

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA / ELETROTÉCNICA

RAFAEL ROCHA PENTEADO

**DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADOR PARA CULTIVO DE MICROALGAS
EM LAGOAS TIPO RACEWAY**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2014

RAFAEL ROCHA PENTEADO

**DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADOR PARA CULTIVO DE MICROALGAS
EM LAGOAS TIPO RACEWAY**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Me. Guilherme Luiz Moritz.
Co-Orientador: Prof. Dr. Júlio Cesar de Carvalho (UFPR).

CURITIBA
2014

RAFAEL ROCHA PENTEADO

DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADOR PARA CULTIVO DE MICROALGAS EM LAGOAS TIPO RACEWAY

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 4 de Setembro de 2014.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Guilherme Luiz Moritz, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Júlio Cesar de Carvalho, Dr.
Universidade Federal do Paraná
Co-Orientador

BANCA EXAMINADORA

Amauri Amorin Assef, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Glauber Gomes de Oliveira Brante, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Guilherme Luiz Moritz, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Júlio Cesar de Carvalho, Dr.
Universidade Federal do Paraná

A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

AGRADECIMENTOS

À todos os professores, pois graças a eles obtive o conhecimento necessário para poder desenvolver este trabalho, em especial aos meus orientadores, professores Guilherme Moritz e Júlio Cesar de Carvalho, por toda dedicação e por sempre estarem dispostos a compartilharem seus conhecimentos.

Ao meu amigo sempre disposto Renato Daher, que esteve presente nos momentos de dificuldade.

À minha família pelo apoio durante todo o curso e especialmente durante o período final do TCC.

À minha noiva, Kaiana, pela ajuda na correção ortográfica e apoio que sempre me motiva.

”Se A é o sucesso, então A é igual a X mais Y mais Z. O trabalho é X; Y é o lazer; e Z é manter a boca fechada.”

Albert Einstein

RESUMO

PENTEADO, Rafael Rocha. Desenvolvimento de Controlador para Cultivo de Microalgas em Lagoas Tipo Raceway. 2014. 77f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Departamento de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um controlador para reatores tipo *Raceway* para cultivos de microalgas em escala de experimentos em laboratório. Inicialmente é feito um embasamento teórico de todos os assuntos abordados no trabalho, incluindo sistemas de controle, microcontroladores e cultivos de microalgas. Na sequência são demonstrados todos os passos do desenvolvimento e projeto do controlador, que possui quatro malhas de controle: aeração, agitação, temperatura e luminosidade, sendo que as duas primeiras são malhas abertas, e as duas últimas malhas fechadas. As malhas fechadas são baseadas em um controle PID, que foi sintonizado para o sistema em questão de forma empírica. Por fim, são comentadas algumas simulações feitas com o sistema de controle instalado no reator e feitas algumas considerações para trabalhos futuros e um possível escalonamento para uso em escala industrial.

Palavras-chave: Controle PID; Microcontroladores; Microalgas; Sistemas Embarcados.

ABSTRACT

PENTEADO, Rafael Rocha. Development of a Controller for Microalgae Culture in Raceway Ponds. 2014. 77f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Departamento de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

This paper presents the development of a controller to Raceway reactors for microalgae cultivation on laboratory scale experiments. Initially is made a theoretical basement of all the subjects encountered in the work, including control systems, microcontrollers and microalgae cultivation. After that, every development steps and project of controller are demonstrated, which has four control meshes: aeration, agitation, temperature and luminosity, and that the first two are open meshes, and the last two are closed meshes. The closed meshes are based on a PID control, which was tuned in an empirically form to the system. Finally, are discussed some simulations done with the control system installed in the reactor and done a few considerations for future works and a possible scale up for use on industries.

Keywords: PID Control; Microcontrollers; Microalgae; Embedded Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regulador centrífugo de James Watt (CHAVARETTE, 2013).....	14
Figura 2 - Lagoa <i>Raceway</i> (fabiangarciasc.nmsu.edu).....	17
Figura 3 - Tanques para cultivo de microalgas no Hawaii (TIAGO, 2013).....	18
Figura 4 - Tanque em desenvolvimento na FURG (COSTA, 2009).....	19
Figura 5 - Foto em microscópio de uma espécie de Microalga (www.cmcmadeira.org).....	23
Figura 6 - Diferentes espécies de Microalgas vistas em microscópio eletrônico (www.cmcmadeira.org).....	25
Figura 7 - Compostos extraídos a partir de microalgas (OLIVEIRA, 2009).	27
Figura 8 - Imagens de microscópio óptico (ampliação de 100x) da <i>Arthrospira platensis</i> (OLIVEIRA, 2009).	29
Figura 9 - Cultivo de <i>Spirulina platensis</i> em larga escala em vias fluviais (HENRIKSON, 1989).....	33
Figura 10 - Biorreator tipo <i>raceway pond</i> em pequena escala utilizado em estudo na Malásia (HABIB & PARVIN, 2008).....	34
Figura 11 - Sistemas de produção de microalgas a céu aberto do tipo <i>raceway pond</i> (www.was.org).....	35
Figura 12 - Exemplo de biorreator em sistema fechado para produção de microalgas (LU, XIANG e WEN, 2010).....	35
Figura 13 - <i>Kit</i> Microcontrolador <i>LaunchPad</i> Tiva C Series TM4C123G (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).....	40
Figura 14 - Fotoresistor (WENDING, 2010).	43
Figura 15 - Fotocélula (WENDING, 2010).....	44
Figura 16 - Fotodiodo (WENDING, 2010).	44
Figura 17 - Fototransistor (WENDING, 2010).	45
Figura 18 - Lagoa <i>raceway</i> que será utilizada no sistema de controle (Autoria própria).....	49
Figura 19 - Diagrama de blocos do sistema (Autoria própria).	50
Figura 20 - Diagrama de blocos do controle de temperatura (Autoria própria).	51
Figura 21 - Diagrama de blocos do controle de luminosidade (Autoria própria).....	52
Figura 22 - Diagrama de blocos do controle de agitação (Autoria própria).....	53
Figura 23 - Sequência de fases do motor de passo (NEOYAMA, s.d.).	54
Figura 24 - Esquema de ligação do motor de passo (NEOYAMA, s.d.).....	54
Figura 25 - Diagrama de blocos do controle de aeração (Autoria própria).	55
Figura 26 - Ligação do sensor de temperatura (Autoria própria).	56
Figura 27 - Esquema de ligação do acionador das resistências térmicas (Autoria própria).	57
Figura 28 - Ligação do sensor de luminosidade (Autoria própria).....	58
Figura 29 - Esquema de ligação do acionador dos LEDs (Autoria própria).	58
Figura 30 - Esquema de ligação do motor de passo (Autoria própria).....	59
Figura 31 - Esquema de ligação do acionador do compressor de ar (Autoria própria).....	60
Figura 32 - Projeto finalizado (Autoria própria).	61
Figura 33 - Diagrama das Tasks do programa (Autoria própria).	62

Figura 34 - Tela inicial apresentada no terminal (Autoria própria).....	63
Figura 35 - Curva de resposta do controle de temperatura (Autoria própria).	68
Figura 36 - Primeira região linear da resposta do LDR (Autoria própria).	70
Figura 37 - Segunda região linear da resposta do LDR (Autoria própria).	71
Figura 38 - Curva de resposta do controle de luminosidade (Autoria própria).....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Óleo extraído de diferentes matérias oleaginosas convencionais e microalgas.	28
Tabela 2 - Vantagens/desvantagens dos sistemas de cultivo.....	36
Tabela 3 - Comparação com outros tipos de motores.	47
Tabela 4 - Tabela de Pinos.	60
Tabela 5 - Resumo das respostas dos termos do PID.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS

CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
CSTR – Continuous Stirred Tank Reactor
DNA – Ácido Desoxirribonucléico
DHA – Ácido Docosaheptaenóico
EUA – Estados Unidos da América
FURG – Universidade Federal do Rio Grande
NTC – Negative Temperature Coefficient
LDR – Light Dependent Resistor
LED – Light Emitting Diode
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
PTC – Positive Temperature Coefficient
RPM – Rotações Por Minuto
RTC – Real Time Clock
RTD – Resistance Temperature Detector
PWM – Pulse Width Modulation
UFPR – Universidade Federal do Paraná
USB – Universal Serial Bus

