro conectando o bloco ao compartimento do fluido. As mangueiras foram conectadas por meio de adaptadores de mangueira do tipo engate rápido, de polipropileno, no total foram necessários 6 adaptadores, dois para o compartimento do fluido, dois para a bomba e dois para o bloco, os adaptadores foram fixados direto na placa de acrílico, por meio de furos com rosca no padrão NPT cônica com 3/8", foi utilizado fita de teflon veda rosca nas conexões, todos estes produtos facilmente encontrados em lojas especializadas em filtros e purificadores de água doméstico.

Com o intuito de reduzir a troca de calor entre o fotobiorreator e o ambiente externo, o compartimento trocador de calor foi revestido com uma espuma isolante térmica de poliuretano de 4 mm, dotada de uma película refletiva, esta encontrada em lojas especializadas em materiais para construção. Pelo mesmo motivo, as mangueiras também foram revestidas por um tubo isolante térmico de poliuretano, com diâmetro interno de 3/8", este encontrado em lojas especializadas em refrigeração.

2.3.2 Bomba de recirculação

Uma bomba de máquina de lavar roupa (RL0197, Askoll, Brasil), 127 V, 37 W, foi utilizada como bomba de recirculação. Este tipo de bomba proporciona uma vazão satisfatória e tem fácil disponibilidade no mercado, mas não há no mercado adaptadores para conectar sua entrada e saída com padrões de canos de PVC, requerendo adaptações. Para isso, foi utilizada uma chapa de acrílico de 10 mm, cortada em discos, com mesmo diâmetro interno da entrada e da saída, fixada com adesivo de cianoacrilato, nos círculos foram feitos furos com rosca, nos quais foram rosqueados os adaptadores de mangueira.

2.3.3 Bloco trocador de calor

O terceiro e último componente do circuito trocador de calor, o bloco trocador de calor é responsável por aquecer ou resfriar o fluido trocador de calor de acordo aos comandos fornecidos pela unidade de processamento e controle, nele estão presentes os demais atuadores do sistema, as duas pastilhas termoelétricas e o *cooler* dissipador de calor. Além dos atuadores, fazem parte do bloco trocador de calor, uma placa de acrílico para conexão dos adaptadores de mangueira, um anel de vedação de borracha com seção circular, um bloco de cobre maciço e um bloco dissipador de calor de alumínio, a montagem do bloco trocador de calor está ilustrada na Figura 2.3.

Foi utilizada uma placa de acrílico de 10 mm de espessura para a conexão dos adaptadores de mangueira, a placa foi cortada em um formato quadrado com 2” de lado, 50,8 mm, nela foram feitos dois furos com rosca interna no padrão NPT cônica com 3/8”, para conexão dos adaptadores e 4 furos sem rosca com diâmetro de 5 mm para sua fixação com parafusos, nos quais foram rosqueados na placa de cobre, 50,8x50,8x9,52 mm, esta sim contendo os furos com rosca interna M5.

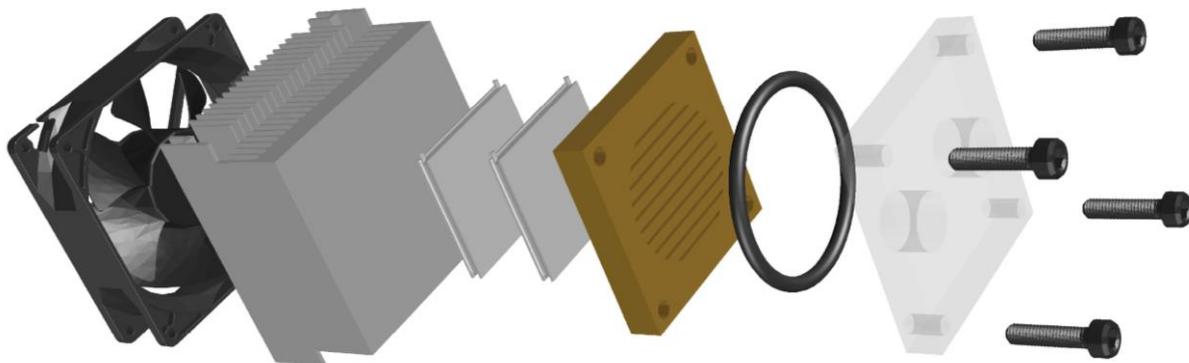


Figura 2.3 - Esquema em três dimensões da montagem do bloco trocador de calor, da esquerda para direita temos: *cooler*, bloco dissipador de alumínio, duas pastilhas termoelétricas, bloco de cobre, anel de borracha, placa de acrílico e parafusos de fixação.

Ao apertar os parafusos, ambas as placas prensam um anel de borracha de seção circular, realizando a vedação de um pequeno compartimento formado em seu interior, no qual é ocupado pelo fluido trocador de calor, que teve sua área de contato com a placa de cobre ampliada por meio de pequenas ranhuras feitas com uma mini retífica manual, neste compartimento o fluido troca calor com a placa de cobre, que por sua vez o troca com as

pastilhas termoelétricas, estas capazes de aquecer ou resfriar a placa de cobre e por consequência o fluido.

As pastilhas termoelétricas são componentes eletrônicos, fabricadas com um material semicondutor, revestidos por um encapsulamento de cerâmica. Os materiais semicondutores dos tipos n e p, ao serem conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo, por meio dos efeitos Seebeck, Peltier, Thomson e Joule, induzem o fluxo de calor transversalmente a si, ao absorver calor em uma de suas faces, e dissipá-lo na outra por consequência da passagem de corrente elétrica (Chávez *et al.*, 2000; Lineykin e Ben-Yaakov, 2005; Santana *et al.*, 2017). Podendo o fluxo térmico ser invertido com a inversão da polaridade da corrente elétrica.

Foram utilizadas duas pastilhas termoelétricas com tensão de alimentação de 12 V e corrente 8 A, estas podem ser encontradas em lojas especializadas em refrigeração. Visando aprimorar a troca de calor, as duas pastilhas foram ligadas termicamente e eletricamente em série, ainda para melhorar a dissipação de calor, quando operada no modo resfriar, na face oposta da pastilha foi fixado um bloco dissipador de alumínio juntamente com um *cooler* de 12 V, ambos retirados de um computador *desktop* antigo. Entre o bloco de alumínio, as pastilhas e a placa de cobre foi utilizado pasta térmica.

2.4 Sistema de ajuste da radiação luminosa

Como fonte de radiação luminosa foi utilizada uma placa de LEDs, removida de um refletor de uso doméstico, modelo SLIM LED, código 140130017, do fabricante Galaxy LED, potência de 50 W, fluxo luminoso 3500 Lm, cor branca fria, temperatura de cor 6500 K. No total a placa possui 144 diodos do tipo SMD5730 montados em uma placa de circuito impresso – PCI de alumínio. A placa é composta por dois circuitos independentes, cada um contendo 72 diodos, dispostos em três circuitos paralelos, nos quais cada um contém 24 diodos em série. A fonte original do refletor fornecia 75 V de tensão a cada um dos circuitos, resultando, originalmente, em uma queda de tensão de 3,125 V por diodo.

A fonte original do refletor foi substituída por uma fonte chaveada do tipo colmeia de 12 V e 30 A. Para o controle da intensidade luminosa foi utilizado um conversor DC/DC do tipo *Step Up* de 600 W. O conversor possui um *Trimpot* no qual é possível ajustar a tensão de saída do conversor e por consequência ajustar a intensidade luminosa da placa de LEDs. O

conversor foi montado dentro da caixa metálica de uma fonte de computador do tipo ATX, na qual foi aproveitado o *cooler* para o resfriamento do conversor. Também foi instalado um voltímetro e amperímetro digital para monitorar a tensão e corrente elétrica de saída do conversor por meio de um display de LCD de sete seguimentos.

Em uma das laterais externas do reator foi fixada uma moldura de acrílico, com 6 mm de espessura, com quatro furos com rosca no padrão M5, nos quais foi fixada a placa de LEDs por meio de parafusos de metal, Figura 2.2 item III. Visando evitar o superaquecimento da placa de LEDs, em sua parte posterior, foi fixado um bloco dissipador de calor de alumínio, removido de um computador *desktop* antigo, entre a placa e o bloco foi utilizado pasta térmica, Figura 2.2 item IV.

2.4.1 Método de ajuste do fluxo luminoso

Para o ajuste do fluxo luminoso foi utilizado um luxímetro digital (Solara 2000), com faixa de operação de 0 a 200 000 Lux, o sensor é introduzido no compartimento de cultivo, seco, e fixado sempre na mesma posição por meio de um suporte de MDF. Subsequentemente o compartimento de cultivo é encaixado em sua posição, interior do compartimento do fluido trocador de calor, contendo o fluido e tampado. Através do *Trimpot* do conversor DC/DC o fluxo luminoso é ajustado até a intensidade desejada, mostrada no *display* do luxímetro.

Visando padronizar a unidade de medida do fluxo luminoso, para poder compará-la à mais utilizada pela literatura, a radiação fotossinteticamente ativa (*Photosynthetically Active Radiation* – PAR), foi feita uma correlação entre a escala em Lux e a escala em PAR. A unidade Lux, que corresponde à Lumens por metro quadrado, consiste no fluxo luminoso que incide sobre uma superfície, no entanto, que considera o intervalo espectral no qual o olho humano é sensível, levando em conta também a proporção de sensibilidade de cada comprimento de onda, apresentando uma curva que possui a aparência de um sino gaussiano com o pico em 555 nm (Sharpe *et al.*, 2005). Já a unidade PAR, que corresponde à $\mu\text{mol}_{\text{fótons}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, consiste no fluxo de fótons por unidade de tempo que incide sobre uma superfície, que considera o intervalo espectral, 400 a 700 nm, no qual a radiação pode ser convertido em energia química pelos organismos fotossintetizantes como, por exemplo, plantas e microalgas, durante o processo de fotossíntese, levando em conta também a proporção de sensibilidade de cada comprimento de onda, apresentando uma curva com

aparência trapezoidal com pico em 700 nm e mínimo em 400 nm (Akitsu *et al.*, 2017; McCree, 1972, 1971).

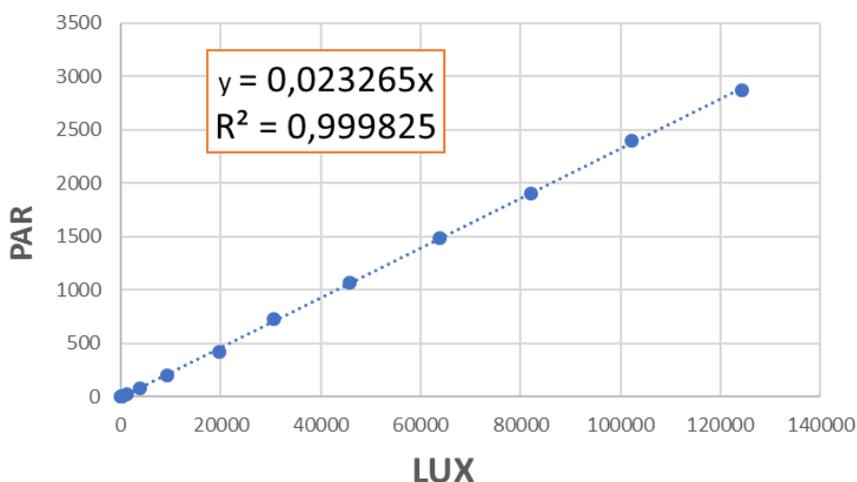


Figura 2.4 - Correlação entre o a intensidade da luz em lux (luxímetro Solara 2000) e o fluxo luminoso (sensor medidor de PAR LI-190R da LI-COR), resultado da iluminação por LED na cor branco frio, 6500 K.

Embora sendo grandezas com natureza bastante distintas, pode-se observar uma grande correlação entre as duas, com coeficiente R^2 igual a 0,9998. A Figura 2.4 apresenta o resultado da calibração. Foi utilizado um medidor de PAR (LI-190R, LI-COR, EUA) para realização da calibração.

2.5 Sistema de monitoramento dos parâmetros de cultivo

Ao todo, foram instalados no fotobiorreator sensores para monitoramento *on-line* de seis parâmetros, sendo eles:

- pH;
- Oxigênio dissolvido - OD;
- Condutividade elétrica - CE;
- Turbidez;
- Temperatura do cultivo;
- Temperatura do fluido trocador de calor.

Todos os parâmetros contaram com armazenamento *on-line* dos dados de forma automatizada, com acesso remoto e em tempo real por meio da internet, os dados foram armazenados na nuvem podendo ser acessados de qualquer parte do mundo, bastando apenas conexão com a rede global de computadores. O sistema de armazenamento dos dados ocorreu de duas formas distintas, a primeira armazenou os dados no formato de imagem e a segunda no formato de planilha eletrônica, a Tabela 2.1 apresenta informações detalhadas dos sensores utilizados no monitoramento.

Tabela 2.1 - Informações dos sensores utilizados para o monitoramento do cultivo.

Parâmetro	Sensor	Fabricante	País	Unidade	Resolução
pH	Orion 5-Star	Thermo Scientific	EUA	-	0,01
Oxigênio Dissolvido	Orion 5-Star	Thermo Scientific	EUA	mg.L ⁻¹	0,01
Condutividade Elétrica	HI 2300	Hanna instruments	EUA	μS.cm ⁻¹	0,01
Turbidez	TSW-10	Amphenol	EUA	UNT	ver Cap. 3
Temperatura do cultivo	DS18B20	Dallas Semiconductor	EUA	°C	0,0625
Temperatura do fluido trocador de calor	DS18B20	Dallas Semiconductor	EUA	°C	0,0625

Uma ilustração com detalhe do posicionamento dos sensores na tampa do compartimento de cultivo pode ser vista na Figura 2.5, os sensores de turbidez e temperatura do cultivo foram completamente submersos na solução, sendo seus orifícios apenas para passagem dos fios, os sensores de pH, OD e CE foram apenas parcialmente submersos de modo que parte de sua sonda ficasse para fora do compartimento de cultivo, a vedação das sondas e dos fios dos sensores foi feita por uma placa de EVA fixada internamente à tampa com furação nas mesmas posições que os orifícios no acrílico, porém com diâmetro interno ligeiramente menor para promover a vedação, a tampa de acrílico e o EVA foram cortados a laser. O sensor da temperatura do fluido trocador de calor foi fixado na tampa do seu respectivo compartimento

O sistema de monitoramento utilizou um microcontrolador de código aberto, Arduino Uno R3, que recebe o sinal dos sensores, realiza o processamento dos sinais e, conectado por meio de um cabo USB (Universal Serial Bus), envia os dados para o computador. Os dados são armazenados diretamente em uma planilha eletrônica por meio do software Excel (Microsoft, EUA) dotado da extensão PLX-DAQ (Parallax, EUA).

Foi incluída uma segunda extensão na planilha eletrônica com a função de salva-la automaticamente a cada 60 segundos, o arquivo da planilha foi feito em uma pasta com

sincronização automática do Google Drive, permitindo seu acesso remoto por qualquer computador ou *smartphone* cadastrado a conta do Google. Foram armazenados na planilha dados de data, hora, turbidez, temperatura do cultivo, temperatura do fluido trocador de calor, os status de acionamento dos atuadores bem como demais informações pertinentes ao sistema de controle da temperatura.