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 TEMA	14
1.1.1 Delimitação Do Tema	15
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	16
1.3 JUSTIFICATIVA	18
1.4 OBJETIVOS	20
1.4.1 Objetivo Geral	20
1.4.2 Objetivos Específicos	20
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	21
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 MICROALGAS	23
2.1.1 Produtos e Aplicações	26
2.1.2 Produção De Biodiesel Por Microalgas	27
2.1.3 <i>Arthrospira platensis</i>	29
2.1.4 Parâmetros De Cultivo	30
2.1.5 Condições De Cultivo	31
2.1.6 Sistemas E Equipamentos Para Produção	33
2.2 SISTEMAS DE CONTROLE	37
2.2.1 Controle De Processos Em Reatores	38
2.3 <i>KIT MICROCONTROLADOR LAUNCHPAD TIVA C SERIES TM4C123G</i>	40
2.4 SENSORES	41
2.4.1 Sensor De Temperatura	41
2.4.2 Sensor De Luminosidade	43
2.5 MOTORES ELÉTRICOS	46
3 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR.....	48
3.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA	48
3.2 VISÃO GERAL DO SISTEMA DE CONTROLE	49
3.2.1 Malha De Controle Da Temperatura	50
3.2.2 Malha De Controle Da Luminosidade	52
3.2.3 Malha De Controle Da Agitação	53
3.2.4 Malha De Controle Da Aeração	54
3.3 ESQUEMAS DE LIGAÇÃO.....	55
3.3.1 Controle de Temperatura.....	55
3.3.2 Controle de Luminosidade	57
3.3.3 Controle da Agitação.....	59
3.3.4 Controle da Aeração.....	59
3.3.5 Alimentação	61
3.4 PROGRAMAÇÃO DO CONTROLADOR	62

3.4.1 Interface Gráfica.....	63
3.4.2 Motor de Passo	63
3.4.3 Compressor de Ar.....	64
3.4.4 Controle da Temperatura.....	64
3.4.5 Controle da Luminosidade	64
4 SIMULAÇÕES E AJUSTE DO PID	66
4.1 CONTROLE PID.....	66
4.1.1 Controle da Temperatura.....	68
4.1.2 Controle da Luminosidade	70
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
5.1 ESCALONAMENTO	74
5.2 MELHORIAS PARA TRABALHOS FUTUROS	75
5.3 CONCLUSÕES	76
6 REFERÊNCIAS	77
ANEXO 1.....	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Sistemas de controle são indispensáveis para diversas atividades da sociedade, e já são parte integrada em equipamentos industriais, eletrodomésticos, meios de transporte, entre outros. Porém, a espécie humana não é a única a desenvolver sistemas de controle, a própria natureza possui vários desses sistemas, inclusive no corpo humano. Como exemplo tem-se o pâncreas, que regula a concentração de açúcar no sangue, e os olhos acompanhando um objeto em movimento para que o cérebro possa prever sua posição futura e pegar o objeto com as mãos (NISE, 2010).

O primeiro trabalho considerado como um sistema de controle foi o regulador centrífugo desenvolvido por James Watt para o controle de velocidade de uma máquina a vapor, no século XVIII, conforme ilustrado na Figura 1. Com o avanço dessa tecnologia foi possível a produção de navios e aviões (CHAVARETTE, 2013). Em 1922, Minorsky trabalhou com controle para pilotagem de navios e, em 1932, Nyquist desenvolveu um processo bastante simples para verificar a estabilidade de sistemas. Já em 1934 Hazen introduziu os servomecanismos utilizados em sistemas de controle de posição. Nas décadas seguintes foram desenvolvidos outros métodos, como métodos de resposta em frequência, os sistemas de controle linear de malha fechada, o método de lugar das raízes, o emprego de variáveis de estado, controle ótimo de sistemas determinísticos e estocásticos (PINTO, 2000).

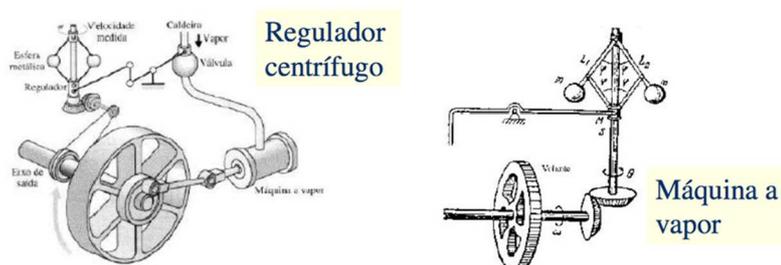


Figura 1 - Regulador centrífugo de James Watt (CHAVARETTE, 2013).

1.1.1 Delimitação Do Tema

Uma crescente aplicação para sistemas de controle é em bioprocessos, ramo recente da engenharia que utiliza conhecimentos de outros ramos da tecnologia para desenvolver processos biológicos para produção de compostos de maior valor agregado. Basicamente são utilizados microrganismos para transformar e/ou consumir determinada substância, produzindo uma outra substância de interesse.

Por ser um processo bastante delicado devido à sensibilidade das células utilizadas, é necessário controlar diferentes parâmetros, como a temperatura, agitação, pH, luminosidade, e manter essas condições em uma faixa de valores previamente determinada.

Dentre as inúmeras vantagens que os bioprocessos podem trazer para a sociedade, as microalgas merecem atenção especial. Com a constante queima de combustíveis fósseis surgem dois problemas que podem ser sanados com o cultivo de microalgas: o acúmulo de gás carbônico na atmosfera terrestre e a excessiva utilização dos combustíveis derivados do petróleo.

Microalgas são organismos unicelulares que, através da fotossíntese, convertem energia solar em um composto orgânico, que geralmente pode ser utilizado como combustível ou transformado em um. O mecanismo da fotossíntese das microalgas é similar ao visto em plantas superiores, porém é mais eficaz devido a simplicidade da estrutura celular desses organismos, além de possuírem uma melhor transferência de massa e energia quando cultivadas em suspensão aquosa (JAMES & BORIAH, 2010).

Por esses e outros motivos, o metabolismo das microalgas é extremamente rápido, e pode chegar a duplicar a biomassa em 24 horas em condições ótimas, produzindo, junto com seu crescimento, energia renovável na forma de combustíveis líquidos, na grande maioria óleos (CHISTI, 2007).

Além da produção de combustíveis, as microalgas podem ser empregadas em outros setores, como aditivos alimentares, produção de pigmentos, tratamento de efluentes, biorremediação e outras aplicações.

Contudo, uma das maiores aplicações são os biocombustíveis, sendo que o biodiesel produzido a partir de óleos de microalgas leva vantagem sobre o produzido de óleos vegetais. Justamente pela maior e mais barata produção do óleo, os custos com a extração do óleo vegetal correspondem ao maior gasto na produção do combustível. Algumas linhagens de microalgas possuem biomassa extremamente rica em óleo, alcançando até 50% em peso da biomassa seca

(JAMES & BORIAH, 2010).

Todos esses fatores indicam que as microalgas têm um imenso potencial para uma viável produção de combustíveis, incluindo biodiesel e combustível para aviação. Segundo Chisti, 2007, as microalgas possuem o potencial para substituir uma grande parte dos 140 bilhões de galões de gasolina e dos 60 bilhões de galões de diesel utilizados como combustível em meios de transporte nos Estados Unidos.

Além disso, para o microrganismo produzir esses óleos as células utilizam o gás carbônico em grande quantidade. Isso é conhecido como fixação de CO₂.

O processo de produção de óleos por microalgas pode ser realizado com dois tipos de cultivos diferentes, autotrófico ou heterotrófico. No cultivo autotrófico a única fonte de carbono é o CO₂ presente no ar, é o mais simples, limpo e barato, porém a produtividade é baixa. Já no cultivo heterotrófico, além do gás carbônico, é adicionada outra fonte de carbono, preferencialmente glicerol ou outro composto com estrutura química parecida. O que faz a produtividade aumentar consideravelmente (JOHNSON & WEN, 2009).

A partir desses óleos extraídos das microalgas é feita a produção do biodiesel. Para que a produção de biocombustível seja otimizada é necessário que os parâmetros de cultivo estejam dentro dos limites determinados por pesquisadores. E esse é o papel dos sistemas de controle.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os cultivos em lagoas abertas não utilizam ainda um sistema de controle muito sofisticado, que seja capaz de controlar diferentes variáveis, principalmente pela dificuldade de atuar no sistema após alguma perturbação. Ainda mais que não foi documentado qual seria o ganho real de produtividade, para se tornar viável o investimento em um sistema sofisticado de controle e atuação.

Uma alternativa interessante para se determinar essa viabilidade é utilizar um modelo em pequena escala, nas mesmas proporções e condições do reator utilizado no processo em estudo. Trabalhar em pequena escala elimina as dificuldades em atuar no processo, restando apenas o trabalho em coletar e analisar os dados.

Uma das formas mais fáceis de cultivar microalgas é em reatores abertos, com formato oval, ou *raceway ponds* (lagoas abertas tipo pista de corrida). Esse tipo de reator é utilizado desde os anos 1950, e essa forma de cultivo é considerada a mais natural, pois a cultura fica

suscetível a todas as variações de temperatura, luminosidade e qualidade do ar. Apesar disso não ser uma vantagem, os efeitos negativos são pequenos comparados com as vantagens obtidas.