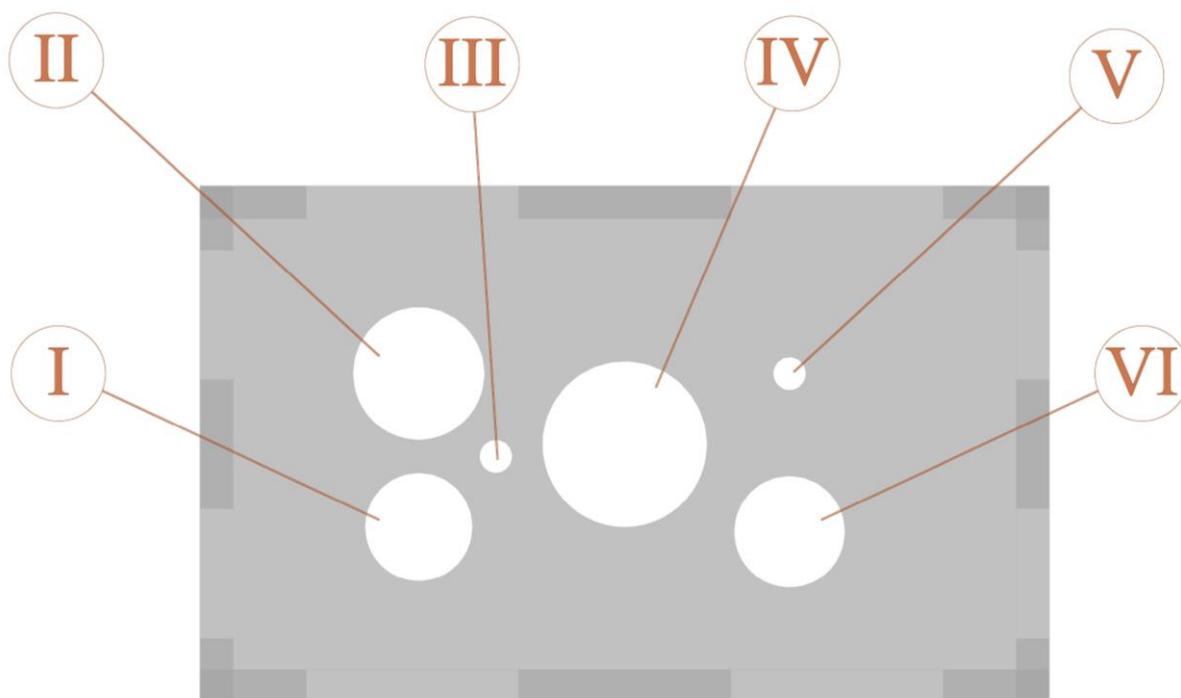


Figura 2.5 - Vista superior da tampa do compartimento de cultivo com a indicação dos orifícios para inserção dos sensores, I - Sensor de condutividade elétrica, II - Sensor de oxigênio dissolvido, III - Sensor de temperatura do cultivo, IV - abertura para inspeção, V - sensor de turbidez, VI - Sensor de pH.

As sondas de pH, OD e CE, sensores já existentes no laboratório, por não possuem saída analógica ou digital, de forma que pudessem ser conectados diretamente ao microcontrolador. Embora possuíssem *datalogger* interno, precisaram de um método alternativo para o acesso remoto do armazenamento dos dados, para isso foi utilizado uma *webcam*, conectada ao computador, por meio do software *webcamXP* versão 5.0, distribuído gratuitamente no site do desenvolvedor. O software foi programado para que a câmera capturasse uma imagem dos *displays* dos sensores a cada 300 segundos salvando-a no formato *.jpg* em uma pasta do Google Drive, cada imagem possui um tamanho médio de 24 KB. O software também registra a data e hora na qual a imagem foi gerada. Um exemplo do registro pode ser visto na Figura 2.6.



Figura 2.6 - Exemplo do registro dos dados dos sensores que não puderam ser conectados ao microcontrolador, I - condutividade elétrica, II - temperatura do cultivo, III - oxigênio dissolvido, IV - pH, V - temperatura do cultivo.

2.6 Sistema central de controle e processamento.

O sistema central de controle e processamento consiste em microcontrolador de código aberto, o Arduino, modelo Uno R3, este possui entradas e saídas analógicas e digitais, nas quais podem ser conectados diversos tipos de sensores e atuadores. O microcontrolador tem ainda uma memória interna, na qual é armazenado o programa com as instruções de como o sistema deve proceder, quanto ao armazenamento dos dados dos sensores, e ao acionamento dos atuadores com a finalidade de realizar o controle da temperatura.

Na entrada digital D2, foram conectados ambos os sensores de temperatura, temperatura do cultivo e temperatura do fluido trocador de calor. Na entrada analógica A0 foi conectado o sensor de turbidez. As portas digitais 8 a 12, foram configuradas como portas de saída e a elas foram conectados os componentes responsáveis pelo acionamento dos atuadores, dois módulos de relês.

O Primeiro módulo, contendo quatro canais, foi o responsável pelo acionamento do sistema de controle da temperatura, sendo o canal um para acionamento da bomba de recirculação, canal dois para acionamento do cooler, e os canais três e quatro realizando o acionamento das pastilhas termoeletricas, estas, entretanto, foram ligadas de uma forma não convencional, os dois terminais da série de pastilhas termoeletricas foram ligados no terminal comum de cada relê, enquanto a alimentação positiva da fonte de 12 V foi ligada em ambos os terminais

normalmente abertos, e o aterramento da fonte foi ligado nos terminais normalmente fechado. Devido as quatro possíveis combinações do acionamento dos dois canais, esta configuração possibilitou realizar não apenas o acionamento das pastilhas, mas também a inversão de sua polaridade, podendo ser comutada entre o modo aquecer e o modo resfriar através de apenas os comandos elétricos. O segundo módulo de relê, com um único canal, foi conectado possibilitando a interrupção do circuito da placa de LED, no qual proporcionou o uso de fotoperíodos programáveis durante o cultivo. Mais detalhes sobre as ligações elétricas podem ser visualizados na Figura 2.7.

Em relação ao controle da temperatura do cultivo, a princípio foi implementado um controlador simples, ou seja, o sistema foi programado para acionar o aquecimento caso a temperatura do cultivo estivesse abaixo do valor desejado, e caso ultrapassasse este valor, o resfriamento era acionado. Entretanto, devido à elevada capacidade térmica volumétrica da água, também conhecida como sua inércia térmica, o tempo de resposta do sistema, ou seja, o tempo necessário para atingir a temperatura desejada se mostrou muito acima do satisfatório. Foi observado que dependendo das interferências externas, como, por exemplo, flutuações da temperatura ambiente, ou as diferentes intensidades de luz utilizadas durante os cultivos no reator, este ainda poderia não atingir a temperatura desejada.

Dessa forma, verificou-se a necessidade da utilização de um controlador mais robusto que simultaneamente otimizasse o tempo resposta do sistema, mas que também fosse capaz de se adaptar às diversas possíveis fontes de interferência externas ao cultivo. Um tipo de controlador capaz de fornecer tais vantagens é o Controlador Proporcional Integral Derivativo – PID. Aplicado como unidade de controle em diversas áreas da indústria, tais controladores possuem uma estrutura de compensação por *feedback*, conseguindo minimizar o erro pela ação proporcional, registrar o histórico do sistema pela ação integral e antecipar o comportamento do sistema pela ação derivativa (Åström *et al.*, 2001; Rojas *et al.*, 2017).

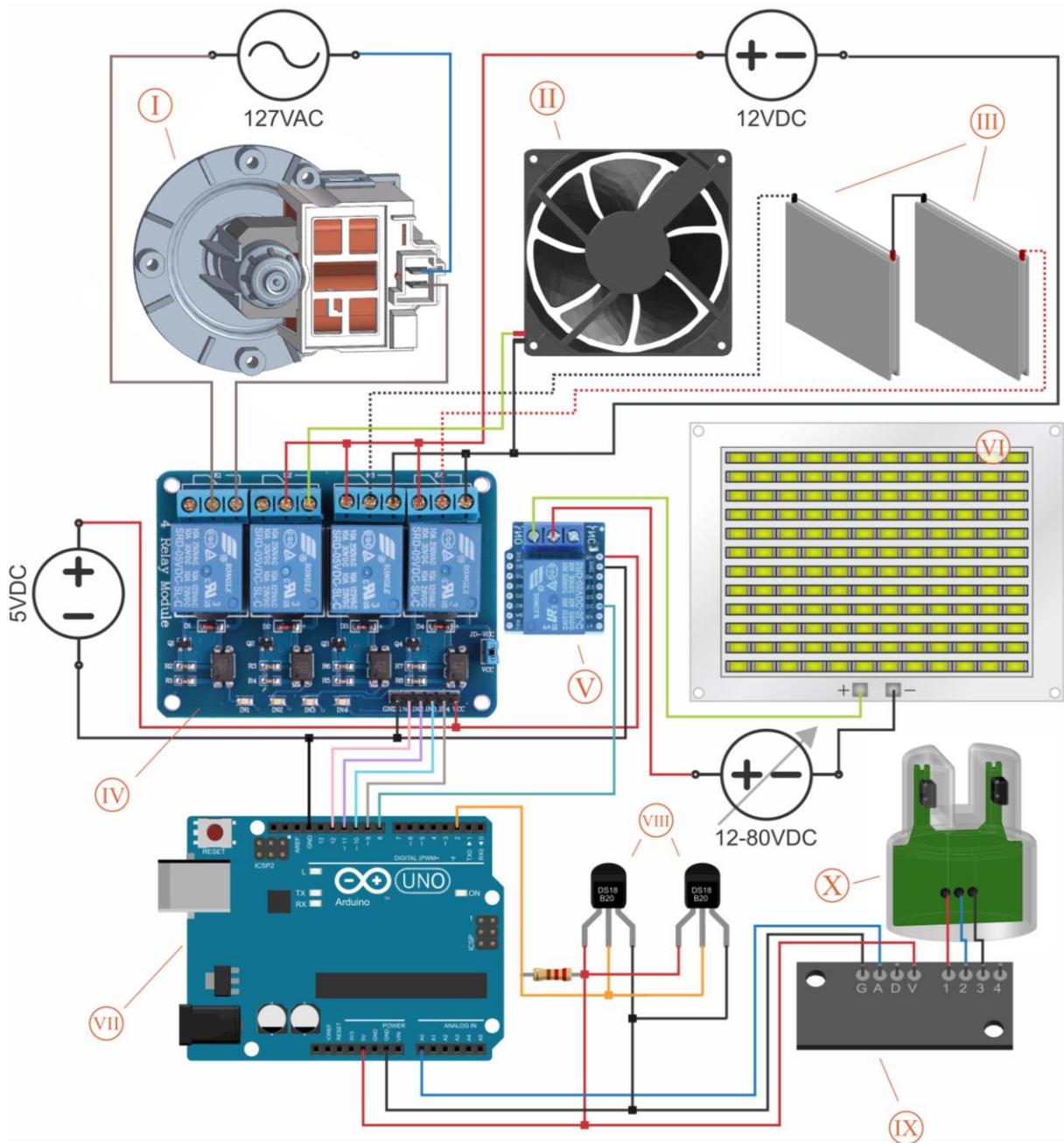


Figura 2.7 - Diagrama das ligações elétricas do sistema central de controle e processamento. I - bomba de recirculação, II - cooler, III - série de pastilhas termoeletricas, IV - módulo de relê de 4 canais, V - módulo de relê de 1 canal, VI - placa de LED, VII - Arduino Uno R3, VIII - sensores de temperatura DS18B20, IX - PCI auxiliar do sensor de turbidez, X - Sensor de turbidez TSW-10.

O Controlador primeiramente calcula o erro, como sendo a diferença entre a temperatura do cultivo medida pelo sensor e a temperatura desejada, neste caso 30 °C. Com base no valor do erro são calculados os coeficientes P, I e D, proporcional, integral e derivativo respectivamente, a somatória entre os três coeficientes e a temperatura desejada resulta em

uma variável denominada *Setpoint*, que tem seu valor atualizado a cada volta do *looping* conforme o erro vai sendo também atualizado.

```

54     float
55         Kp=2,
56         Ki=0.2,
57         Kd=0.01,
58         P=0,
59         I=0,
60         D=0,
61         PID=0;
62     int Lasttemp = 3000;
63     int stp = 3000;

112         float temp1 = sensors.getTempC(Probe01);
113         int tempIN = (int) (temp1*100);
114         float temp2 = sensors.getTempC(Probe02);
115         int tempOut = (int) (temp2*100);
116         int err = 3000 - tempIN;
117         P = err * Kp;
118         I += err * Ki;
119         D = (Lasttemp - tempIN)*Kd;
120         PID = P + I + D;
121         stp = PID + 3000;
122         Lasttemp = tempIN;

137         if(int(stp)- 5 <= tempOut && tempOut <= int(stp) + 5){
138             digitalWrite(9, LOW);
139             digitalWrite(10, LOW);
140             digitalWrite(11, HIGH); //Cooler desligado
141             digitalWrite(12, HIGH); //Bomba desligada
142         }
143         if(tempOut < int(stp)-5 ){
144             //Aquecimento
145             digitalWrite(9, LOW);
146             digitalWrite(10, HIGH);
147             digitalWrite(11, HIGH); //Cooler desligado
148             digitalWrite(12, LOW); //Bomba ligada
149         }
150         if(tempOut > int(stp)+5 ){
151             //Resfriamento
152             digitalWrite(9, HIGH);
153             digitalWrite(10, LOW);
154             digitalWrite(11, LOW); //Cooler ligado
155             digitalWrite(12, LOW); //Bomba ligada
156         }

```

Figura 2.8 - Trechos do código de programação do microcontrolador que fazem referência à implementação do controlador PID.

Diferente do controlador simples, a temperatura do fluido trocador de calor é controlada para seguir o valor do *Setpoint*. A Figura 2.8, apresenta trechos do código de programação do microcontrolador nos quais contém as instruções para a implementação do controlador PID,

mostrando as variáveis declaradas, o valor pré-selecionado das constantes K_p , K_i e K_d , bem como os cálculos para obtenção dos coeficientes P, I e D, o valor do erro e do *Setpoint*. Mostrando também a função condicional que realiza o acionamento dos atuadores ao comparar a temperatura do fluido trocador de calor e o *Setpoint*. Uma versão na íntegra do código pode ser visualizada no Anexo I deste trabalho.

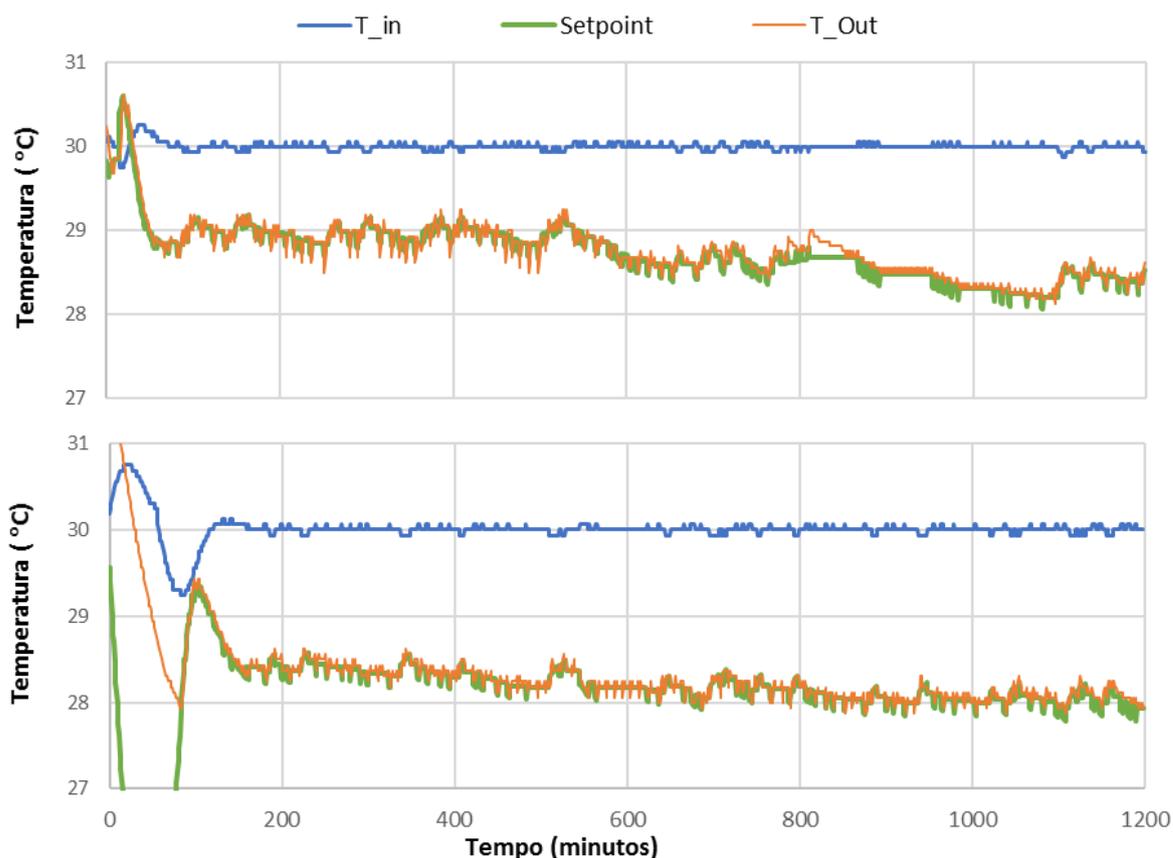


Figura 2.9 - Performance do controlador PID sobre a temperatura de dois cultivos com intensidade de interferência distintas. Acima, iluminado com $1750 \mu\text{mol}(\text{fótons}).\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, abaixo, $2500 \mu\text{mol}(\text{fótons}).\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Ao considerar as informações sobre o histórico do sistema, o controlador mostrou-se capaz de se ajustar às diferentes fontes de perturbação externas e reduzir favoravelmente o tempo de resposta do sistema. A Figura 2.9 apresenta a resposta do controlador sob a ação de duas interferências com intensidades distintas, pode-se observar que em ambos os casos a posição do *Setpoint* sofreu variações, que foram constantemente seguidas pela temperatura do fluido trocador de calor (T_{Out}), de tal forma a manter a temperatura do cultivo (T_{in}) estável e muito próxima ao valor desejado. Outra vantagem adicional desta forma de controle da temperatura é a possibilidade de quantificar a diferença de temperatura real entre o reator e o

fluido trocador de calor. A partir desta diferença e da condutividade térmica das paredes do reator (acrílico de 6 mm de espessura) podemos calcular o fluxo de energia térmica que entra ou sai do reator, ou seja: a absorção ou dissipação de calor pelo cultivo de algas dentro do reator.

2.7 Referências Bibliográficas

- Åkitsu, T., Nasahara, K.N., Hirose, Y., Ijima, O., Kume, A., 2017. Quantum sensors for accurate and stable long-term photosynthetically active radiation observations. *Agric. For. Meteorol.* 237–238, 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.01.011>
- Ali, A.S., Zanzinger, Z., Debose, D., Stephens, B., 2016. Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. *Build. Environ.* 100, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.010>
- Åström, K.J., Hägglund, T., 2001. The future of PID control. *Control Eng. Pract.* 9, 1163–1175. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00062-4)
- Barnard, H.R., Findley, M.C., Csavina, J., 2014. PARduino: A simple and inexpensive device for logging photosynthetically active radiation. *Tree Physiol.* 34, 640–645. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu044>
- Berkcan, E., 1995. Temperature compensation method for a turbidity sensor used in an appliance for washing articles. US005477576A.
- Bertram, A., Berends, E., Reilmann, M., 2004. Device for a turbidity sensor for a dishwasher or washing machine. US007392813B2.
- Brasil, 1997. LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997.
- Chavez, J.A., Ortega, J.A., Salazar, J., Turo, A., Garcia, M.J., 2000. SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects, in: *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [Cat. No. 00CH37066]*. IEEE, pp. 1019–1023. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2000.848895>
- Diamond, D., Lau, K.T., Brady, S., Cleary, J., 2008. Integration of analytical measurements and wireless communications-Current issues and future strategies. *Talanta* 75, 606–612. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2007.11.022>
- Durfee, A., 2003. Static and dynamic turbidity sensing in a washing appliance. US 20030196278A1.
- Erickson, T., Hammond, B., O'Brien, G., Reeve, I., 1996. Electromechanically actuated turbidity sensor for a machine for washing articles. US005729025A.
- Lin, B., Xu, Z., Wang, J., Lu, M., 2017. A low-cost water quality monitoring prototype device with embedded chromogenic reagent capsules and dynamic colorimetric detection. *Sensors Actuators, B Chem.* 252, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.05.056>

- Lineykin, S., Ben-Yaakov, S., 2005. Modeling and analysis of thermoelectric modules. Twent. Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. 2005. APEC 2005. 3, 2019–2023. <https://doi.org/10.1109/APEC.2005.1453336>
- McCree, K.J., 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.* 10, 443–453. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(72\)90045-3](https://doi.org/10.1016/0002-1571(72)90045-3)
- McCree, K.J., 1971. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* 9, 191–216. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7)
- Meyers, G., Kapelan, Z., Keedwell, E., 2017. Short-term forecasting of turbidity in trunk main networks. *Water Res.* 124, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.035>
- Pearce, J.M., 2014. Open-Source La, Open-Source Lab. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410462-4.00001-9>
- Rojas, A.J., Garcés, H.O., 2017. Signal-to-Noise Ratio Requirements for Discrete-time PID Controllers. *IFAC-PapersOnLine* 50, 2567–2572. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2017.08.094>
- Román, C., Loza, D., Segura, L., Dabirian, R., 2016. Construcción con tecnologías abiertas de un sensor de turbidez de bajo costo. *Iteckne* 13, 17–22. <https://doi.org/1692-1798>
- Santana, H.S., Sanchez, G.B., Taranto, O.P., 2017. Evaporation of excess alcohol in biodiesel in a microchannel heat exchanger with Peltier module. *Chem. Eng. Res. Des.* 124, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.05.022>
- Sasano, K., 2000. Drum type washing machine with turbidity sensor. US006536243B2.
- Sharpe, L.T., Stockman, A., Jagla, W., Jägle, H., 2005. A luminous efficiency function, $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation. *J. Vis.* 5, 3. <https://doi.org/10.1167/5.11.3>
- Stutter, M., Dawson, J.J.C., Glendell, M., Napier, F., Potts, J.M., Sample, J., Vinten, A., Watson, H., 2017. Evaluating the use of in-situ turbidity measurements to quantify fluvial sediment and phosphorus concentrations and fluxes in agricultural streams. *Sci. Total Environ.* 607–608, 391–402. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.013>
- Wang, L., Wang, X., Jin, X., Xu, J., Zhang, H., Yu, J., Sun, Q., Gao, C., Wang, L., 2017. Analysis of algae growth mechanism and water bloom prediction under the effect of multi-affecting factor. *Saudi J. Biol. Sci.* 24, 556–562. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.01.026>
- Wu, Z., Wang, X., Chen, Y., Cai, Y., Deng, J., 2018. Science of the Total Environment Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu. *Sci. Total Environ.* 612, 914–922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.293>

3

Turbidímetro on-line de baixo custo para monitorar a qualidade da água

Resumo

Muitos problemas associados à saúde pública são de alguma forma relacionado com a quantidade e/ou a qualidade da água. O crescimento populacional e a falta de saneamento adequado requerem aprimorar a gestão do uso da água, para qual é necessária uma ampla rede de monitoramento dos recursos hídricos. Também é preciso utilizar processos eficientes e controlados para o tratamento dos esgotos. Uma tendência é realizar este monitoramento e controle por meio de processos automatizados, substituindo análises no laboratório por medições com sensores eletrônicos, por questões de custo e praticidade. Existe uma correlação direta entre a quantidade de sólidos suspensos e a turbidez, presente em diversos índices de qualidade de água, e assim esta tem sido aplicada como medida indireta de diversos compostos presentes na água. Este trabalho estudou a possibilidade de realizar medições on-line da turbidez usando sensores de baixo custo e um microcontrolador de código aberto, o Arduino. Os resultados da calibração indicam a possibilidade de usá-lo com excelente confiabilidade. O sistema desenvolvido é uma alternativa excelente para aplicações científicas.

Palavras-chave: sensor de turbidez; Arduino; baixo custo.

3.1 Introdução

Muitos problemas associados à saúde pública são de alguma forma relacionado com a quantidade e/ou a qualidade da água. O crescimento populacional e a falta de saneamento adequado reduzem o acesso às fontes seguras de água potável (Schwarzenbach *et al.*, 2010). Para atenuação dos conflitos, a utilização de ferramentas de gestão e planejamento torna-se imperativa. Todavia, para uma boa gestão é preciso ter um profundo conhecimento da situação, e para isso uma ampla rede de monitoramento dos recursos hídricos se faz necessário, como inclusive previsto na política nacional das águas (Brasil, 1997).

Um dos maiores impeditivos do estabelecimento de uma ampla rede de monitoramento da qualidade da água reside nos altos custos inerentes à coleta de amostras físicas, transporte e subsequentes análises laboratoriais. Por isso é uma tendência (inter)nacional a realização deste monitoramento por meio de estações automáticas, dotadas com equipamentos e sensores eletrônicos. Não somente devido ao reduzido custo em relação aos procedimentos tradicionais, mas também por permitir armazenamento e/ou transmissão de dados de forma automatizada, e inclusive permitir a operação automatizada de outros equipamentos como válvulas, comportas, bombas ou alarmes. Entretanto, os altos custos de alguns tipos de equipamentos distanciam sua implementação da nossa realidade, agravado pelos recentes cortes no orçamento dos órgãos públicos. Portanto, fica evidente a necessidade da busca por alternativas de baixo custo (Lin *et al.*, 2017).

Os sensores a serem usados em estações automáticas devem ser capazes, de preferência, de quantificar fatores físicos ou químicos do ambiente por métodos que dispensem a necessidade de reagentes ou materiais de consumo, utilizando princípios como potenciométricos (ex.: medidores de pH e potencial redox), eletrônicos ou óticos. (Diamond *et al.*, 2008).

Frequentemente é possível verificar uma correlação direta entre a concentração de sólidos suspensos e a turbidez, que é definida como a redução da transparência de uma amostra líquida devido à presença de partículas sólidas em suspensão e é quantificada por meio de Unidades Nefelométricas de Turbidez – UNT (Román *et al.*, 2016). Estas partículas suspensas podem ser inorgânicas, como por exemplo, argila, silte, mas também matéria orgânica, inclusive micro-organismos vivos. A turbidez tem sido aplicada como medida indireta de diversos compostos presentes na água como: sedimentos, nutrientes, afloramento de algas, entre outros, podendo destacar sua constante presença em diversos índices de qualidade de

água – IQA (Lin *et al.*, 2017; Meyers *et al.*, 2017; Stutter *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2018). Sendo assim, a medição on-line da turbidez é uma tecnologia interessante não somente para o monitoramento dos recursos hídricos, mas também para o monitoramento de processos biotecnológicos, entre os quais os processos usados para tratamento de água e esgoto.

Por se tratar de um fenômeno ótico, equipamentos utilizados para medição da turbidez seguem o mesmo princípio básico que, por exemplo, os medidores da densidade ótica (transmissômetros): possuem um dispositivo emissor de radiação eletromagnética, luz visível ou infravermelho, podendo este ser um diodo emissor de luz (light emitting diode – LED), e um dispositivo receptor sensível a esta radiação, como por exemplo, um fotodiodo ou um resistor dependente de luz (light dependent resistor – LDR). A partir da fração da radiação emitida que é detectada, o parâmetro é quantificado. Estes equipamentos óticos são classificados de acordo com o ângulo de disposição entre emissor e receptor. Quando dispostos a 180° entre si, são denominados transmissômetros, e medem a intensidade de radiação que não teve sua trajetória alterada pelas partículas em suspensão na fase líquida. Aqueles dispostos a menos de 180°, usualmente 90°, são denominados nefelômetros, e medem a intensidade de radiação que foi refletida pelas partículas suspensas, portanto teve sua trajetória alterada. Há ainda alguns modelos comerciais que se utilizam dos dois processos (Rymszewicz *et al.*, 2017).

Devido à crescente preocupação relacionada ao meio ambiente intensificou-se o desenvolvimento de equipamentos domésticos mais eficientes quanto ao uso de água e energia, gerando o registro de patentes de máquinas de lavar roupa e louça dotadas de sensores de turbidez. Tais eletrodomésticos avaliam a presença de sólidos em suspensão nos efluentes líquidos do processo de lavagem, e caso este efluente apresente baixa turbidez, indicativo de que os artigos apresentam limpeza satisfatória, pode ser interrompido o ciclo, gerando economia de recursos. Este desenvolvimento aumentou a popularidade de sensores de turbidez, reduzindo drasticamente seu custo (Bertram *et al.*, 2004; Durfee, 2003; Erickson *et al.*, 1996; Sasano, 2000).

Mais recentemente, o surgimento de microcontroladores com hardwares de licença livre e código aberto, como por exemplo o Arduino, é outro evento que tem grande potencial na redução dos custos da pesquisa experimental no meio científico. Estes hardwares, ao serem

livres, disponibilizam suas plantas e dimensionamento, de modo que qualquer interessado possa usá-los, estudá-los, copiá-los ou modificá-los sem restrições. Os microcontroladores são dispositivos dotados de entradas e saídas, analógicas ou digitais, por meio das quais é possível conectar os mais diversos sensores, possibilitando a presença destes dispositivos em diversas iniciativas de desenvolvimento de sensores de baixo custo (Ali *et al.*, 2016; Barnard *et al.*, 2014; Pearce, 2014; Román *et al.*, 2016).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso, para fins científicos, de um sensor de turbidez de máquina de lavar roupa, usando um microcontrolador de código aberto para a obtenção, processamento e armazenamento dos dados.

3.2 Material e Métodos

O sistema proposto utilizou um microcontrolador (UNO R3, Arduino, Itália), um sensor de turbidez de máquina de lavar roupa (TSW-10, Amphenol, EUA) e um sensor digital de temperatura (DS18B20, Dallas Semiconductor, EUA), conforme ilustrado na Figura 3.1A. O sensor de temperatura, com resolução de 0,0625 °C e faixa de operação de -55 a 125 °C, foi conectado à entrada digital D2 do microcontrolador. O sensor de turbidez, com faixa de operação variando entre -30 a 80 °C, foi conectado na entrada analógica A0 do microcontrolador.

O microcontrolador recebe o sinal dos sensores, realiza o processamento dos sinais e, conectado por meio de um cabo USB (Universal Serial Bus), envia os dados para o computador. Os dados são armazenados diretamente em uma planilha eletrônica por meio do software Excel (Microsoft, EUA) dotado da extensão PLX-DAQ (Parallax, EUA), este último disponível gratuitamente na página eletrônica da empresa. O envio direto dos dados à planilha possibilita o traçado dos gráficos, tanto da turbidez quanto da temperatura, de forma automática e em tempo real.

O sensor de turbidez de máquina de lavar roupas consiste em um transmissômetro que possui como dispositivo emissor um LED infravermelho, *infra red* – IR, e como dispositivo receptor um fototransistor, ambos montados em uma placa de circuito impresso – PCI envolta por um encapsulamento de plástico transparente, dotado de uma cavidade onde, ao submergi-lo em solução, esta ocupa a cavidade se posicionando entre o emissor e o receptor, conforme detalhado na Figura 3.1B.

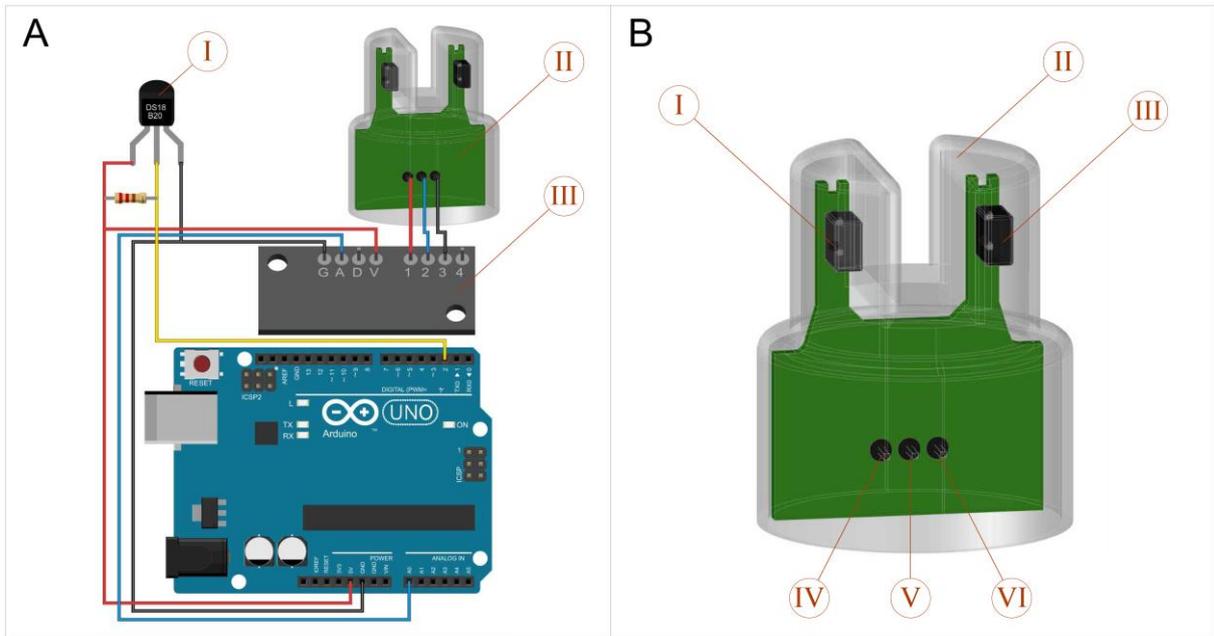


Figura 3.1 - A) Esquema da ligação elétrica do sistema proposto. I - sensor de temperatura DS18B20, II - sensor de turbidez TSW-10, III - PCI auxiliar. B) Detalhe do funcionamento do sensor de turbidez de máquina de lavar roupas. I - fototransistor, II - Encapsulamento de plástico transparente, III - LED infravermelho, IV - pino 1, V - pino 2, VI - pino 3.