Os *raceways* são lagoas de fácil construção, um tanque oval com divisão interna e um sistema de mistura, baixa manutenção e baixo custo de operação, a exemplo da Figura 2. O sistema de mistura geralmente utilizado são pás ligadas a um eixo com uma baixa rotação, porém também é possível utilizar bombas com difusores ou uma fonte de ultrassom, similar aos sistemas usados em aquários e pequenas fontes ornamentais.



Figura 2 - Lagoa *Raceway* (fabiangarciasc.nmsu.edu).

A mistura ocorre pela turbulência causada pelo movimento das pás ou do sistema utilizado, e também pela interação entre o líquido e as paredes e fundo do *raceway*. Os parâmetros que influenciam na qualidade e velocidade da mistura são a vazão e a altura do líquido, que não deve ultrapassar 30 a 40 cm, pois após essa profundidade a luminosidade diminui bastante, prejudicando o crescimento das células.

Ainda, para melhorar a distribuição e aumentar a disponibilidade de CO₂, pode-se injetar esse gás no interior do reator. Utilizando difusores em determinados locais ou em toda a extensão da lagoa para borbulhar CO₂ no meio líquido. A utilização de um sistema de aeração ainda contribui no controle de outra variável importante, a temperatura, pois ajuda a resfriar o meio de cultivo.

Cada tipo de cultivo apresenta uma temperatura ideal para o crescimento do organismo cultivado. No caso das microalgas essa temperatura ótima é, normalmente, perto de temperatura ambiente (25° C). Em um cultivo em uma lagoa aberta a temperatura pode variar muito, pois

ela depende da temperatura do ar. Isso pode ser um problema tanto em lugares muito frios como em lugares muito quentes.

Portanto se vê necessário o desenvolvimento de um controlador para esse tipo de lagoa de cultivo que seja capaz de manter os parâmetros nos níveis ideais. Essas variáveis seriam, então, a velocidade de agitação, a luminosidade, a aeração e a temperatura.

1.3 JUSTIFICATIVA

Como citado anteriormente, ainda não é comum encontrar qualquer tipo de controle em uma fazenda de cultivo de microalgas, principalmente em lagoas abertas. É exatamente esse tipo de cultivo mais utilizado atualmente, principalmente nos EUA (Estados Unidos da América) (Figura 3). Além disso, já estão sendo feitos estudos para implementar essa tecnologia no Brasil (BAUTZER, 2011; TIAGO, 2013).

Conforme Tiago, 2013, o Hawaii já possui grandes tanques para cultivo de diferentes espécies de microalgas. Segundo o autor a localização do estado norte-americano é privilegiada, pois possui água e sol abundantes.



Figura 3 - Tanques para cultivo de microalgas no Hawaii (TIAGO, 2013).

São diversos grupos de pesquisas, com parcerias de grandes empresas, que estão pesquisando as melhores formas de cultivo e principalmente a viabilidade técnica e econômica de implementar esses sistemas no país. As principais pesquisas estão sendo feitas nas

universidades federais do Rio Grande (FURG) e do Paraná (UFPR), em conjunto com empresas como Ouro Fino, Petrobrás e Eletrobrás (COSTA, 2009). Na Figura 4 é possível visualizar os tanques utilizados para pesquisa na FURG. Com isso se vê necessário o desenvolvimento de um controlador específico para esse tipo de cultivo, que consiga suprir as condições ótimas para o crescimento das microalgas.



Figura 4 - Tanque em desenvolvimento na FURG (COSTA, 2009).

Esta tecnologia, caso se defina economicamente viável, pode solucionar diversos problemas ambientais, como redução do consumo de combustíveis derivados de petróleo e a fixação de CO₂ da atmosfera, por exemplo. Além disso, com algumas modificações no processo é possível solucionar outros problemas sociais, pois a biomassa de microalgas pode ser usada como aditivo alimentar, ajudando na nutrição de comunidades carentes.

Portanto, o desenvolvimento de um sistema de controle para esse tipo de reator é necessário, e pode se tornar um produto bastante procurado pelas empresas atuantes na área.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo principal a ser atingido consiste em desenvolver um sistema de controle para um reator *raceway* em escala de bancada, visando a produção de biodiesel através do cultivo de microalgas.

1.4.2 Objetivos Específicos

Do objetivo geral, desdobram-se as seguintes metas a serem atingidas:

- a) Realizar revisão bibliográfica sobre cultivos de microalgas;
- b) Realizar revisão bibliográfica sobre sistemas de controle;
- c) Levantar as condições ótimas de cultivo;
- d) Projetar o sistema de controle;
 - a. Controle de temperatura;
 - b. Controle de luminosidade;
 - c. Controle da agitação;
 - d. Controle da aeração.
- e) Desenvolver o programa a ser implementado no microcontrolador;
- f) Simular e Implementar o controlador;
- g) Analisar resultados obtidos com a simulação;
- h) Discutir possíveis soluções para escalonamento.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente foi realizado o levantamento e revisão bibliográfica encontrada em livros e artigos técnicos relacionados à todas as partes do tema de estudo deste trabalho. Após, será definida de acordo com a literatura as condições e os parâmetros a serem mantidos pelo controlador para então projetar o sistema de controle e como ele vai atuar no sistema, o sistema de agitação e o de aeração por exemplo.

Posteriormente, já conhecendo o sistema de controle, os sensores e os atuadores, foi desenvolvido o programa a ser implementado no microcontrolador, com a ajuda de *softwares* de programação específicos para essa finalidade.

Depois da finalização do programa, foram realizadas simulações computacionais para garantir a funcionalidade do sistema, para então implementar o circuito propriamente dito. Serão feitos alguns testes com o sistema completo montado, e também o levantamento de alguns dados referentes a resposta do controlador, para efeito de comparação com o que foi anteriormente planejado.

Por fim, foi feita uma discussão sobre o escalonamento do sistema como um todo, tentando solucionar os possíveis problemas com o escalonamento.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho será composto de 5 capítulos, definidos conforme a seguir:

Capítulo 1 - Introdução - Visa expor o tema sucintamente, basicamente será o que está sendo apresentado nesta proposta.

Capítulo 2 - Referencial Teórico - Visa levantar mais informações sobre os principais temas que serão desenvolvidos no decorrer do trabalho, sendo eles: microalgas, cultivos, sistemas de controle, motores, microcontroladores, etc.

Capítulo 3 - Desenvolvimento e programação - Visa apresentar o sistema de controle projetado, detalhando todas as etapas feitas, bem como a lógica utilizada na programação do microcontrolador.

Capítulo 4 - Dados levantados e simulação - Visa apresentar as simulações realizadas variando os parâmetros escolhidos.

Capítulo 5 - Analise de resultados e conclusão - Visa mostrar os resultados obtidos da simulação do sistema, uma avaliação do controlador desenvolvido e uma discussão final visando o escalonamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MICROALGAS

As algas podem ser divididas em dois grandes grupos: as macroalgas e as microalgas. As macroalgas são organismos fotossintéticos que vivem na água ou em locais úmidos, pertencendo ao reino vegetal e sendo classificadas como talófitas, por apresentarem uma estrutura simples não vascularizada desprovida de raiz, caule, folhas, sementes e flores (LEE, 2008).

Consideram-se macroalgas as algas de maior tamanho, em geral marinhas e por vezes com dimensões consideráveis (podem atingir 50 m de comprimento), cujo corpo chega a apresentar um elevado grau de complexidade (GUIMARÃES *et al.*, 2009).

Consideram-se microalgas as algas que só podem ser observadas com a ajuda de uma lupa ou microscópio (Figura 5), por apresentarem dimensões muito reduzidas (existem algas com apenas 0,001 mm de diâmetro); são em regra organismos simples, constituídos por uma célula ou um número relativamente pequeno de células.



Figura 5 - Foto em microscópio de uma espécie de Microalga (www.cmcmadeira.org).

No entanto, algumas espécies de algas que crescem em água doce são de maior tamanho, mais complexas e visíveis a olho nu, são muitas vezes abrangidas por esta designação (GUIMARÃES *et al.*, 2009).

As microalgas representaram os únicos seres vivos por mais de 3 bilhões de anos, mas o estudo científico das mesmas começou somente em 1980. A *Spirulina* contém bilhões de anos

de sabedoria evolutiva no seu DNA (Ácido Desoxirribonucléico) e é o fruto da primeira forma de vida fotossintética da Terra.

O número de espécies de microalgas está estimado entre 22000 e 26000. Estes microrganismos encontram-se em praticamente todos os biótopos, pela sua diversidade ecológica e adaptabilidade fisiológica, sobretudo em meios aquáticos (águas doces, salobras e salgadas), mas também podem habitar outros meios tais como a superfície úmida de rochas, nascentes quentes, o ar, neve e desertos (LEE, 2008).

As microalgas podem ser classificadas em cinco Filos, que se distinguem fundamentalmente pela coloração e pela natureza das substâncias de reserva que apresentam (GUIMARÃES *et al.*, 2009):

- Filo *Cyanophyta* ou *Cyanobacteria* (algas azuis)
- Filo *Chlorophyta* (algas verdes)
- Filo *Euglenophyta*
- Filo *Rhodophyta* (algas vermelhas)
- Filo *Chromophyta* (algas castanhas, douradas e amarelo-esverdeadas)

A Figura 6 ilustra imagens em microscópio eletrônico de diferentes espécies de microalgas.

A produção comercial de microalgas teve início na década de 60 com espécies do gênero *Chlorella* e *Arthrospira*, para utilização como suplementos dietéticos. Na mesma década, as pesquisas em biotecnologia de microalgas concentravam-se na reciclagem de águas residuais e na obtenção de fontes alimentares (SILVA, 2008).

Atualmente, os principais gêneros cultivados a nível comercial são a *Chlorella sp.* e a *Arthrospira sp.*, para adição em alimentos naturais e obtenção de clorofilas, ficobilinas e lipídeos (óleos que podem ser utilizados para a produção de biodiesel), a *Dunaliella salina* para obtenção de betacaroteno, a *Haematococcus pluvialis* para obtenção de astaxantina e a *Cryptocodinium cohnii* para a produção de DHA (ácido docosaheptaenóico – ácido gordo do tipo Omega-3) (BECKER, 2004).

O crescente interesse no estudo de microrganismos como microalgas, alguns fungos, leveduras e bactérias deve-se a essencial importância destes nas diversas cadeias tróficas e na possibilidade da aplicação comercial em distintas áreas como na nutrição, saúde humana e

animal, no tratamento de águas residuais, na produção de energia e na obtenção de compostos de interesse das indústrias alimentícia, química e farmacêutica, dentre outras (DERNER, 2010).

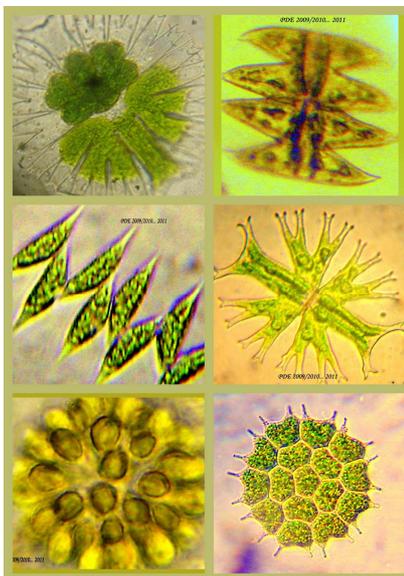


Figura 6 - Diferentes espécies de Microalgas vistas em microscópio eletrônico (www.cmcmadeira.org).

Nesse sentido, o uso de microalgas na biotecnologia é um interesse crescente das empresas, uma vez que estas apresentam um metabolismo muito ativo e podem crescer sob condições simples e de baixo custo. O futuro do processo produtivo por meio do uso de microrganismos e de engenharia genética (tecnologia do DNA recombinante, engenharia metabólica, etc.) é praticamente ilimitado.

Tal diversidade também se reflete na composição bioquímica e, desta forma, as microalgas são fontes de uma quantidade ilimitada de produtos como ácidos graxos poli-insaturados, corantes, enzimas, etc. (DERNER, 2010).

Quando cultivadas em meios adequados, certas espécies de microalgas podem duplicar a sua biomassa diariamente, produzindo matéria seca com teor proteico superior a 50% e alcançando produtividades de 30 a 50 g.m²/dia em massa seca. Esta característica, aliada à simplicidade nas técnicas de cultivo, torna as microalgas um dos objetos de pesquisa prioritários das mais modernas áreas de investigação (SILVA, 2008).

2.1.1 Produtos e Aplicações

O rápido crescimento populacional, a limitação na utilização de terras aráveis para cultivo de vegetais alimentares e a necessidade de tornar os processos de produção de biomassa sustentáveis são fatores que exercem uma força no sentido de produzir compostos com alto teor oleico a partir de culturas biológicas de rápido crescimento, nas quais se incluem diversas espécies de microalgas, fungos e bactérias, visando a produção de biodiesel, para evitar sacrificar terras aráveis para produzir óleo diesel a partir de plantas superiores como a soja e a canola (REHM & REED, 1995).

As aplicações das microalgas são inúmeras e vão da produção de biocombustíveis à produção de produtos farmacêuticos antivirais, antibacterianos e antitumorais passando ainda pela biorremediação e pela mitigação do CO₂.

Algumas aplicações das microalgas são: sequestro de CO₂; produção de hidrogênio; produção de biocombustíveis (óleo para diesel e outros fins, bioetanol e biogás); biorremediação; biomassa (alimentação animal e humana) e aplicações farmacêuticas (aciclovir, antitumoral e antibiótico).

No cultivo de *Arthrospira* sp. em sistemas do tipo *raceway* e na utilização da mesma área de produção, pode-se obter cerca de 20 a 400 vezes mais conteúdo oleico, do que no cultivo de soja e na produção de óleos (HENRIKSON, 1989).

A produção microalgal apresenta diversas vantagens, tais como a possibilidade de utilização de fontes de carbono inorgânico e/ou orgânico no processo de cultivo, de obtenção de taxas de crescimento de biomassa de algumas espécies, como por exemplo, do gênero *Chlorella*, superiores a monoculturas vegetais terrestres e a homogeneidade da composição da biomassa algal após colheita, devido ao fato de os compostos se encontrarem todos inclusos em cada célula e à inexistência de diferentes partes estruturais como raiz, caule, folhas, sementes e flores como nas plantas superiores (RAVEN, 1990; RICHMOND, 2004).

As microalgas podem produzir 10 a 20 vezes mais óleo por hectare por ano do que qualquer planta superior. O conteúdo em óleo das microalgas oscila em regra entre 20 e 50% em peso da biomassa seca. Produtividades de 1,5 kg.m⁻².d⁻¹ são possíveis, e produtividades por área de 0,072 kg.m⁻².d⁻¹ são possíveis (DERNER, 2010).

Os lipídios algais podem servir de matéria-prima para a produção de detergentes, borracha, gorduras/óleos, tecidos, aditivos alimentares, cosméticos e medicamentos, mas principalmente os biocombustíveis. A utilização de lipídios algais poderá reduzir o uso de

derivados do petróleo como fonte de energia e de gorduras animal e vegetal para o consumo humano (DEMIRBAS, 2009), o que contribui para a redução das emissões de CO₂ de origem fóssil.

Na Figura 7 pode-se verificar a referência a alguns dos compostos de valor acrescentado que podem ser extraídos de microalgas.

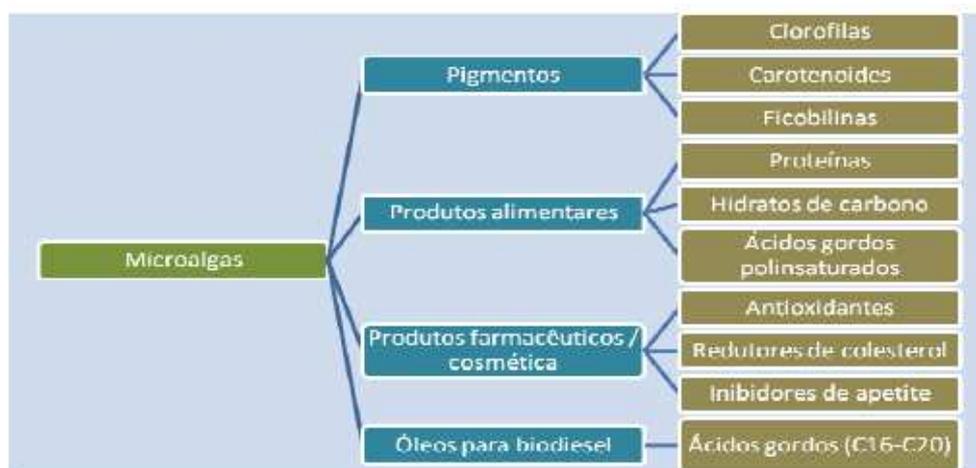


Figura 7 - Compostos extraídos a partir de microalgas (OLIVEIRA, 2009).