O circuito eletrônico do sensor de turbidez divide-se em duas partes, parte encontra-se na PCI fixada no interior do encapsulamento de plástico transparente, a sonda, e outra parte do circuito corresponde à uma segunda PCI, PCI auxiliar, comercializada juntamente ao sensor de turbidez, Figura 3.2A. No circuito da sonda estão presentes os 3 pinos para ligação dos fios que conduzem a energia e o sinal até a PCI auxiliar, o fotodiodo, o LED infravermelho e uma pequena resistência variável para ajuste da intensidade do LED pelo fabricante, R3. Na PCI auxiliar encontram-se os pinos para as ligações elétricas com a sonda e com o Arduino, e as demais resistências necessárias ao circuito.

A Figura 3.2B ilustra o princípio de funcionamento do circuito eletrônico do fototransistor, em que V_{in} representa a tensão de alimentação, 5 V fornecidos pelo Arduino, e V_{out} representa a saída do sinal, resposta do sensor de turbidez. O fototransistor é composto por um material semiconductor e tem seu funcionamento análogo a um registro, que controla a corrente de elétrons que o atravessam em função da incidência de radiação (luz visível ou IR). Na ausência de radiação age como uma resistência infinita, não permitindo a passagem dos elétrons, sendo a corrente elétrica I_{Q1} diretamente proporcional à intensidade da radiação incidente. A magnitude do sinal de saída V_{out} pode ser calculada aplicando a primeira lei de

Ohm, onde V_{out} é o potencial registrado (em Volts), R_1 é a resistência usada (Ohms) e I_{Q1} é a corrente elétrica atravessando o fototransistor (Amperes):

$$V_{out} = R_1 \times I_{Q1} \quad \text{Eq. 1}$$

O Arduino é capaz de receber sinais analógicos no intervalo de 0 a 5 V, por meio de um conversor analógico para digital, este recebe o sinal analógico, e para processá-lo, o converte em um valor do tipo *integer*, número inteiro, com resolução de 10 bits, 1024 pontos, assim, transforma valores de 0 a 5 V em uma escala de 0 a 1023, esta segunda escala foi aqui denominada em unidades arbitrárias - ua, logo possui resolução máxima de 4,9 mV.

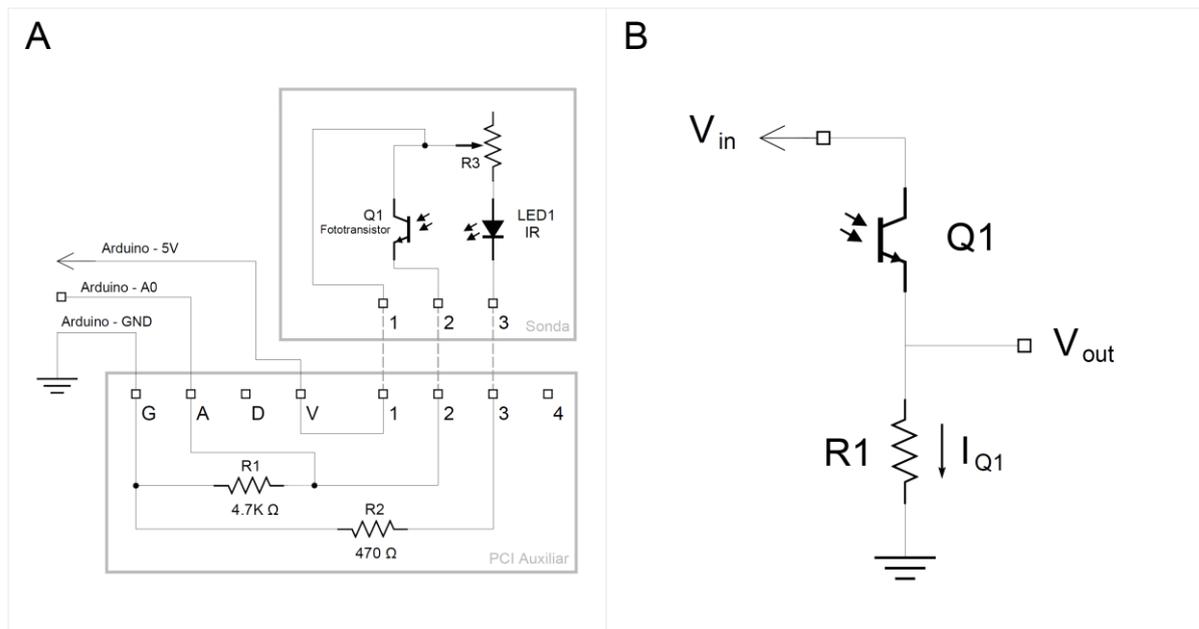


Figura 3.2 - A) Diagrama elétrico do sensor de turbidez de máquina de lavar roupas. B) Detalhe do princípio de funcionamento do circuito eletrônico do fototransistor (dispositivo receptor de radiação).

Para converter os valores em unidades arbitrárias para milivolts basta multiplicá-los por $4,9 \text{ mV.ua}^{-1}$. Este último valor em milivolts é o sinal do turbidímetro aferido, usado para calcular a turbidez registrada pelo sensor.

As únicas adaptações feitas no sensor de turbidez foram a troca da tampa traseira do encapsulamento por uma tampa de acrílico, fabricação própria, visando aprimorar a vedação do sensor, e a troca do cabo do sensor por um cabo de áudio estéreo, dotado de revestimento com malha de cobre, visando a redução de ruído elétrico proveniente de interferências eletromagnéticas externas. A vedação entre o encapsulamento e a tampa traseira do sensor foi realizada por meio de adesivo de cianoacrilato, de forma que o sensor pudesse ser

completamente submerso na solução analítica. O sensor de temperatura foi adquirido já com vedação, montado em um tubo de aço inoxidável de 6 mm de diâmetro.

Com o intuito de avaliar a precisão e acurácia do sensor de turbidez, foi realizado um teste no qual o desempenho do sistema proposto foi comparado com dois modelos de turbidímetros de bancada comerciais, aqui denominados por Comercial 1 – C1 (HI93414, Hanna Instruments, EUA) e Comercial 2 – C2 (HI98703, Hanna Instruments, EUA). Neste primeiro teste foram preparadas 38 soluções, S1 a S38, contendo concentrações de sólidos em suspensão diferentes, com turbidez variando entre 0,5 a 700 UNT, limites inferiores e superiores de detecção de C1 e C2. Cada solução teve sua turbidez aferida em triplicata nas respectivas cubetas de vidro de C1 e C2. Em seguida, foi aferida a resposta do sistema proposto, submergindo a sonda de turbidez em cada solução, mantida em banho termostatado de $30 \pm 0,1$ °C, com agitação magnética e na ausência total de luz visível. O procedimento adotado considerou como resposta do sistema a média de dez amostras consecutivas com intervalo de um segundo, também realizado em triplicata. Foram determinados os termos: Turbidez Medida, como a média dos valores medidos de C1 e C2, e Turbidez Calculada, os valores obtidos por meio da equação que transforma o sinal do sensor para a escala em UNT.

Um segundo experimento foi realizado visando verificar o efeito da resposta do sistema em função da variação da temperatura. A sonda de turbidez foi submersa em água deionizada com agitação magnética e na ausência total de luz visível. Por meio de um banho termostatado a temperatura foi variada em um intervalo de 6,63 a 40,75 °C, neste intervalo foram utilizados um total de 419 pontos, para cada ponto foi mantido tempo suficiente para que a solução e a sonda de turbidez entrassem em equilíbrio térmico.

3.3 Resultados e Discussão

Na primeira série de medições foi aferido o sinal do sensor de turbidez em função da turbidez das soluções S1 a S38, sendo que a turbidez em UNT destas soluções corresponde à turbidez medida. O erro de medição dos turbidímetros comerciais, para valores acima de 3,0 UNT, é de 2,5% em média. O resultado desta primeira série de medições é mostrado na Figura 3.3. Como mostra a figura, acima de 100 UNT, a resposta do sensor em mV parece linear com a turbidez, enquanto para o intervalo entre 10 e 100 UNT, outra função linear pode descrever a relação entre turbidez e sinal do sensor.

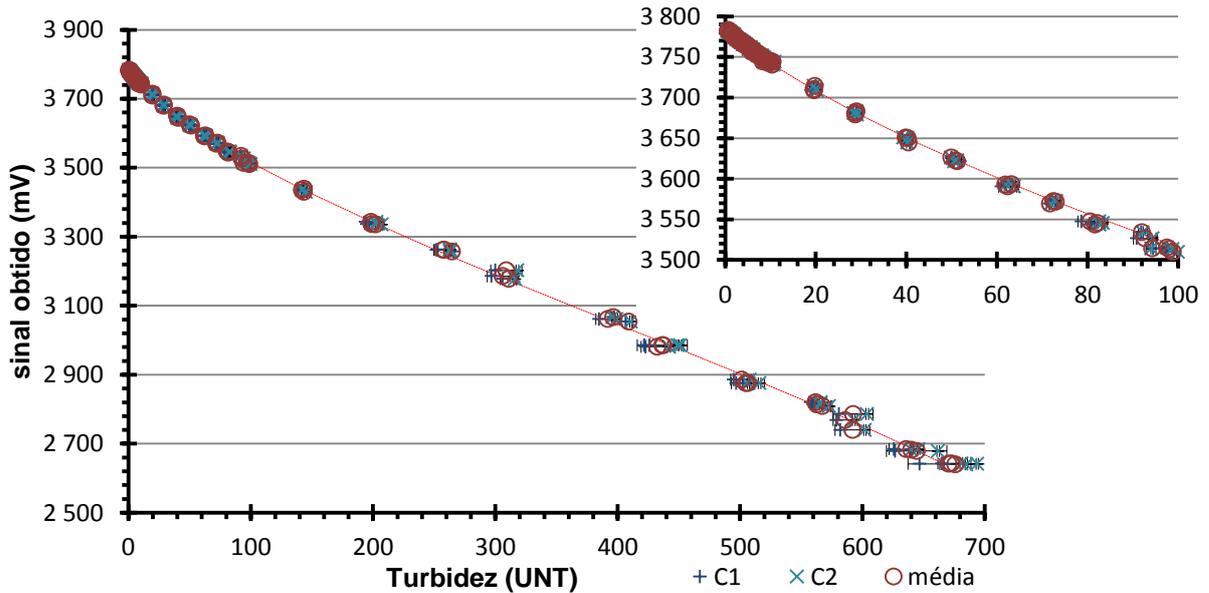


Figura 3.3 - Sinal obtido pelo sensor (em mV) a partir de determinada turbidez na amostra analisada. Detalhe: resultados a partir de amostras com turbidez entre 0 e 100 UNT.

Assim, o sensor pode ser usado da mesma forma que os turbidímetros comerciais: após uma única calibração a partir de pelo menos dois pontos na faixa esperada de operação (10-100 UNT ou 100-700 UNT) o sistema identifica com boa precisão (erro de < 2%, comparável com os turbidímetros comerciais) a turbidez da amostra.

No entanto, o total de dados permite também usar uma única função polinomial de terceiro grau para calcular a turbidez a partir do sinal obtido. Neste caso, uma calibração de quatro pontos na faixa de 5 até 700 UNT permite obter a turbidez da amostra, com mesma precisão, dispensando efetuar duas calibrações e sem restringir a faixa de operação do turbidímetro a apenas uma ordem de magnitude, como é o caso dos turbidímetros comerciais. Uma comparação entre a turbidez calculada a partir do sinal do sensor de turbidez, usando uma função de terceiro grau, e a turbidez medida com os dois turbidímetros comerciais, é apresentado na Figura 3.4.

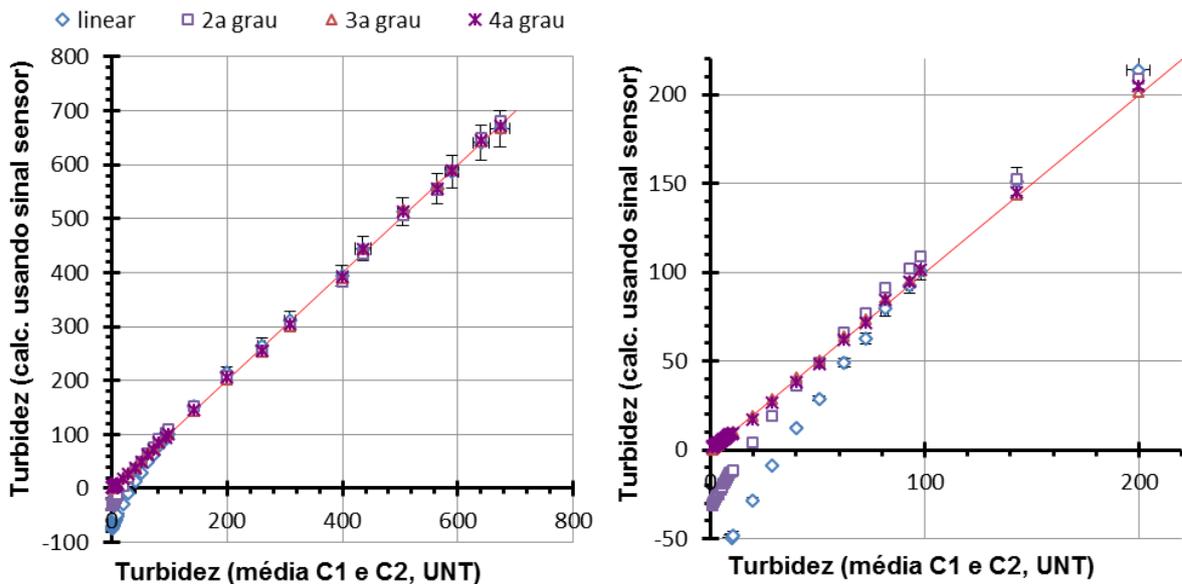


Figura 3.4 - Turbidez calculada a partir do sinal do sensor, comparado com a turbidez medida da amostra, média de C1 e C2. O gráfico à direita é uma parte do gráfico à esquerda. Transformação do sinal em um valor de turbidez usando uma função de terceiro grau permite boa precisão. Linha em vermelha identifica: $turbidez_{medida} = turbidez_{calculada}$

O fato de uma equação do terceiro grau se ajustar melhor para conversão do sinal em toda a escala de operação do sensor pode ser justificado pelo funcionamento do fototransistor, no qual muitos deles possuem a relação da intensidade luminosa pela corrente como uma curva logarítmica, e por consequência a relação entre o sinal do sensor com a turbidez medida apresentando uma curva não linear, como o próprio fabricante demonstra na ficha técnica do sensor.

Na segunda série de medições, na qual foi aferido o sinal do sensor de turbidez em função da temperatura da amostra, foi observada uma grande variação do sinal em função da variação da temperatura, como apresentada na Figura 3.5. Segundo Berkcan (1995), este efeito ocorre em turbidímetros de máquinas de lavar roupa devido à perda de potência ótica do LED em função do aumento da temperatura. Desta forma, operar o sensor de turbidez em temperatura diferente cuja a qual ocorreu a calibração pode resultar em medições equivocadas. Como a cada variação da temperatura determinada parcela do sinal é perdido, a solução sugerida para compensar este efeito é o uso de uma função exponencial, obtida a partir da regressão logarítmica da variação do sinal em função da temperatura, que normalize o valor do sinal, com base no sinal obtido a 30 °C, previamente à aplicação da função que transforma o sinal em escala de UNT.