As microalgas conhecidas são apenas uma pequena percentagem das microalgas existentes, de onde a probabilidade de se encontrarem substâncias de interesse em novas microalgas que venham a ser descobertas é elevada.

Impulsionada pela crise energética, será de esperar investimentos substanciais em P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) e projetos pré-industriais por parte de grandes empresas multinacionais no curto prazo. Essa investigação abrangerá principalmente, mas não em exclusivo, a produção de biodiesel, bioetanol e hidrogênio.

Atualmente é possível a produção de biodiesel de 1^a e 2^a geração, bioetanol, biogás e hidrogênio a partir de microalgas (GOMES, 2008)

2.1.2 Produção De Biodiesel Por Microalgas

A produção de microalgas pode ser realizada em solos considerados impróprios (não férteis) para o cultivo de oleaginosas ou cereais alimentares (DEMIRBAS, 2009). Para além disso, o teor de óleo em algumas espécies de algas é muito elevado, a quantidade de biomassa

e do correspondente óleo produzido por unidade de superfície é muito superior àquela que se conseguiria obter a partir de materiais oleaginosos convencionais como a soja, a colza ou o girassol.

A produtividade em óleo de algumas espécies de algas pode ser incrementada significativamente mediante o seu cultivo em condições otimizadas. Por outro lado, é possível encontrar localmente espécies/estirpes de microalgas mais adaptadas e que potenciem a produção de óleos com características adequadas à produção de combustível como o biodiesel (OLIVEIRA, 2009).

A Tabela 1 a seguir apresenta-se uma comparação entre a produtividade de diferentes materiais oleaginosos.

Tabela 1 - Óleo extraído de diferentes matérias oleaginosas convencionais e microalgas.

Cultura	Óleo extraído (L/hectare.ano)	Hectares para produção de 1.000.000 litros de óleo
Soja	446	2.242
Colza	1.190	840
Girassol	810	1.235
Microalgas	35.100	28

Fonte: PULZ, 2001

O volume de óleo extraído por hectare e ano relativo à cultura de Microalgas foi estimado, com base na produtividade de uma espécie do gênero *Chlorella*, em um sistema de cultivo fechado na Alemanha, perto de Wolfsburg, em cerca de 130 a 150 toneladas de biomassa seca por hectare e ano (PULZ, 2001). Foi também considerado um teor em óleo na biomassa algal seca de 30%.

Um ponto comum referido nos estudos de diversos autores é a necessidade de baixar os custos de produção de uma determinada estirpe e tornar viável a sua produção em massa, tendo em conta as características ecofisiológicas da espécie requeridas.

Uma forma de baixar os custos de produção será utilizar meios residuais no cultivo microalgal, o que permitirá também reduzir os custos com o tratamento de águas residuais.

Para a continuidade do trabalho, será considerada a produção de biodiesel a partir do cultivo da microalga *Arthrospira platensis*, devido a essa espécie já ser utilizada para esse fim e utilizando o mesmo tipo de reator (HENRIKSON, 1989).

2.1.3 *Arthrospira platensis*

A microalga *Arthrospira platensis* é uma microalga do reino Monera, da Classe *Cyanophyceae*, que é popularmente conhecida como cianobactéria (espécie de microalga azul esverdeada), devido às semelhanças na organização celular com bactérias procarióticas (Figura 8) (LEE, 2008).

A espécie possui morfologia típica caracterizada por filamentos regularmente torcidos em espirais de cor azul esverdeada, conforme visualizado em microscopia óptica na figura 8.

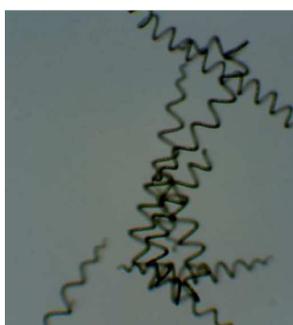


Figura 8 - Imagens de microscópio óptico (ampliação de 100x) da *Arthrospira platensis* (OLIVEIRA, 2009).

As *Spirulinas* são classificadas como seres procariotos (parede celular, ribossomos e ácidos nucleicos), imóveis, não esporulados e estão incluídas no grupo das bactérias. Sua natureza procariota, seus pigmentos do tipo ficobiliprotéico e produção de oxigênio via fotossintética as diferencia das algas eucariotas e bactérias fotossintéticas (LIMA & MASINI, 1999).

Essa espécie é a mais explorada economicamente, principalmente nos Estados Unidos, onde é cultivada em sistemas de lagoas tipo *raceway* (OLIVEIRA, 2009). Sua composição celular é bastante rica em proteínas, ácidos graxos, vitaminas, minerais e polissacarídeos.

No século 21, segundo a Organização para Alimentos e Agricultura das Nações Unidas, a *Arthrospira* foi considerada o suplemento alimentício ideal. Contudo, ela tem sido ultimamente mais utilizada na produção de medicamentos e de biodiesel (KHAN *et al.*, 2005).

No início dos anos 90 a China se tornou o país com a maior produção de *Spirulina* no mundo. A produção total era de 2.500 toneladas em 2006 (LU; XIANG; WEN, 2010).

Entre os anos de 2001 e 2003 foi desenvolvido o cultivo em reatores tipo *raceway ponds*, porém foi afetado pelas baixas temperaturas, o que resultou em baixa qualidade e produtividade dos produtos. A maioria da produção de *Spirulina* desta época foi vendida com baixo valor

agregado, como alimento animal. Por causa das técnicas de desenvolvimento da produção após 2003, a produção total anual da *Spirulina* cresceu rapidamente (LU; XIANG; WEN, 2010).

A microalga *Spirulina* é produzida em todo o mundo, e o produto seco é um valioso suplemento alimentar. Ele é rico em proteínas (60-70% por peso), vitaminas (principalmente B12 e h-caroteno) e minerais (JIMENEZ *et al.*, 2002).

A cultura da *Spirulina* é parte da nova era da agricultura ecológica. A componente chave da produção de *Spirulina* é a luz do Sol e é dada atenção à medição da temperatura e aos níveis de oxigênio. Porque os pesticidas e herbicidas matariam muitas formas de vida num lago, os cientistas de algas aprenderam a equilibrar a ecologia do lago sem usar essas substâncias prejudiciais. Esta forma de aquicultura representa uma das soluções necessárias à produção de alimentos enquanto se restaura o planeta (TEDESCO, 2010).

2.1.4 Parâmetros De Cultivo

As *Spirulinas* sp. apresentam muitas vantagens em relação à produção de óleos a partir da agricultura, pois é um microrganismo aquático, não requer solo fértil e não causa erosão nem contaminação de terras e águas.

O conceito de produção é muito semelhante ao da agricultura convencional, em que ocorre o uso da energia solar, pelo aparelho fotossintético, na produção de biomassa (VONSHAK, 2002).

A definição de qual composto será produzido em processos biológicos não é determinada somente pela espécie do microrganismo utilizado, mas também por diversos parâmetros químicos e físicos, como luminosidade, temperatura, pH, nutrientes, sais e agitação do meio. Isso resulta da habilidade das microalgas de mudar seu metabolismo de acordo com as condições ambientais (ZARDO, 2011).

Sob condições naturais, muitas algas crescem em comunidades mistas, incluindo várias espécies e gêneros. Quando o objetivo é estudar ou cultivar espécies individuais, um meio que possibilite condições seletivas é indispensável para o cultivo. Os principais requerimentos incluem carbono, fósforo, nitrogênio, enxofre, potássio e magnésio. Íons ferro e manganês são requeridos em pequenas quantidades. Outros como cobalto, zinco, boro, cobre e molibdênio são essenciais (BECKER, 2004).

Em condições normais, a *Spirulina* pode ser uma das muitas espécies presentes em águas naturais, mas quando a salinidade e a alcalinidade aumentam, o habitat se torna inadequado para outras formas de vida e a *Spirulina* se converte na única espécie.

Um aspecto interessante ligado a *Spirulina* é o seu meio de cultura; que pode ser composto por efluentes rurais e urbanos ricos em nitrogênio e fósforo. Desta forma, a partir do cultivo recupera-se quase que a totalidade desses elementos, evitando a proliferação de algas indesejáveis e produzindo biomassa para consumo humano e animal (LIMA & MASINI, 1999).

Ainda que a *Spirulina* tenha uma boa adaptação à água salgada, são poucas cepas que crescem no mar, porque o baixo conteúdo em carbonatos e as elevadas concentrações de magnésio e cálcio da água marinha inibem o seu desenvolvimento (HENRIKSON, 1989).

As *Spirulinas* vivem em meios líquidos ricos em sais minerais compostos principalmente por bicarbonato e carbonato de sódio, com pH 8 a 11. As regiões propícias para cultivo são as tropicais e subtropicais, quentes e ensolaradas.

A importância de um bom sistema de controle das variáveis de cultivo é enorme. Além de otimizar a produção da substância desejada, impondo à célula a produzir somente esse composto, um controle de temperatura, sanidade e pH pode, ainda, prevenir a proliferação de outros microrganismos contaminantes e até mesmo de outras algas.

Os principais fatores que influenciam a produção de microalgas serão detalhados a seguir.

2.1.5 Condições De Cultivo

A luz é fundamental para o crescimento microalgal em regime autotrófico, pois atua como a principal fonte de energia no processo de produção de biomassa. O excesso de luz pode provocar foto-oxidação ou morte foto-oxidativa devido à formação de peróxido de hidrogênio (substância tóxica para as microalgas) na presença de oxigênio.

A luz pode ser prejudicial tanto em baixa quantidade quanto em excesso, influenciando principalmente no crescimento celular, na velocidade específica de crescimento e na produtividade. Uma intensidade luminosa alta pode causar uma redução da atividade fotossintética devido ao efeito da inibição na produção de pigmentos, da fotooxidação desses pigmentos e também das enzimas envolvidas no processo.

A *Spirulina* é considerada fotoautotrófica e não cresce no escuro, mesmo que o meio contenha fonte de carbono orgânica. Na presença de luz a alga pode utilizar carboidratos, como por exemplo, glicose a 0,1% no meio aumentando a velocidade de crescimento e produção de células (FERRAZ, 1986).

Para as *Spirulinas*, o mais usual é utilizar lâmpadas fluorescentes fornecendo intensidade de fluxo luminoso de 1800 a 4000 lux. Além do fluxo luminoso, as microalgas necessitam de um período de escuro, da mesma forma que as plantas superiores.

Para o crescimento da *Spirulina* é preferível ter uma fonte de iluminação artificial em vez da luz solar, uma vez que a última possui ondas ultravioletas, os quais são prejudiciais as células da microalga. Mil lux de iluminação artificial é suficiente para o crescimento da maioria das microalgas (MICHEL, 1986).

A temperatura afeta a concentração de biomassa, a natureza do metabolismo, as necessidades nutricionais e a composição de biomassa (LEE, 2008), com efeitos diretos sobre a fotossíntese e a respiração. Por outro lado, a fixação de CO₂, e evolução do O₂, dependem também da luz.

A temperatura usual utilizada laboratorialmente para o cultivo da *Spirulina* varia de 35°C a 38°C. Ótimos de temperatura podem variar entre diferentes espécies e desvios desta faixa podem inibir a capacidade fotossintética. Estudos demonstraram que culturas crescendo a temperaturas menores que a ótima são mais sensíveis a fotoinibição (VONSHAK, 2002).

No inverno, a temperatura é o fator limitante afetando o crescimento da microalga em tanques abertos, enquanto no verão, o fator limitante é a luminosidade. Baixas temperaturas nos períodos escuros podem ser vantajosas visto que diminui a taxa respiratória e, portanto, o consumo de biomassa (VONSHAK, 2002).

A agitação de culturas, em meio líquido, mantém as células em suspensão e evita parcialmente a sua deposição no fundo do biorreator, favorecendo a homogeneização de disponibilidade de luz a todas as células em suspensão e promovendo a eliminação de excesso de oxigênio dissolvido no meio, o que diminui o risco de ocorrer morte celular por foto-oxidação (BECKER, 2004).

A injeção de ar aos cultivos em massa proporciona uma difusão efetiva dos nutrientes, um aporte parcial de CO₂, inorgânico, uma estabilização do pH, o mantimento das algas em suspensão e o cultivo uniformemente distribuído. Cultivos em volumes de um litro ou menos não necessitam aeração, basta que se realize uma agitação manual diariamente.

Nos cultivos em grande escala, a aeração deve ser leve durante a fase de indução, que corresponde ao período de até 2 dias depois da inoculação, devendo ser incrementada com o aumento da densidade da cultura (MICHEL, 1986).

Essas são as condições mais importantes que foram consideradas para o desenvolvimento de um sistema de controle, porém, para a definição de um processo global ótimo de crescimento celular, outros fatores devem ser levados em conta, como o pH, as fontes de carbono e nitrogênio, a oxigenação do tanque e a salinidade.

2.1.6 Sistemas E Equipamentos Para Produção

As microalgas podem ser cultivadas em diversos sistemas de cultivo, com volume variando desde poucos litros até bilhões de litros. Em geral, os sistemas de produção industrial são pouco sofisticados, uma vez que muitas empresas desenvolvem cultivos a céu aberto em tanques com fundo de terra e com baixo ou nenhum controle dos parâmetros ambientais.

Os cultivos podem ser desenvolvidos com água marinha ou de estuários, a qual não pode ser convencionalmente empregada no cultivo de plantas com valor para a agricultura, ou com água proveniente de diversos processos de produção (agropecuária, de dejetos domésticos, por exemplo).

Recentemente, alguns cultivos têm sido desenvolvidos em equipamentos específicos, denominados fotobiorreatores, nos quais é possível controlar os parâmetros ambientais (Figura 9). Isto implica numa elevada produtividade, a qual viabiliza a produção comercial de compostos de elevado valor (DERNER, 2010).



Figura 9 - Cultivo de *Spirulina platensis* em larga escala em vias fluviais (HENRIKSON, 1989).

Os sistemas de produção de microalgas podem-se dividir em dois grandes grupos: fotobiorreatores abertos (sistemas a céu aberto) e fotobiorreatores fechados.

Os sistemas a céu aberto são usualmente do tipo *raceway pond*, com pequena profundidade (cerca de 15 cm) para assegurar a adequada incidência da luz solar, conforme as Figuras 10 e 11. Estes sistemas podem ser construídos em plástico, lonas, betão, fibra de vidro ou alvenaria.



Figura 10 - Biorreator tipo *raceway pond* em pequena escala utilizado em estudo na Malásia (HABIB & PARVIN, 2008).

Durante o inverno, os tanques devem ser cobertos para evitar variações de temperatura e impedir que a camada superficial do meio de cultura congele durante a noite. Em regiões temperadas e subtropicais, a cobertura também reduz as perdas do meio por evaporação e diminui a contaminação da biomassa colhida por insetos. A desvantagem dos cultivos cobertos reside na redução da penetração da luz no sistema de cultivo, tanto pela existência da cobertura, como pela condensação de água na superfície interna (BECKER, 2004).

No cultivo de microalgas a céu aberto existe o risco de contaminação por parte de outros organismos; no entanto a contaminação pode ser controlada pela variação da concentração salina, aumento do pH e variação da temperatura (VONSHAK, 2002), que afetam de modo diferente distintas estirpes de microalgas.



Figura 11 - Sistemas de produção de microalgas a céu aberto do tipo *raceway pond* (www.was.org).

Os fotobiorreatores fechados podem ter diversas concepções estruturais (Figura 12). São usualmente construídos com tubos/superfícies de plástico transparente, vidro ou policarbonato. A estrutura pode ser do tipo tubular, em coluna (forma cilíndrica) ou em painéis.

Nos fotobiorreatores fechados é possível controlar mais facilmente parâmetros de cultivo como a temperatura, iluminação e pH. Estes tipos de sistemas viabilizam o controle e aplicação de intervalos ótimos dos parâmetros descritos anteriormente, o que pode levar a um acréscimo de produtividade de biomassa algal, relativamente aos sistemas a céu aberto.



Figura 12 - Exemplo de biorreator em sistema fechado para produção de microalgas (LU, XIANG e WEN, 2010).

Na Tabela 2 se resumem as vantagens e desvantagens entre os dois tipos de sistemas de cultivo de microalgas.

Tabela 2 - Vantagens/desvantagens dos sistemas de cultivo.

Parâmetros	Sistemas a céu aberto	Fotobiorreator
Risco de contaminação	Bastante elevado	Baixo
Área de implementação	Elevada	Baixa
Custo de implementação	Menor	Maior
Perdas por evaporação	Bastante elevada	Baixa
Possibilidade de injeção de CO ₂	Não é possível	Possível
Quantidade de biomassa	Não é controlável	Controlável
Variabilidade de espécies a cultivar	Muito baixa	Praticamente todas
Flexibilidade na produção	Praticamente impossível de alterar a espécie a cultivar	Possibilidade de alterar a espécie a cultivar
Parâmetros de cultivo	Dependente das condições exteriores	Possível controlar
Dependência de fatores climáticos	Total	Com pouco significado
Período para iniciar a produção após o início ou interrupções (ex. Limpeza)	Pelo menos seis a oito semanas	Até 2 semanas
Concentração de biomassa	de 0,1 a 0,2 g/L	De 2 a 8 g/L
Eficiência da colheita	Mais demorada e maior custo	Menos demorada e menor custo

Fonte: OLIVEIRA, 2009

Os reatores biológicos para cultivo de microalgas podem operar em modo descontínuo, semi-contínuo ou contínuo. Num processo descontínuo (em reator fechado) de cultivo de microalgas verificam-se as seguintes fases:

1º) Preparação do meio de cultura, adequado à nutrição e desenvolvimento da estirpe, bem como à obtenção do produto desejado;

2º) Inoculação de um fotobiorreator com o meio preparado e com o inoculo, o qual deverá advir de uma cultura microalgal densa; crescimento da cultura até à fase estacionária ou até à fase requerida para extração do composto pretendido;

3º) Quando a cultura atingir a fase requerida procede-se à colheita total e à obtenção dos produtos.