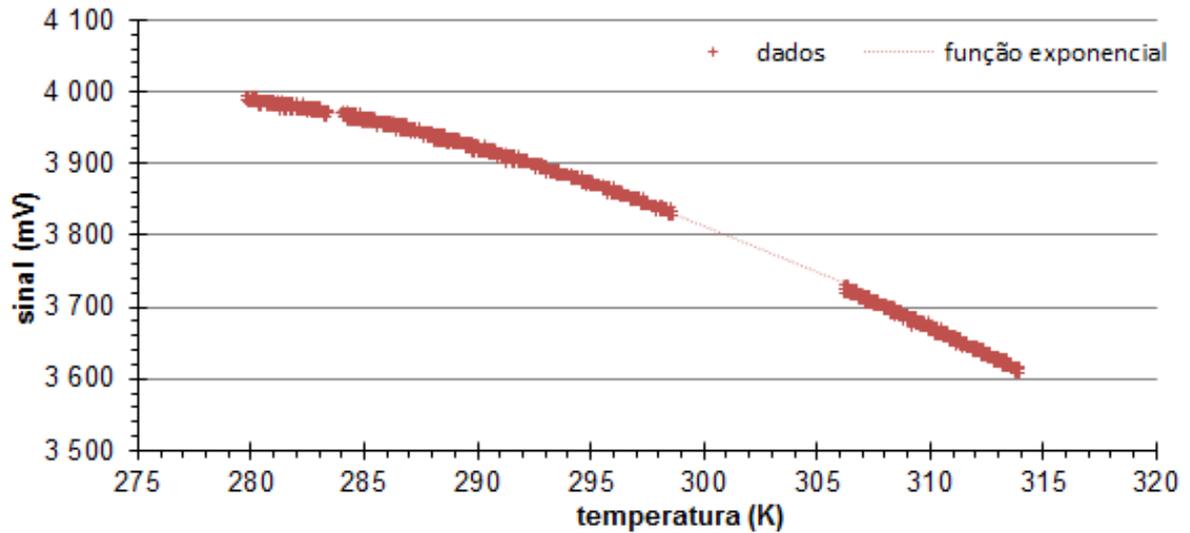


Figura 3.5 - Curva do sinal obtido em função da variação da temperatura, sensor submerso em água deionizada.

Dessa forma, a respeito da temperatura, o sensor de turbidez pode ser operado de duas maneiras: ou trabalhando em temperatura constante, ou após realizar uma calibração de pelo menos três pontos em três temperaturas diferentes, englobando toda a faixa de trabalho esperado.

3.4 Conclusões

A partir de um sensor de turbidez relativamente barato, em conjunto com um micro controlador de código aberto para realizar a aquisição de dados, processamento do sinal, e armazenamento dos resultados é possível construir um medidor de turbidez on-line, capaz de monitorar em tempo real, de forma contínua, a concentração de sólidos suspensos em um fluxo de água. Tal equipamento pode ser usado para monitoramento da qualidade de água, mas também para o monitoramento e controle de processos, como, por exemplo, em estações de tratamento de água (ETAs) e de esgoto (ETEs), e para o controle de processos biotecnológicos, como o cultivo de algas.

A resposta do sinal do sensor à turbidez não é linear, mas pode ser aproximado com uma função de terceiro grau. Desta forma, a calibração do sensor, assim como é o caso com turbidímetros de laboratório, pode ser feito aproximando a turbidez usando correlações lineares para duas ou três faixas de ordem de magnitude de turbidez, ou usando uma função de terceiro grau para uma só faixa de valores cobrindo toda a faixa de trabalho do sensor a partir de 5 UNT, mas neste caso é preciso usar pelo menos quatro pontos de calibração com valores englobando toda a faixa de trabalho desejado.

Como o sinal de resposta do sensor ótico é sensível às variações de temperatura, o equipamento pode ser operado de duas formas: ou trabalhando em temperatura constante, ou após realizar uma calibração de pelo menos três pontos em três temperaturas diferentes, englobando toda a faixa de trabalho esperado.

Com o custo final do presente projeto representando apenas uma pequena fração do custo de um turbidímetro on-line comercial, este tipo de equipamento pode ser uma alternativa para fins de pesquisa, mas também para pequenas estações de tratamento, bem como para fins de monitoramento da qualidade de cursos d'água.

3.5 Referências Bibliográficas

- Ali, A.S., Zanzinger, Z., Debose, D., Stephens, B. (2016). Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. *Building and Environment*, **100**, pp. 114–126.
- Barnard, H.R., Findley, M.C., Csavina, J. (2014). PARduino: A simple and inexpensive device for logging photosynthetically active radiation. *Tree Physiology*, **34**, pp. 640–645.
- Berkcan, E. (1995). Temperature compensation method for a turbidity sensor used in an appliance for washing articles. US005477576A.
- Bertram, A., Berends, E., Reilmann, M. (2004). Device for a turbidity sensor for a dishwasher or washing machine. US007392813B2.
- Brasil, (1997). LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm. Acesso em: 27 janeiro 2018.
- Diamond, D., Lau, K.T., Brady, S., Cleary, J. (2008). Integration of analytical measurements and wireless communications-Current issues and future strategies. *Talanta*, **75**, pp. 606–612.
- Durfee, A. (2003). Static and dynamic turbidity sensing in a washing appliance. US 20030196278A1.
- Erickson, T., Hammond, B., O'Brien, G., Reeve, I. (1996). Electromechanically actuated turbidity sensor for a machine for washing articles. US005729025A.
- Lin, B., Xu, Z., Wang, J., Lu, M. (2017). A low-cost water quality monitoring prototype device with embedded chromogenic reagent capsules and dynamic colorimetric detection. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, **252**, pp. 24–29.
- Meyers, G., Kapelan, Z., Keedwell, E. (2017). Short-term forecasting of turbidity in trunk

- main networks. *Water Research*, **124**, pp. 67–76.
- Pearce, J.M., (2014). Open-Source La, Open-Source Lab. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410462-4.00001-9>
- Román, C., Loza, D., Segura, L., Dabirian, R. (2016). Construcción con tecnologías abiertas de un sensor de turbidez de bajo costo. *Iteckne*, **13**, pp. 17–22.
- Rymszewicz, A., O’Sullivan, J. J., Bruen, M., Turner, J. N., Lawler, D. M., Conroy, E., Kelly-Quinn, M. (2017). Measurement differences between turbidity instruments, and their implications for suspended sediment concentration and load calculations: A sensor inter-comparison study. *Journal of Environmental Management*, **199**, pp. 99–108.
- Sasano, K. (2000). Drum type washing machine with turbidity sensor. US006536243B2.
- Stutter, M., Dawson, J.J.C., Glendell, M., Napier, F., Potts, J.M., Sample, J., Vinten, A., Watson, H. (2017). Evaluating the use of in-situ turbidity measurements to quantify fluvial sediment and phosphorus concentrations and fluxes in agricultural streams. *Science of the Total Environment*, **607–608**, pp. 391–402.
- Schwarzenbach, R. P., Egli, T., Hofstetter, T. B., Von Gunten, U., & Wehrli, B. (2010). Global water pollution and human health. *Annual Review of Environment and Resources*, **35**, pp. 109–136
- Wang, L., Wang, X., Jin, X., Xu, J., Zhang, H., Yu, J. (2017). Analysis of algae growth mechanism and water bloom prediction under the effect of multi-affecting factor. *Saudi Journal of Biological Sciences*, **24(3)**, pp. 556–562.
- Wu, Z., Wang, X., Chen, Y., Cai, Y., Deng, J. (2018). Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu. *Science of the Total Environment*, **612**, pp. 914–922.

4

Otimização da incidência de luz para redução do superaquecimento em fotobiorreatores

4.1 Introdução

Em meio a diversas fontes alternativas para a produção de bioenergia, as microalgas se destacam por diversos aspectos, como, por exemplo, possuem a mais alta taxa de crescimento dentre todos os organismos fotossintetizantes. Pelo fato de não demandarem terras agricultáveis para sua produção, sendo assim mais eficientes quanto ao uso do solo em comparação às culturas terrestres, estas podem reduzir a competição da produção de biocombustíveis com a produção de alimentos (Chisti, 2007; Cooney *et al.*, 2011; Gordon & Polle, 2007). Outra característica favorável às microalgas, organismos aquáticos fotossintetizantes, é a sua simples necessidade nutricional. Para produzir biomassa, de forma autotrófica, tais organismos necessitam essencialmente de luz solar, dióxido de carbono, macronutrientes, como nitrogênio e fósforo, e alguns micronutrientes. Substâncias estas abundantemente encontradas em efluentes e rejeitos urbanos e industriais, permitindo a combinação da produção de microalgas com o tratamento de efluentes e a fixação de CO₂ (Amaro *et al.*, 2011; Chinnasamy *et al.*, 2010; Kumar *et al.*, 2010; Lizzul *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2010).

Apesar de muito promissora, a exploração de microalgas como fonte de energia ainda enfrenta alguns obstáculos, como a viabilidade econômica. Desenvolvido para atender indústrias, tais como, farmacêutica, cosmética e de suplemento alimentar, as atuais tecnologias de cultivo de microalgas, visam à extração de compostos orgânicos de alto valor, como pigmentos, antioxidantes, proteínas e ácidos graxos poli-insaturados (Batista *et al.*, 2013). Dessa forma, processos com uma elevada eficiência energética não foram priorizados, o que torna a aplicação destas tecnologias incompatíveis com a produção, em larga escala, de biocombustíveis.

Um dos principais problemas com as tecnologias disponíveis atualmente é a necessidade de controlar a temperatura em fotobiorreatores. A alta produtividade de microalgas em fotobiorreatores, comparada à produtividade em lagoas abertas, é em parte fruto da sua reduzida espessura da lâmina d'água, favorecendo a penetração da luz, entretanto, torna-os mais propensos ao superaquecimento. Mesmo em poucas horas de exposição ao sol, a temperatura de tal modalidade de cultivo alcança facilmente níveis críticos, podendo prejudicar as taxas de crescimento ou até causar um colapso do cultivo (Hindersin *et al.*, 2013).

Para lidar com essa problemática e garantir a eficiência da produção de microalgas em fotobiorreatores sob a ação de condições climáticas extremas, há a necessidade de se adotar sistemas de controle de temperatura. Os dispositivos descritos na literatura são basicamente os trocadores de calor (Briassoulis *et al.*, 2010; Kochem *et al.*, 2014; Masojídek *et al.*, 2003; Sierra *et al.*, 2008) e os sistemas de evaporação de água pulverizada na superfície do reator (Cheng-Wu *et al.*, 2001; Chini Zittelli *et al.*, 1999; Torzillo *et al.*, 1986). Todavia, tais práticas implicam no aumento do custo operacional em função de seu constante consumo de energia. O problema principal é que estas alternativas paliativas não combatem as causas do superaquecimento, buscam apenas conter seus efeitos.

De acordo com Morweiser e colaboradores (2010), o custo com controle de temperatura é um parâmetro crítico do processo e causa um grande impacto em seu balanço energético. Melhor, que gastar energia para dissipar a energia excedente proveniente do sol, seria evitar o fornecimento de energia além do necessário para as microalgas. Segundo Pereira e colaboradores (2013), que estudaram os diferentes fluxos de calor que ocorrem em um fotobiorreator para cultivo de microalgas em condições externas, limitar a radiação que incide sobre um fotobiorreator é a melhor estratégia para manter uma faixa de temperatura tolerável pelas microalgas. Entretanto, a radiação, se fornecida insuficientemente também causará um decréscimo na taxa de crescimento. Dessa forma, faz-se necessário conhecer exatamente a quantidade de energia, e qualidade de radiação, requerida pelas microalgas.

A radiação solar incide na superfície terrestre com espectro, ou intervalo de comprimento de ondas, entre 300 e 4000 nm, porém a radiação infravermelha - IV, com comprimento de onda superior a 750 nm, correspondente de 40% a 55% da energia total proveniente do sol (Goetz

et al., 2011; Morweiser *et al.*, 2010), não possui energia quântica suficiente para as transformações químicas ocorrendo na fotossíntese, assim, tem como efeito apenas o aumento da temperatura (Carvalho *et al.*, 2011). Por sua vez, a radiação ultravioleta - UV, cujo comprimento de onda é inferior a 380 nm, correspondente a 5% da energia total proveniente do sol, possui efeito ionizante e assim é altamente nociva às microalgas (Carvalho *et al.*, 2011). Apenas a luz visível, com comprimento de ondas no intervalo de 380 a 750 nm, pode ser usada para a atividade fotossintetizante. Todavia, se a intensidade de luz visível incidente ultrapassar a quantidade de energia requerida para as microalgas, o nível de saturação, essa é dissipada na forma de calor como medida defensiva para preservação da integridade das proteínas responsáveis pela fotossíntese, através dos carotenoides (Carvalho *et al.*, 2011; Masojídek *et al.*, 2003).

Em relação à disponibilidade de luz as microalgas podem apresentar três regimes: limitação, saturação ou inibição. Quando fornecida abaixo do requerido, a luz encontra-se em limitação. Um aumento em sua intensidade eleva a taxa de fotossíntese, até atingir um limite de saturação, no qual aumentando-se a intensidade de luz não mais altera a taxa de fotossíntese, até atingir um segundo limite, de inibição ou fotoinibição, em que um acréscimo da intensidade de luz provoca a queda da taxa de fotossíntese (Béchet *et al.*, 2013; Morweiser *et al.*, 2010). Em condição de fotoinibição, devido ao excesso de energia absorvida, são formados radicais livres que podem degradar os pigmentos e proteínas responsáveis pela fotossíntese. Para preservar sua sobrevivência, a microalga passa a utilizar a energia que seria empregada em seu crescimento e reprodução para resintetizar às moléculas danificadas, prejudicando sua taxa de crescimento (Simionato *et al.*, 2013).

Sendo assim, para o combate eficaz do superaquecimento em fotobiorreatores, em condições de extrema insolação, as radiações infravermelha e ultravioleta devem ser evitadas. Tendo em vista que o intervalo visível compreende a única qualidade de radiação aproveitável pelas microalgas durante o processo de fotossíntese, é ainda necessário investigar a quantidade dessa radiação que as microalgas podem aproveitar antes que estas entrem em estado de saturação de luz. De modo a evitar que parte da radiação excedente seja convertida em calor onerando os custos para dissipá-lo.

O presente trabalho teve como objetivo investigar em bancada os níveis de saturação de luz de um consórcio de microalgas, e com base nessas informações propor estratégias que busquem o combate do superaquecimento do cultivo de microalgas em fotobiorreatores sob intensa insolação, procurando reduzir os gastos energéticos com dissipação de calor, de modo a contribuir pela busca da viabilidade econômica do aproveitamento das microalgas como fonte de energia.

4.2 Material e Métodos

Com a finalidade de avaliar o nível de saturação de luz do consórcio de microalgas em questão, foi realizado um cultivo em escala de bancada, no qual a eficiência da fotossíntese, como resposta, foi avaliada em função da variação da intensidade de luz e concentração de microalgas. Os experimentos foram conduzidos no fotobiorreator descrito no Capítulo 2 deste trabalho, com temperatura controlada para se manter em 30 °C.

No total foram testadas três concentrações iniciais de microalgas diferentes, preparadas de acordo com a medição da turbidez da solução, sendo elas: 10, 50 e 100 UNT. Cada concentração inicial foi testada sob seis intensidades de luz diferentes, seguindo os valores: 100, 500, 1000, 1750, 2500 e 3500 $\mu\text{mol}_{\text{fótons}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Totalizando 18 cultivos, cada um com duração de 20 horas, sendo realizados em dias consecutivos.

As microalgas utilizadas em todos os testes consistem em um consórcio coletado, em abril de 2010, em uma lagoa de armazenamento de vinhaça de uma usina de açúcar e álcool, utilizadas em pesquisas de processos de tratamento de efluentes no laboratório onde o presente trabalho foi desenvolvido. O consórcio foi identificado em nível de gênero, com predominância de *Raphidocelis* sp., *Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp.. Como meio de cultivo padrão para os testes foi utilizado o *Bold's Basal Medium* (BBM) (Nichols, 1973), muito utilizado para o gênero de microalga adotado (Bertoldi *et al.*, 2009; Lim *et al.*, 2010; Oncel *et al.*, 2011). Como o cultivo ocorreu em um ambiente vedado foi dosado bicarbonato de sódio como fonte de carbono inorgânico na proporção de 1,0 g.L⁻¹.