Este tipo de processo é o mais indicado quando existem dificuldades de manutenção de condições de assepsia, permite grande flexibilidade de operação e um controle mais restrito da estabilidade genética da estirpe de microalga.

Neste processo poderá ser efetuada a adição periódica de meio nutricional, isto é, um ou mais nutrientes são adicionados ao fotobiorreator durante o período de cultura até à colheita.

Neste tipo de operação pode ou não ocorrer alteração do volume de cultura, a qual depende da concentração do substrato e da taxa de evaporação do sistema (LEE, 2008).

No processo semi-contínuo as fases de operação seguem a mesma ordem que no processo descontínuo, com a diferença de que, o ato de colheita não corresponde à colheita total

da cultura algal, e o volume de cultura que fica no fotobioreator serve de inóculo ao cultivo seguinte. No final da colheita é introduzido no reator um volume de meio de cultura aproximadamente igual ao volume retirado. Deste modo, reinicia-se a sequência de operações até eventualmente existir uma quebra na produtividade do sistema.

O processo contínuo é realizado pela introdução contínua de meio de cultura no fotobioreator. Este caudal de entrada deverá ser equivalente ao caudal de saída, o qual corresponde ao caudal para colheita de biomassa algal, de modo a manter-se o volume de cultivo constante. Neste tipo de processo, o objetivo é que o sistema atinja uma condição de estado estacionário, isto é, que a densidade da cultura se mantenha aproximadamente constante (LEE, 2008).

2.2 SISTEMAS DE CONTROLE

Até o final dos anos 1930, a maioria dos processos industrializados eram simplesmente controlados manualmente, utilizando controladores elementares. Para tal, o gasto com mão de obra era extremamente alto, pois necessitava de muitos trabalhadores para manter sob controle diferentes variáveis do processo existentes nas plantas daquela época. Somente após 1960 o controle dinâmico foi mais profundamente estudado e começou a ser implementado na indústria (KÖHLER & OLIVEIRA, 2009).

Atualmente, o controle digital é de extrema importância para os processos industriais, fazendo papel de uma frente de desenvolvimento tecnológico com alto crescimento e retorno de investimento.

A idealização de um sistema de controle de processo é que ele seja capaz de medir a variável e a manter em uma certa faixa de valor predeterminada, ou seja, um controle automático. Com isso, o sistema de controle consegue garantir a manufatura de produtos mais eficiente e segura (KÖHLER & OLIVEIRA, 2009).

O controle pode ser feito de duas formas distintas, dependendo da natureza do processo. Há o controle em malha aberta e o controle em malha fechada. Em um sistema de controle em malha aberta a saída não tem efeito para o controlador, ela nem chega a ser medida na maioria dos casos. Já em um sistema em malha fechada a o sinal da saída é o que induz o controlador a atuar sobre o sistema, são denominados sistemas de controle com retroação ou realimentados (*feedback*) (QUEVEDO, 2013).

O sistema de controle de malha fechada é utilizado em situações onde ocorrem distúrbios e variações frequentes e aleatórias nos parâmetros a serem controlados no processo. Isso tende a deixar o projeto do sistema de controle muito mais complexo e conseqüentemente mais caro (QUEVEDO, 2013).

Já o sistema de controle de malha aberta é utilizado em situações onde não ocorrem distúrbios, ou eles são previsíveis e pode-se prever quando irão acontecer. Em outras palavras, sistemas cuja relação entre a entrada e a saída é conhecida em função do tempo. Por isso é um sistema mais simples e fácil de ser construído e projetado, sendo, portanto, mais barato que o de malha fechada (QUEVEDO, 2013).

Ainda, uma combinação entre sistemas de controle de malha aberta e malha fechada apresenta melhores resultados do que utilizados separadamente, pois é possível extrair os pontos positivos de cada tipo de sistema para amenizar os pontos negativos do outro (QUEVEDO, 2013).

2.2.1 Controle De Processos Em Reatores

O objetivo geral do uso de um biorreator é converter certas matérias-primas em produtos usando as fontes de energia disponíveis e da maneira mais econômica e segura possível. Estes sistemas não operam em estado estacionário, que apesar de ser uma condição de operação desejável, nem sempre é atingido ou mantido por muito tempo.

Isso quer dizer que numa planta bioquímica as condições de operação estão sujeitas a mudanças ao longo do tempo. Assim, existe a necessidade de se monitorar a operação das plantas e intervir para garantir a satisfação dos objetivos operacionais.

Estes sistemas devem operar sob condições conhecidas e pré-determinadas, pelas seguintes razões:

- **SEGURANÇA:** restrições de segurança e ambientais não podem ser violadas;
- **OPERABILIDADE:** certas condições são requeridas para que as reações desejadas ou outras operações ocorram;
- **ECONOMIA:** plantas bioquímicas são caras e devem gerar lucros. Produtos finais devem atender aos requerimentos de pureza do mercado ou não serão vendidos.

A seguir será utilizado como exemplo a forma de controle de temperatura em reatores.

- **Controle de temperatura**

O controle de temperatura é importante em reatores químicos em geral, devido à geração de calor (reações exotérmicas) e perturbações (efluentes) que ocorrem no reator, e é essencial em bioprocessos. É uma condição imprescindivelmente controlada para crescimento de microrganismos e produção de biomoléculas. Pode ser feita de diversas maneiras:

Controle de temperatura em CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*)

Camisa de resfriamento: Forma mais simples de se proceder com o controle. Minimiza risco de vazamentos, evita contaminações e não há obstruções internas (dentro do reator). Porém possui limitação da área de troca térmica.

O suprimento direto de água é simples e barato, mas possui diversos inconvenientes, pois com baixas vazões de água não se mantêm bons coeficientes de troca térmica, o ajuste do controlador é complexo (não-linear) e geram-se gradientes de temperatura no reator. A solução é utilizar um “*loop*” para recirculação da água de resfriamento.

Com a recirculação pode-se manter uma vazão de água alta e constante, e por consequência se mantém constante o coeficiente de transferência de calor. Além disso o ganho do processo é linearizado e a temperatura da água na camisa é uniforme. Porém o tempo para que a temperatura da água na camisa estabilize é muito elevado, e com isso é difícil estabilizar o processo sem tornar a resposta lenta.

Se o ganho do controlador é baixo o controle é lento demais, e se o ganho do controlador é elevado o controle é instável. Para solucionar pode-se utilizar um controle em cascata:

Para se aumentar ainda mais o tempo de resposta do sistema de controle pode-se usar um “*loop*” fechado na camisa. Com esta estratégia é possível usar outro líquido (e não água) e a troca térmica pode ter maior eficiência.

A água de resfriamento é colocada em contato com o líquido (trocador de calor – uso de “*by pass*”). Outra forma de se reduzir o tempo de resposta é com o aumento da área de troca térmica com o uso de espirais de resfriamento.

As espirais, no entanto, possuem importantes desvantagens, pois propiciam o surgimento de vazamentos, favorecem contaminações, dificultam a agitação (se necessária) dificultam a homogeneização do meio de cultivo e se aeração é necessária, podem surgir rotas de ar preferenciais.

Com este método a área de troca térmica pode ser estabelecida independentemente da geometria do reator e a circulação do material promove mistura do meio reacional. Porém gasta-se energia com bombeamento e há um favorecimento de contaminações. Além disso, frações

do meio de cultivo podem eventualmente ser submetidas a temperaturas muito elevadas ao passar pelo trocador. É possível ainda reduzir o tempo de resposta pelo uso de “*by pass*” no trocador de calor.

Em reatores químicos, o controle de temperatura pode ser feito indiretamente pela alteração da taxa de reação. Neste método a temperatura é lida e em função da resposta, será alterada a taxa de alimentação do reagente ou de um catalizador. Deve-se controlar o nível neste sistema.