O estoque de microalgas foi mantido em um *Becker* de vidro de 2,0 litros, iluminado com um refletor de LED doméstico, de 50 W, cor branco frio, e mantido sob agitação magnética. Todos os dias, o volume de microalgas retirado do estoque para realização dos testes, \approx 50%,

era repostado por meio de cultivo novo. Visando padronizar as condições iniciais de cada cultivo, antes do preparo de cada solução, as microalgas tinham seu pH ajustado para 6,00 por meio da injeção de uma mistura gasosa contendo CO₂ e N₂, a solução também recebeu uma lavagem com meio de cultivo novo, pelo processo de centrifugação, 3000 rpm por 5 minutos, descarte do sobrenadante e ressuspensão com meio de cultivo novo, repetidos por três vezes, em seguida o centrifugado era diluído até atingir a concentração inicial desejada. Em seguida 650 ml da solução era inserida no compartimento de cultivo do reator e este era devidamente tampado e vedado.

Antes do início de cada cultivo, foi injetado N₂ gasoso para expulsar o oxigênio dissolvido até valores próximo de zero mg.L⁻¹, e em seguida dosado o bicarbonato de sódio. As microalgas eram então mantidas pelo período de duas horas no escuro para excluir o efeito da produção de oxigênio anterior. Nesse período a temperatura do reator era estabilizada em 30 °C.

4.3 Resultados e Discussão

Com os resultados do monitoramento dos experimentos realizados, pode-se observar que, nos instantes iniciais do cultivo, o acréscimo da radiação luminosa provocou um aumento na eficiência da fotossíntese, constatada pela elevação da produção de oxigênio, Figura 4.1.

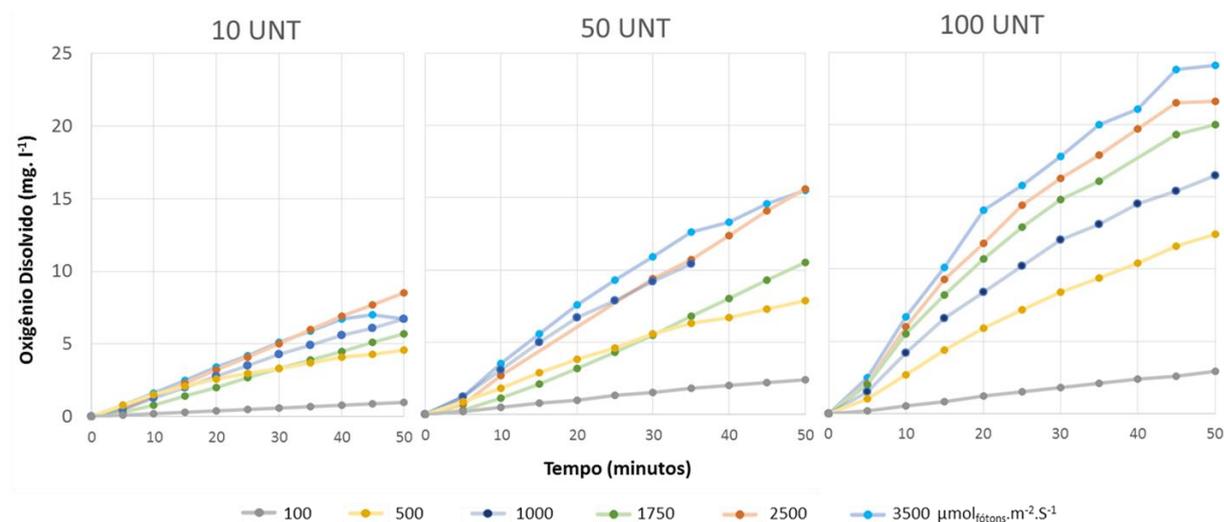


Figura 4.1 - Resultado do monitoramento da produção de Oxigênio nos instantes iniciais de cada cultivo.

Entretanto, conforme a intensidade luminosa é aumentada a produção de oxigênio não segue o mesmo ritmo, dando indícios, já em um primeiro momento da saturação de luz, os cultivos com turbidez inicial de 10 e 50 UNT, sob a maior intensidade de luz testada,

3500 $\mu\text{mol f\u00f3tons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, tiveram produ\u00e7\u00e3o de oxig\u00eanio menor ou igual \u00e0 intensidade de luz inferior.

Embora pare\u00e7a que, nos instantes iniciais, os cultivos realizados com 100 UNT n\u00e3o foram afetados pelos efeitos delet\u00e9rios do excesso de radia\u00e7\u00e3o, observa-se que isso n\u00e3o se sustenta ao longo do cultivo inteiro de 20 horas. Ao analisar a taxa de produ\u00e7\u00e3o durante todo o cultivo, como sendo a diferen\u00e7a entre a concentra\u00e7\u00e3o final e inicial no intervalo de tempo, Figura 4.2, pode-se constatar que, os cultivos com maior produ\u00e7\u00e3o de oxig\u00eanio inicial, n\u00e3o obtiveram maior produ\u00e7\u00e3o em massa durante o cultivo inteiro. O excesso de radia\u00e7\u00e3o pode n\u00e3o comprometer o crescimento imediatamente, mas, seus efeitos acumulativos de degrada\u00e7\u00e3o na estrutura celular, podem se manifestar na taxa de produ\u00e7\u00e3o a longo prazo, inviabilizando a continuidade do crescimento.

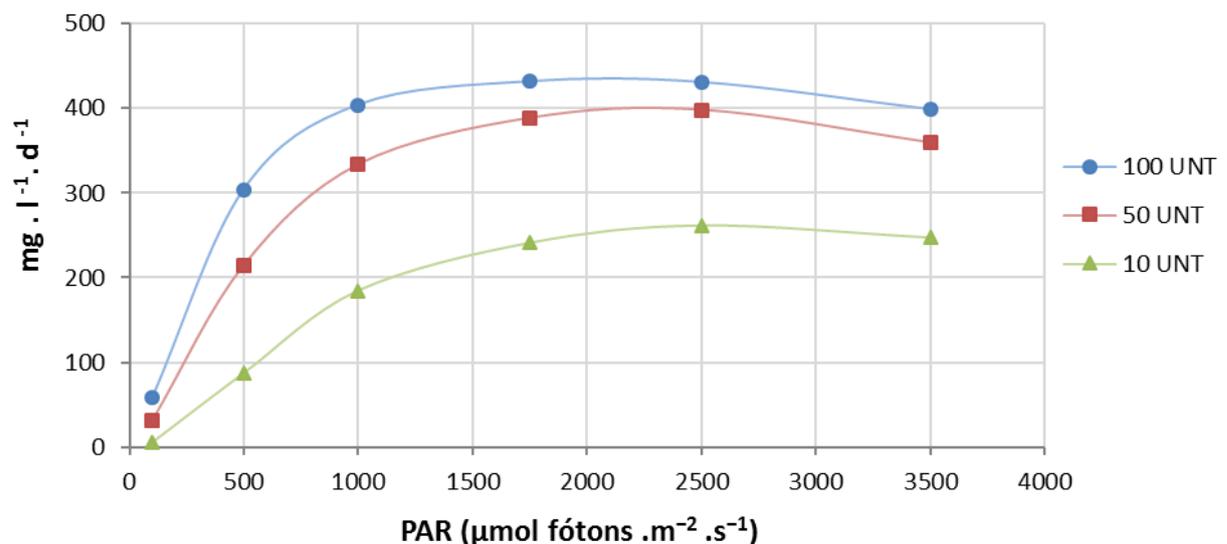


Figura 4.2 - Taxa de produ\u00e7\u00e3o das microalgas durante as 20 horas de cultivo, para os cultivos com turbidez inicial de 10, 50 e 100 UNT.

A Figura 4.3 apresenta um gr\u00e1fico da diferen\u00e7a entre a temperatura do cultivo e a temperatura do fluido trocador de calor de um per\u00edodo de uma hora, no qual ambas as temperaturas se mantiveram constantes, para que estatisticamente possa indicar a quantidade de calor que necessitou ser dissipada pelo sistema de controle da temperatura para manter a temperatura do cultivo no valor desejado, 30 $^{\circ}\text{C}$. Foram utilizados os resultados dos cultivos com solu\u00e7\u00e3o inicial de 100 UNT, e foram comparados as quatro intensidades de luz nas quais os cultivos

obtiveram produção em massa semelhante, $\approx 400 \text{ mg.l}^{-1}.\text{d}^{-1}$. Pode-se observar que o cultivo iluminado com fluxo luminoso de $1000 \mu\text{mol}_{\text{fótons}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ obteve melhor desempenho em relação aos demais, pois este requereu menor dissipação de energia para se manter em $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

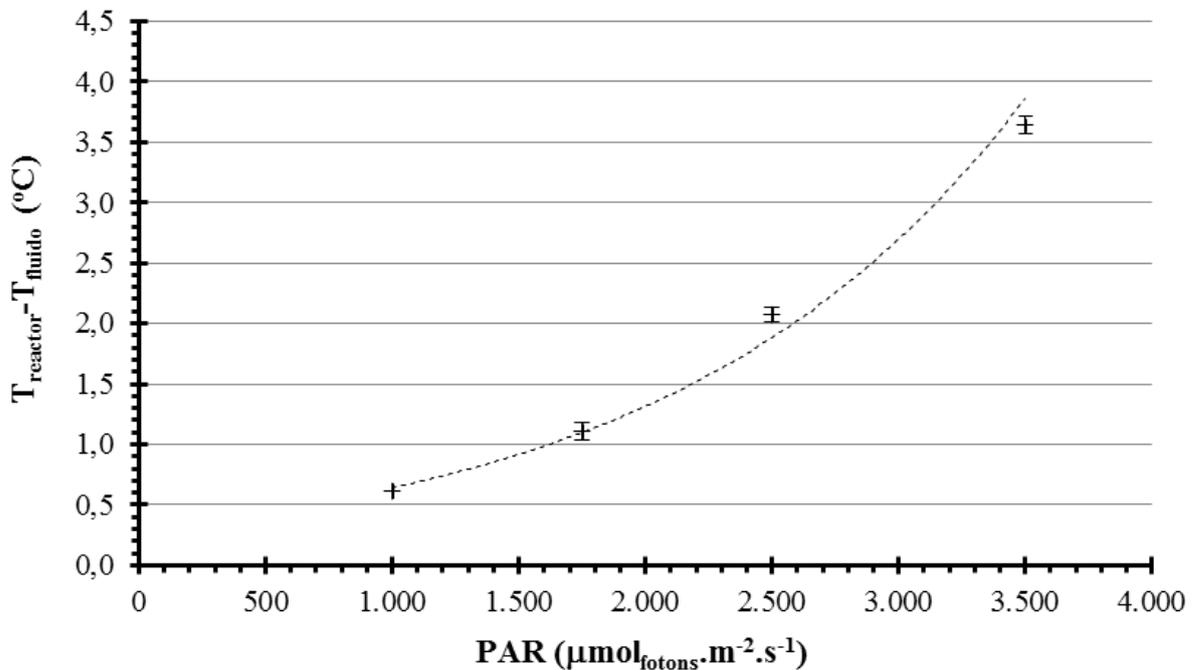


Figura 4.3 - Gráfico da diferença entre a temperatura do cultivo e fluido trocador de calor em um período de uma hora em que ambas temperaturas permaneceram constante.

Quanto à eficiência energética do processo, os resultados sugerem que, visando reduzir os custos com dissipação de calor, o ideal seria limitar a intensidade de luz incidente no fotobiorreator em $1000 \mu\text{mol}_{\text{fótons}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Uma vez que, na faixa investigada, intensidades maiores não trouxeram qualquer aumento significativo na produção, mas sim um excesso de energia, com aumento exponencialmente, a ser dissipado na forma de calor.

4.4 Conclusões

Concluiu-se no presente trabalho que a saturação de luz, em cultivos com baixa concentração inicial de microalgas, pode ser observada apenas avaliando a produção de oxigênio nos primeiros instantes. Entretanto, os efeitos do excesso de radiação são melhor observados ao considerar a produção de biomassa ao longo de um prazo maior de cultivo, uma vez que tais efeitos podem demorar a se manifestar na taxa de produção, não a afetando inicialmente, mas podendo inviabilizar a continuidade do crescimento a longo prazo.

Os resultados ainda sugerem que uma boa estratégia para redução dos custos com dissipação de calor no cultivo de microalgas em fotobiorreatores, seria, além de evitar a incidência das radiações infravermelho e ultravioleta, limitar a radiação visível com intensidade acima de $1000 \mu\text{mol f\u00f3tons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, por exemplo utilizando um sistema de sombreamento din\u00e2mico controlado pelo monitoramento da luz PAR. Entretanto, esta estrat\u00e9gia ainda deva ser testada em condi\u00e7\u00f5es reais em um fotobiorreator irradiado com luz solar. Se comprovada, pode se tornar um avan\u00e7o na dire\u00e7\u00e3o da viabilidade econ\u00f4mica da produ\u00e7\u00e3o de biocombust\u00edveis provenientes da biomassa de microalgas.

4.5 Refer\u00eancias Bibliogr\u00e1ficas

- Amaro, H.M., Guedes, A.C., Malcata, F.X. (2011). Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Applied Energy*, **88**(10), 3402-3410.
- Batista, A.P., Gouveia, L., Bandarra, N.M., Franco, J.M., Raymundo, A. (2013). Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products. *Algal Research*, **2**(2), 164-173.
- B\u00e9chet, Q., Shilton, A., Guieysse, B. (2013). Modeling the effects of light and temperature on algae growth: State of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation. *Biotechnology Advances*.
- Bertoldi, F.C., Sant'Anna, E., Barcelos-Oliveira, J.L. (2009). *Chlorella vulgaris* cultivated in hydroponic wastewater. in: *Acta Horti*, Vol. 843, ISHS, pp. 203-210.
- Briassoulis, D., Panagakis, P., Chionidis, M., Tzenos, D., Lalos, A., Tsinos, C., Berberidis, K., Jacobsen, A. (2010). An experimental helical-tubular photobioreactor for continuous production of *Nannochloropsis* sp. *Bioresource Technology*, **101**(17), 6768-6777.
- Carvalho, A., Silva, S., Baptista, J., Malcata, F.X. (2011). Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **89**(5), 1275-1288.
- Cheng-Wu, Z., Zmora, O., Kopel, R., Richmond, A. (2001). An industrial-size flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis* sp. (Eustigmatophyceae). *Aquaculture*, **195**(1-2), 35-49.

- Chini Zittelli, G., Lavista, F., Bastianini, A., Rodolfi, L., Vincenzini, M., Tredici, M.R. (1999). Production of eicosapentaenoic acid by *Nannochloropsis* sp. cultures in outdoor tubular photobioreactors. *Journal of Biotechnology*, **70**(1–3), 299-312.
- Chinnasamy, S., Bhatnagar, A., Hunt, R.W., Das, K.C. (2010). Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications. *Bioresource Technology*, **101**(9), 3097-3105.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, **25**(3), 294-306.
- Cooney, M.J., Young, G., Pate, R. (2011). Bio-oil from photosynthetic microalgae: Case study. *Bioresource Technology*, **102**(1), 166-177.
- Goetz, V., Le Borgne, F., Pruvost, J., Plantard, G., Legrand, J. (2011). A generic temperature model for solar photobioreactors. *Chemical Engineering Journal*, **175**(0), 443-449.
- Gordon, J., Polle, J. (2007). Ultrahigh bioproductivity from algae. *Appl Microbiol Biotechnol*, **76**(5), 969-975.
- Hindersin, S., Leupold, M., Kerner, M., Hanelt, D. (2013). Irradiance optimization of outdoor microalgal cultures using solar tracked photobioreactors. *Bioprocess Biosyst Eng*, **36**(3), 345-355.
- Kochem, L.H., Da Fré, N.C., Redaelli, C., Rech, R., Marcílio, N.R. (2014). Characterization of a Novel Flat-Panel Airlift Photobioreactor With an Internal Heat Exchanger. *Chemical Engineering & Technology*, **37**(1), 59-64.
- Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Sahu, A., Zhang, Q., Dewulf, J., Malcata, F.X., van Langenhove, H. (2010). Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in Biotechnology*, **28**(7), 371-380.
- Lim, S.-L., Chu, W.-L., Phang, S.-M. (2010). Use of *Chlorella vulgaris* for bioremediation of textile wastewater. *Bioresource Technology*, **101**(19), 7314-7322.
- Lizzul, A.M., Hellier, P., Purton, S., Baganz, F., Ladommatos, N., Campos, L. (2013). Combined remediation and lipid production using *Chlorella sorokiniana* grown on wastewater and exhaust gases. *Bioresource Technology*, **151**, 12-18.

- Masojídek, J., Papáček, Š., Sergejevová, M., Jirka, V., Červený, J., Kunc, J., Korečko, J., Verbovikova, O., Kopecký, J., Štys, D., Torzillo, G. (2003). A closed solar photobioreactor for cultivation of microalgae under supra-high irradiance: basic design and performance. *Journal of Applied Phycology*, **15**(2-3), 239-248.
- Morweiser, M., Kruse, O., Hankamer, B., Posten, C. (2010). Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **87**(4), 1291-1301.
- Nichols, W.H. (1973). Growth media—freshwater. in: *Handbook of Phycological Methods: Culture Methods and Growth Measurements*, (Ed.) C.U. Press, Cambridge University Press. Cambridge, pp. 7–24.
- Oncel, S.S., Imamoglu, E., Gunerken, E., Sukan, F.V. (2011). Comparison of different cultivation modes and light intensities using mono-cultures and co-cultures of *Haematococcus pluvialis* and *Chlorella zofingiensis*. in: *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol. 86, pp. 414–420.
- Pereira, D.A., Rodrigues, V.O., Gómez, S.V., Sales, E.A., Jorquera, O. (2013). Parametric sensitivity analysis for temperature control in outdoor photobioreactors. *Bioresource Technology*, **144**, 548-553.
- Sierra, E., Ación, F.G., Fernández, J.M., García, J.L., González, C., Molina, E. (2008). Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, **138**(1–3), 136-147.
- Simionato, D., Basso, S., Giacometti, G.M., Morosinotto, T. (2013). Optimization of light use efficiency for biofuel production in algae. *Biophysical Chemistry*, **182**, 71.
- Torzillo, G., Pushparaj, B., Bocci, F., Balloni, W., Materassi, R., Florenzano, G. (1986). Production of *Spirulina* biomass in closed photobioreactors. *Biomass*, **11**(1), 61-74.
- Wang, L., Li, Y., Chen, P., Min, M., Chen, Y., Zhu, J., Ruan, R.R. (2010). Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp. *Bioresource Technology*, **101**(8), 2623-2628.

5

Efeito da luz intermitente em fotobiorreatores

5.1 Introdução

Para viabilizar o uso da biomassa de microalgas como fonte de energia ainda é necessário aprimorar as tecnologias de cultivo existentes, buscando diminuir seu consumo de energia e aumentar a eficiência da fotossíntese. Diversas técnicas são aplicadas com o intuito de aumentar a eficiência na conversão da energia luminosa em biomassa. Com um acréscimo de 30 a 170% na eficiência, uma das alternativas exploradas é a aplicação do efeito da luz intermitente (Simionato *et al.*, 2013; Xue *et al.*, 2013).

As unidades fotossintéticas das microalgas necessitam aproximadamente de 100 milissegundos para converter a energia luminosa em ATP. Durante tal período, qualquer fóton que atingir a unidade fotossintética será desperdiçado. Por consequência, células expostas à luz intermitente com ciclos de claro/escuro na ordem de 100 ms desperdiçam menos energia luminosa em comparação àquelas expostas a luz contínua. O aumento da eficiência da fotossíntese resultante da exposição à luz intermitente denomina-se de efeito da luz intermitente ou *flashing light effect* (Béchet *et al.*, 2013).

Estudos recentes mostram que, as microalgas conseguem manter a eficiência do crescimento quando irradiadas a uma intensidade luminosa em até oito vezes superior ao seu nível de saturação de luz, caso esta seja fornecida intermitentemente (Simionato *et al.*, 2013). Em ciclos na ordem de milissegundos alternados por um intervalo escuro, o fornecimento de luz em pequenos pulsos, possibilita que a energia excedente acumulada seja devidamente dissipada, antes que se formem os radicais livres. O que reduz a degradação dos pigmentos e proteínas chaves responsáveis pela fotossíntese, consequentemente, favorecendo a taxa de crescimento das microalgas (Carvalho *et al.*, 2011; Morweiser *et al.*, 2010).

Um exemplo de aplicação do efeito da luz intermitente ocorre em fotobiorreatores que operam com elevada concentração de microalgas, nos quais, devido ao auto sombreamento das

células, é criado um gradiente luminoso. Ao se aplicar uma alta taxa de mistura, as células transitam entre regiões mais iluminadas e regiões escuras, podendo estas, nesse caso, experimentarem o efeito da luz intermitente (Liao *et al.*, 2014). Para alcançarem um fotoperíodo coincidente às reações fotossintéticas, ciclos na ordem de milissegundos, é necessário induzir ao fluxo turbulento, o que demanda em aumento da vazão de recirculação, podendo ser aprimorado pela instalação de deflectores estáticos. Entretanto, para manter tal condição, mais energia será consumida pelo sistema de bombeamento, e as células são expostas a maior estresse hidráulico. Além do que, o movimento aleatório das partículas em fluxo turbulento não possibilita o controle preciso dos ciclos (Xue *et al.*, 2013).

Segundo Gutierrez-Wing e colaboradores (2014), os diversos métodos propostos para otimizar a eficiência do uso da luz em fotobiorreatores partem de duas principais estratégias: 1) controlar a intensidade da radiação fornecida para a cultura ou, 2) controlar o seu tempo de exposição. O Capítulo 4 deste trabalho se propõe a explorar o controle da intensidade da radiação para o aprimoramento da eficiência da fotossíntese em fotobiorreatores, no presente Capítulo é proposto a aplicação da segunda estratégia, o controle do tempo de exposição à luz por meio de seu fornecimento intermitente.

Sendo assim, o presente capítulo teve como objetivo avaliar o desempenho do cultivo de microalgas sob a ação do fornecimento de luz intermitente, investigando em bancada o efeito do fotoperíodo, ciclos de claro e escuro, em relação à eficiência da fotossíntese e na taxa de produção de microalgas.

5.2 Material e Métodos

Com a finalidade de avaliar o efeito do fornecimento de luz intermitente no crescimento do consórcio de microalgas em questão, foi realizado um cultivo em escala de bancada, no qual a eficiência da fotossíntese, como resposta, foi avaliada em função do fotoperíodo.

Os experimentos foram conduzidos no fotobiorreator descrito no Capítulo 2 deste trabalho. O consórcio de microalgas e meio de cultivo utilizados foram preparados conforme descritos no capítulo 4.

Uma vez que, no presente experimento, a resposta obtida será em função de duas variáveis, duração do pulso de luz e duração do tempo escuro, optou-se pela aplicação de um planejamento experimental fatorial do tipo 2^2 , no qual para cada fator, ou parâmetro, serão

testados em dois níveis, um alto e um baixo, possibilitando não apenas visualizar o efeito de cada fator em relação à resposta, mas também o efeito da inter-relação entre os fatores.

Os níveis, superiores e inferiores, adotados para cada fator estão esquematizados e codificados na Tabela 5.1. A duração e frequência dos pulsos de luz adotadas se baseou na escala próxima aos fotoperíodos ótimos encontrados por (Grobbelaar *et al.*, 1996; Morweiser *et al.*, 2010; Sforza *et al.*, 2012).

Tabela 5.1- Detalhamento dos fatores e níveis codificados para o experimento fatorial 2^k

Fator	Parâmetro	Unidade	Níveis	
			-	+
A	Duração do pulso de luz	ms	100	1000
B	Duração do escuro	ms	100	1000

Foram testadas todas as possíveis combinações entre os níveis dos fatores considerados, totalizando 4 tratamentos distintos, conforme esquematizados na Tabela 5.2 Em cada teste foi avaliada a eficiência da fotossíntese, monitorada através da produção de oxigênio e a produção em massa das microalgas.

Tabela 5.2 - Tratamentos do experimento fatorial 2^k

Tratamento	A	B	Pulso (ms)	Escuro (ms)	Fotoperíodo
1	0	-	100	100	50%
2	a	+	1000	100	91%
3	b	-	100	1000	9%
4	ab	+	1000	1000	50%

Em todos os testes foram utilizados uma solução de microalgas com turbidez inicial de 50 UNT e a intensidade do fluxo de luz foi mantida em 3500 $\mu\text{mol}_{\text{fótons}}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Para título de comparação, foi considerado um dos resultados do experimento do capítulo anterior, no qual possuía as mesmas condições aqui testadas, concentração inicial e intensidade de luz, porém com fornecimento de luz contínua.

5.3 Resultados e Discussão

Ao analisar a produção de oxigênio durante os primeiros minutos de cultivo pode-se observar que a aplicação de um intervalo escuro no fornecimento de luz favorece a produção das microalgas, entretanto, apenas para o tratamento 2, com fornecimento de 91% de energia em comparação a luz contínua, obteve um desempenho melhor comparado a esta. O fornecimento

de luz contínua mostrou desempenho parecido com o tratamento 1, embora este forneça apenas 50% da energia em comparação à luz contínua, Figura 5.1.

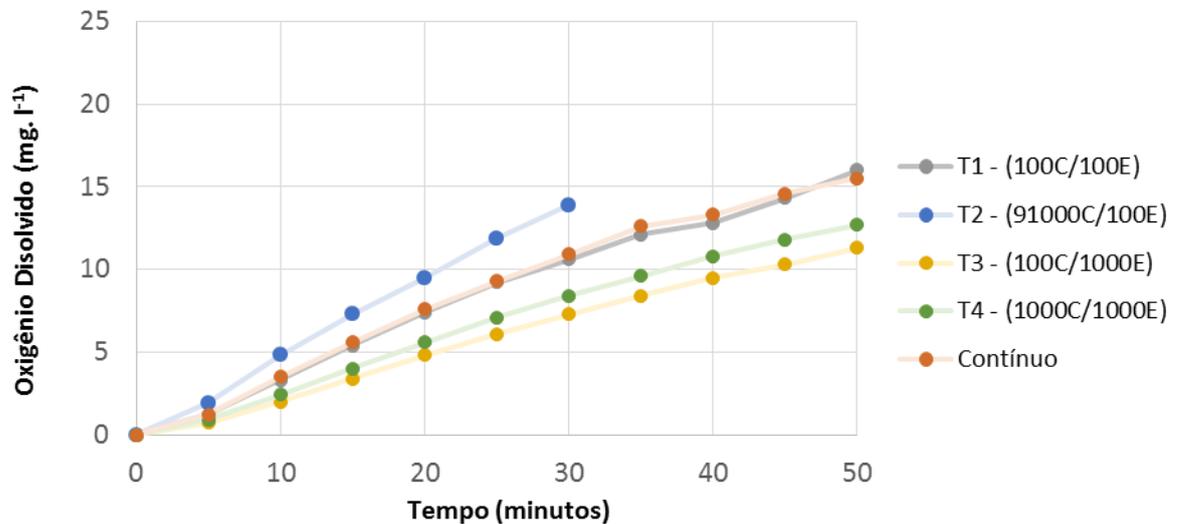


Figura 5.1 - Resultado do monitoramento da produção de Oxigênio nos instantes iniciais de cada cultivo.

Como a produção de oxigênio no início do cultivo pode não prever o comportamento do cultivo inteiro, optou-se pela escolha da taxa de produção em massa, a diferença entre concentrações finais e iniciais no tempo de duração do cultivo, como sendo a resposta do experimento fatorial 2^2 , o resultado desta análise pode ser visto na Figura 5.2.

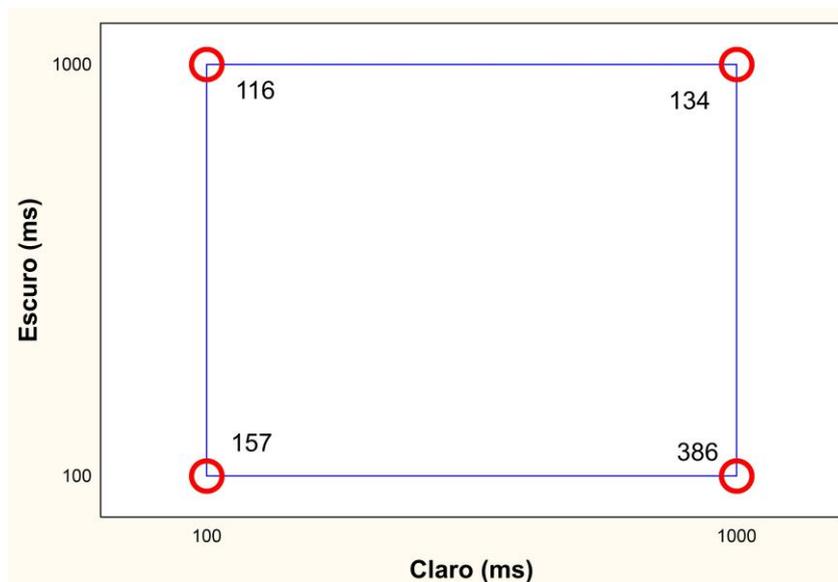


Figura 5.2 - Gráfico da resposta do experimento fatorial 2^K em termos da taxa da produção de microalgas (em $\text{mg}_{\text{microalgas}} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

Com produção de $386 \text{ mg.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$, o tratamento 2, fotoperíodo com 1000 milissegundos claro e 100 milissegundos de escuro, resultando em uma frequência de 0,9 Hz, obteve melhor desempenho, inclusive melhor que comparado ao fornecimento de luz contínua, que obteve taxa de produção de $359 \text{ mg.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$. Para melhor visualizar a relação entre os efeitos de cada fator testado, duração do pulso de luz e duração do período escuro, a Figura 5.3 mostra o gráfico da superfície de resposta do experimento fatorial 2^k .

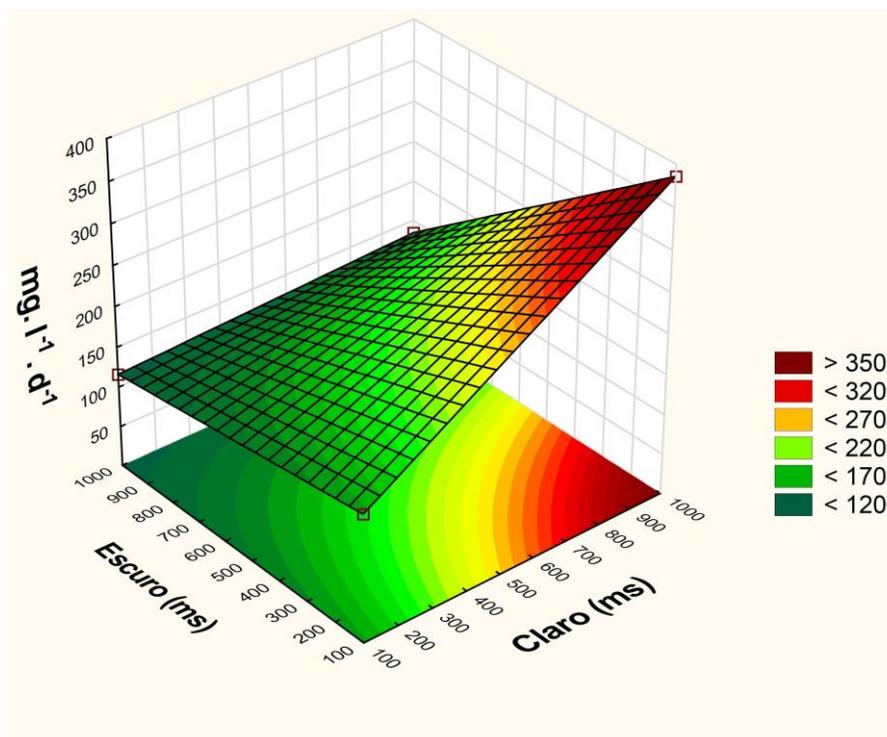


Figura 5.3 - Superfície da resposta do experimento fatorial 2^k .

Com o fornecimento de apenas 9% de energia em comparação à luz contínua, o tratamento 3 obteve o menor desempenho, ao comparar os dois intermediários, tratamentos 1 e 4, ambos com fornecimento de 50% da energia em comparação à luz contínua, observa-se que o maior desempenho foi obtido por aquele de maior frequência, tratamento 1, com 5 Hz contra o tratamento 4, com apenas 0,5 Hz, corroborando com o resultado de Morweiser e colaboradores (2010), que relatou que o desempenho de cultivos aumenta com o incremento da frequência, em frequências acima de 25 Hz o desempenho ultrapassa a luz contínua, mesmo com pulso de claro e escuro com a mesma duração, 50% da energia, chegando no valor máximo em 100 Hz, ou seja, períodos de 5 ms de claro e 5 ms de escuro.

Com a finalidade de avaliar a eficiência energética do cultivo de microalgas com luz intermitente, a Figura 5.4 apresenta o boxplot da diferença entre a temperatura do cultivo e a temperatura do fluido trocador de calor de um período de uma hora no qual ambas as temperaturas se mantiveram constantes. Embora tenha obtido melhor desempenho na produção de microalgas, o tratamento 2 também requereu maior dissipação de calor, não se mostrando muito vantajoso neste aspecto.

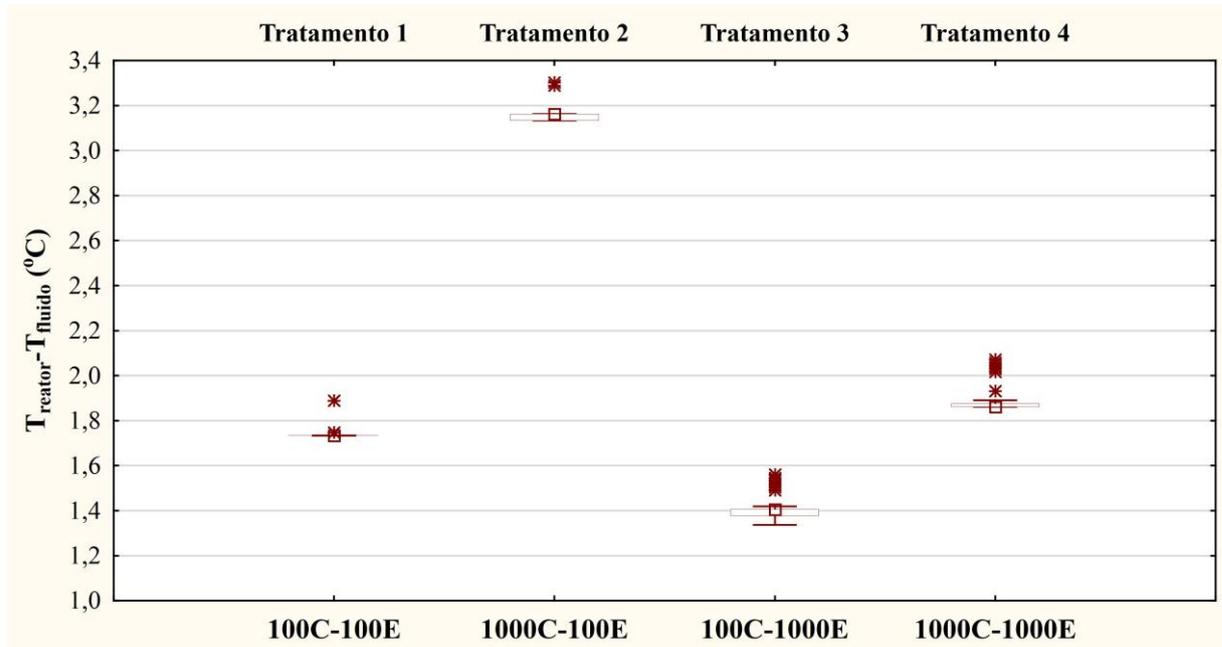


Figura 5.4 - Boxplot da diferença entre a temperatura do cultivo e da temperatura do fluido trocador de calor em um período de uma hora em que ambas temperaturas permaneceram constante.

O que chama a atenção para o tratamento 3, fornecido apenas um décimo da energia, obteve uma produção apenas um quarto menor que comparada a luz contínua, em operações na qual o custo de implantação for menor que o custo de operação pode mostrar-se vantajoso para redução dos gastos com energia.

5.4 Conclusões

Pode-se observar que o fornecimento de luz com pequenos intervalos de escuro pode melhorar o desempenho da produção de microalgas e reduzir a demanda por dissipação de calor, entretanto deve-se investigar a aplicação de pulsos com frequências maiores que mantenham a taxa de produção com intervalos de escuro maiores visando aprimorar a eficiência energética.

5.5 Referências Bibliográficas

- Béchet, Q., Shilton, A., Guieysse, B. (2013). Modeling the effects of light and temperature on algae growth: State of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation. *Biotechnology Advances*, **31**, pp. 1648–1663.
- Carvalho, A., Silva, S., Baptista, J., Malcata, F.X. (2011). Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **89**(5), 1275-1288.
- Grobbelaar, J., Nedbal, L., Tichy, V. (1996). Influence of high frequency light/dark fluctuations on photosynthetic characteristics of microalgae photoacclimated to different light intensities and implications for mass algal cultivation. *Journal Of Applied Phycology*, **8**(4-5), 335-343.
- Gutierrez-Wing, M.T., Silaban, A., Barnett, J., Rusch, K.A. (2014). Light irradiance and spectral distribution effects on microalgal bioreactors, *Engineering in Life Sciences*, **14**, pp. 574-580.
- Liao, Q., Li, L., Chen, R., Zhu, X. (2014). A novel photobioreactor generating the light/dark cycle to improve microalgae cultivation. *Bioresource Technology*, **161**, 186-191.
- Morweiser, M., Kruse, O., Hankamer, B., Posten, C. (2010). Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **87**(4), 1291-1301.
- Sforza, E., Simionato, D., Giacometti, G., Bertucco, A., Morosinotto, T. (2012). Adjusted Light and Dark Cycles Can Optimize Photosynthetic Efficiency in Algae Growing in Photobioreactors. *PLoS One*, **7**(6).
- Simionato, D., Basso, S., Giacometti, G.M., Morosinotto, T. (2013). Optimization of light use efficiency for biofuel production in algae. *Biophysical Chemistry*, **182**, 71.
- Xue, S., Zhang, Q., Wu, X., Yan, C., Cong, W. (2013). A novel photobioreactor structure using optical fibers as inner light source to fulfill flashing light effects of microalgae. *Bioresource Technology*, **138**, 141-147.

6

Conclusões gerais e recomendações

6.1 Conclusões

A partir de um ambiente com elevado controle dos parâmetros cinéticos, foi possível traçar as curvas de saturação de luz para três concentrações iniciais de microalgas, com base nessa informação concluiu-se que a saturação de luz, em cultivos com baixa concentração inicial de microalgas, pode ser observada apenas avaliando a produção de oxigênio nos primeiros instantes. Entretanto, os efeitos do excesso de radiação são melhor observados ao considerar a produção de biomassa ao longo de um prazo maior de cultivo, uma vez que tais efeitos podem demorar a se manifestar na taxa de produção, não a afetando inicialmente, mas podendo inviabilizar a continuidade do crescimento a longo prazo.

Os resultados ainda sugerem que uma boa estratégia para redução dos custos com dissipação de calor no cultivo de microalgas em fotobiorreatores, seria, além de evitar a incidência das radiações infravermelho e ultravioleta, limitar a radiação visível com intensidade acima de $1000 \mu\text{mol}_{\text{fótons}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, por exemplo utilizando um sistema de sombreamento dinâmico controlado pelo monitoramento da luz PAR. Entretanto, esta estratégia ainda deva ser testada em condições reais em um fotobiorreator irradiado com luz solar. Se comprovada, pode se tornar um avanço na direção da viabilidade econômica da produção de biocombustíveis provenientes da biomassa de microalgas, uma vez que os gastos com dissipação de calor para manter uma faixa de temperatura tolerável para o cultivo de microalgas possuem possibilidade de serem reduzidos.

Outra estratégia para reduzir o superaquecimento em fotobiorreatores pode ser o fornecimento de luz intermitente, incluindo intervalos de escuro, tal medida pode melhorar o desempenho da produção de microalgas e reduzir a demanda por dissipação de calor, entretanto deve-se investigar a aplicação de pulsos com frequências maiores que mantenham a taxa de produção com intervalos de escuro maiores visando aprimorar a eficiência energética.

Todavia, essa estratégia, em algumas condições, resultou na redução da taxa de crescimento, neste caso, recomenda-se realizar um estudo de viabilidade econômica para determinar se os benefícios provenientes do racionamento de energia se sobrepõem ao custo da diminuição na produtividade.

A partir do uso de um microcontrolador de código aberto, conclui-se que é possível fabricar um fotobiorreator em escala de bancada de baixo custo utilizando materiais de fácil acesso. E através de uma programação relativamente simples, criar um ambiente controlado para o cultivo de microalgas e obter resultados satisfatórios do estudo de saturação de luz das mesmas.

Com o uso do mesmo microcontrolador também foi possível adaptar um sensor de turbidez de baixo custo e calibrá-lo para obter uma precisão razoavelmente comparada aos equipamentos comerciais para laboratório, desde que respeitado o modo de operação dele, trabalhar com temperatura constante ou realizar uma segunda calibração com pelo menos 3 temperaturas diferentes dentro da faixa esperada de operação.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Recomenda-se que em futuros trabalhos a limitação da luz visível fornecida em fotobiorreatores seja avaliado em condições reais em um fotobiorreator em escala piloto com fornecimento de luz solar e que seja quantificado a real economia de energia em comparação ao fornecimento de luz sem a limitação.

Recomenda-se também que seja avaliado o fornecimento de luz intermitente para o cultivo de microalgas utilizando pulsos de luz com frequências maiores que a testada no presente trabalho, tendo estas, possibilidade de apresentarem melhores desempenhos.

Anexo I

```

1  #include <OneWire.h>
2  #include <DallasTemperature.h>
3
4  #define ONE_WIRE_BUS_PIN 2
5
6  OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS_PIN);
7  DallasTemperature sensors(&oneWire);
8
9  DeviceAddress Probe01 = { 0x28, 0xFF, 0xE6, 0xA3, 0x15, 0x14, 0x00, 0x87 };
10 DeviceAddress Probe02 = { 0x28, 0xFF, 0x81, 0x1F, 0x02, 0x15, 0x02, 0x0C };
11
12 #define NUMREADINGS 12
13 int readings[NUMREADINGS];
14 int index = 0;
15 int total = 0;
16 int average = 0;
17
18 unsigned long cont = 0;
19 int sensorPin = A0;
20 int sensorValue = 0;
21 float turb;
22 unsigned long St=0;
23 int Mt=0;
24     int ledPin1 = 8;
25     int ledStatel = LOW;
26     unsigned long previousMillis1 = 25000;
27     long OnTime1 = 295000;
28     long OffTime1 = 5000;
29
30     int ledPin2 = 13;
31     int ledState2 = LOW;
32     unsigned long previousMillis2 = 6000;
33     long OnTime2 = 59000;
34     long OffTime2 = 1000;
35 void setup(){
36     Serial.begin(9600);
37
38     Serial.println("CLEARDATA");
39     Serial.println("LABEL,Data,Hora,Time,Sgnl,ASgnl,T_in,T_Out,Turb,
40         error,setpoint,Tout,P,I,D,PID");
41         for (int i = 0; i < NUMREADINGS; i++)
42             readings[i] = analogRead(A8);
43         for (int i = 0; i < NUMREADINGS; i++)
44             total += readings[i];
45
46     sensors.begin();
47     sensors.setResolution(Probe01, 12);
48     sensors.setResolution(Probe02, 12);
49     pinMode(8, OUTPUT);
50     pinMode(9, OUTPUT);
51     pinMode(10, OUTPUT);
52     pinMode(11, OUTPUT);
53     pinMode(12, OUTPUT);
54 }
55     float
56     Kp=2,
57     Ki=0.2,
58     Kd=0.01,
59     P=0,
60     I=0,
61     D=0,
62     PID=0;
63     int Lasttemp = 3000;
64     int stp = 3000;
65 void loop(){
66     unsigned long currentMillis = millis();
67     sensors.requestTemperatures();
68     if((ledStatel == HIGH) && (currentMillis - previousMillis1 >= OnTime1)){
        ledStatel = LOW;

```

```

69         previousMillis1 = currentMillis;
70         digitalWrite(ledPin1, ledState1);
71     }
72     else if ((ledState1 == LOW) && (currentMillis - previousMillis1 >=
73 OffTime1)){
74         St=0;
75         for(int i=0;i<200;i++)
76             St+= int(analogRead(A8));
77         Mt=St/200;
78
79         total -= readings[index];
80         readings[index] = Mt;
81         total += readings[index];
82         index = (index + 1);
83         if (index >= NUMREADINGS)
84             index = 0;
85         average = total / NUMREADINGS;
86         sensorValue = analogRead(sensorPin);
87         turb = calcTurb(average);
88
89         ledState1 = HIGH;
90         previousMillis1 = currentMillis;
91         digitalWrite(ledPin1, ledState1);
92     }
93     if((ledState2 == HIGH) && (currentMillis - previousMillis2 >= OnTime2)){
94         ledState2 = LOW;
95         previousMillis2 = currentMillis;
96         digitalWrite(ledPin2, ledState2);
97     }
98     else if ((ledState2 == LOW) && (currentMillis - previousMillis2 >=
99 OffTime2)){
100         Serial.print((String) "DATA,DATE,TIME,");
101         Serial.print(cont);
102         Serial.print(",");
103         Serial.print(sensorValue);
104         Serial.print(",");
105         Serial.print(Mt);
106         Serial.print(",");
107         printTemperature(Probe01);
108         Serial.print(",");
109         printTemperature(Probe02);
110         Serial.print(",");
111         Serial.print(int(turb));
112         float temp1 = sensors.getTempC(Probe01);
113         int tempIN = (int) (temp1*100);
114         float temp2 = sensors.getTempC(Probe02);
115         int tempOut = (int) (temp2*100);
116         int err = 3000 - tempIN;
117         P = err * Kp;
118         I += err * Ki;
119         D = (Lasttemp - tempIN)*Kd;
120         PID = P + I + D;
121         stp = PID + 3000;
122         Lasttemp = tempIN;
123         Serial.print(",");
124         Serial.print(err);
125         Serial.print(",");
126         Serial.print(int(stp));
127         Serial.print(",");
128         Serial.print(tempOut);
129         Serial.print(",");
130         Serial.print(P);
131         Serial.print(",");
132         Serial.print(I);
133         Serial.print(",");
134         Serial.print(D);
135         Serial.print(",");
136         Serial.println(PID);

```

```

137         if(int(stp)- 5 <= tempOut && tempOut <= int(stp) + 5){
138             digitalWrite(9, LOW);
139             digitalWrite(10, LOW);
140             digitalWrite(11, HIGH); //Cooler desligado
141             digitalWrite(12, HIGH); //Bomba desligada
142         }
143         if(tempOut < int(stp)-5 ){
144             //Aquecimento
145             digitalWrite(9, LOW);
146             digitalWrite(10, HIGH);
147             digitalWrite(11, HIGH); //Cooler desligado
148             digitalWrite(12, LOW); //Bomba ligada
149         }
150         if(tempOut > int(stp)+5 ){
151             //Resfriamento
152             digitalWrite(9, HIGH);
153             digitalWrite(10, LOW);
154             digitalWrite(11, LOW); //Cooler ligado
155             digitalWrite(12, LOW); //Bomba ligada
156         }
157         cont ++;
158         ledState2 = HIGH;
159         previousMillis2 = currentMillis;
160         digitalWrite(ledPin2, ledState2);
161     }
162 }
163 void printTemperature(DeviceAddress){
164     float tempC = sensors.getTempC(deviceAddress);
165     if (tempC == -127.00) Serial.print("NA");
166     else Serial.print(tempC);
167 }
168 float calcTurb(int signal){
169     float Turb =0;
170     if (signal >= 766)
171         Turb = (0.02596290* pow(signal, 2))-(41.15961568* pow(signal,
172 1))+16305.10459572 );
173     else if (signal < 766 && signal > 720 )
174         Turb = (0.01032343* pow(signal, 2))-(17.21015065* pow(signal,
175 1))+7136.45463783);
176     else if (signal <= 720 )
177         Turb = (0.00043004* pow(signal, 2))-(3.78044715* pow(signal,
178 1))+2591.33618766);
179     return Turb;
180 }

```