2.3 KIT MICROCONTROLADOR LAUNCHPAD TIVA C SERIES TM4C123G

O microcontrolador escolhido para realizar o controle no reator foi o *kit LaunchPad*, da Texas (Figura 13). O motivo dessa escolha é que esse *kit* pode ser facilmente repostado caso ocorra algum problema, pois pode ser comprado diretamente de distribuidores nacionais por um preço acessível. Além disso, é um microcontrolador moderno, possui grande poder de processamento e apresenta bastante recursos em relação aos outros disponíveis no mercado.



Figura 13 - Kit Microcontrolador *LaunchPad* Tiva C Series TM4C123G (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

Esse *kit* apresenta muitas vantagens. O microcontrolador pode ser conectado diretamente à porta USB (*Universal Serial Bus*) do computador, por onde a gravação do *firmware* é realizada. Outro aspecto positivo é a existência de uma unidade de ponto flutuante, tornando possível a utilização desse tipo de variável sem que a capacidade de processamento fique comprometida.

A aquisição de sinais pode ser realizada por um dos 12 canais existentes, com resolução de 12 *bits*. Outra ferramenta disponível é o PWM (*Pulse Width Modulation*), com 16 saídas. Um ponto importante desse *kit* é a existência de PWM complementares, que podem ser facilmente configurados, facilitando a implementação do tipo de topologia escolhida.

Todas essas ferramentas conferem um grande poder de processamento ao microcontrolador, de forma que uma única unidade é capaz de controlar todas as malhas pretendidas para o sistema.

A plataforma de desenvolvimento da fabricante oferece um ambiente completo de depuração, com ferramentas como a visualização em tempo real de variáveis que estão sendo utilizadas, a possibilidade de utilização de *breakpoints* para verificar o correto funcionamento do circuito, entre outras. Essas ferramentas facilitam muito a implementação do controlador.

Maiores informações sobre a capacidade de processamento deste *kit* e mais detalhes sobre suas funcionalidades podem ser encontrados na página da fabricante (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

2.4 SENSORES

Nos sistemas de controle, um sensor pode ser qualquer componente ou circuito eletrônico que permita a análise de uma determinada condição do ambiente, podendo ela ser algo simples como temperatura ou luminosidade; uma medida um pouco mais complexa como a rotação de um motor ou a distância de um carro até algum obstáculo próximo ou até mesmo eventos distantes do nosso cotidiano, como a detecção de partículas subatômicas e radiações cósmicas (PATSKO, 2006).

2.4.1 Sensor De Temperatura

Existem vários tipos de sensores para medir a temperatura, cada um com características diferentes que implicam em tipos de aplicações também distintas. Há os sistemas de dilatação de líquidos (mercúrio e etanol, por exemplo), encontrados nos termômetros caseiros; os sistemas de dilatação de metais, que são utilizados em termostatos liga-desliga; os sistemas por

radiação térmica; os sistemas de indicação por cor, como a tinta utilizada nos rótulos de cerveja para indicar que a bebida já está gelada; e os sistemas elétricos, que são os utilizados para circuitos de controle e os mais usuais serão listados a seguir.

Os termopares são os medidores de temperatura mais utilizados na indústria, são sensores simples, robustos e de baixo custo, sendo amplamente utilizados nos mais variados processos de medição de temperatura (COELHO, 2009).

Uma termoresistência (RTD do inglês *Resistance Temperature Detector*), também conhecida como termômetro de resistência, é um instrumento que permite conhecer a temperatura do meio ambiente, recorrendo à relação entre a resistência elétrica de um material e a sua temperatura. A maior parte das termoresistências são feitas de platina, mas são também utilizados outros materiais, como por exemplo o níquel (MARTINS, 2008).

Os termistores são componentes resistivos cujo valor da sua resistência varia sensivelmente com pequena variação na temperatura, isto é, apresenta um valor de resistência elétrica para cada temperatura absoluta. Diferem das termoresistências basicamente pelo material com o qual são construídos, enquanto as termoresistências são feitas com platina, níquel ou cobre, o termistor pode ser construído com misturas semicondutoras, como o manganésio, o níquel, o cobalto, o cobre, o ferro e o titânio (MARTINS, 2008).

Há também sensores mais completos, que facilitam a sua utilização por já emitirem um sinal limpo e com uma relação linear com a temperatura, o que não ocorre com os demais tipos de sensores, que necessitam, ainda, da implementação de algum circuito, como amplificadores. O LM35 é um sensor de precisão que possui essas características, também comercializado em um encapsulamento plástico similar a um transistor.

Para determinar a temperatura do meio de cultura o sensor deve possuir certas características, como ser feito de um material inerte, preferencialmente de inox, ou possuir uma sonda de inox para que o sensor não entre em contato com o líquido. Além disso, é importante que o sensor suporte ambientes redutores sem sofrer danos ou interferências.

A faixa de temperatura a ser medida não terá valores extremos, portanto a grande maioria dos sensores consegue suprir essa necessidade. A opção mais atrativa, tanto em função das vantagens apresentadas como em função do preço e disponibilidade do sensor é o LM35.

2.4.2 Sensor De Luminosidade

Da mesma forma que os sensores de temperatura, existem vários tipos de sensores para medir a luminosidade, cada um com características diferentes que implicam em tipos de aplicações também distintas. Segundo Wending, 2010 podem ser definidos como: “São componentes eletrônicos de sinalização e comando que executam detecção de qualquer material sem que haja contato mecânico entre eles”.

Para um sistema de controle, o sensor de luminosidade é um equipamento eletrônico capaz de regular o funcionamento de um dispositivo elétrico/eletrônico qualquer, mediante a quantidade de luz irradiada no ambiente.

São quatro tipos principais de sensores de luminosidade, os fotoresistores (Figura 14), os fotodiodos (Figura 16), os fototransistores (Figura 17) e as fotocélulas (Figura 15). O fotoresistor, também conhecido como resistor dependente de luz (LDR, do inglês *Light Dependent Resistor*), como o próprio nome indica, tem sua resistência alterada dependendo da quantidade de luz que incide sobre ele (ALFARONE, 2010). Geralmente são constituídos por uma superfície de sulfeto de cádmio (CdS), material cuja resistência elétrica depende da quantidade de luz incidente (WENDING, 2010).

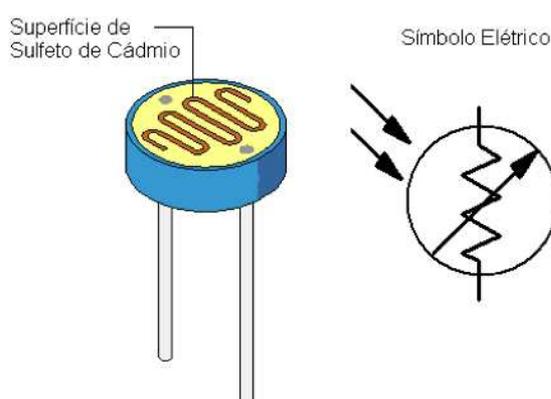


Figura 14 - Fotoresistor (WENDING, 2010).

As maiores vantagens desse modelo de sensor é que eles são bastante sensíveis e operam com fontes convencionais de luz e são sensíveis às principais fontes utilizadas, no entanto são sensores lentos, com baixa velocidade de resposta.

Já uma fotocélula, diferentemente dos LDR, é sensível e rápida, podendo ser utilizada em uma gama de aplicações maior. Um sensor com fotocélula tem seu circuito baseado em

transistores e amplificadores operacionais, pois fornece como saída uma tensão. Por isso elas também podem ser usadas para gerar energia, transformando a luz em energia elétrica, o que a torna um componente com custo mais elevado (WENDING, 2010).



Figura 15 - Fotocélula (WENDING, 2010).

Outro tipo de sensor de luminosidade é o fotodiodo, que operam segundo o princípio de que fótons incidindo em uma junção semicondutora liberam portadores de carga, o que faz com que apareça uma tensão entre os terminais do diodo e altere a sua resistência elétrica.

São sensores muito sensíveis, porém com sinais de saída bastante precisos, por isso é necessário um circuito de amplificação, entretanto, possui uma alta velocidade de resposta. Da mesma forma que as fotocélulas, o fotodiodo também pode gerar energia elétrica, dependendo da forma de ligação.

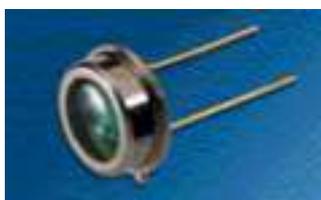


Figura 16 - Fotodiodo (WENDING, 2010).

O último tipo de sensor são os fototransistores, que operam segundo o mesmo princípio dos fotodiodos, porém a diferença é que os fototransistores podem amplificar o sinal de saída. São componentes um pouco mais lentos que os fotodiodos e as fotocélulas, mas podem ser utilizados para as mesmas aplicações (COELHO, 2005).

Uma vantagem dos modelos a base de silício, como os fotodiodos e os fototransistores,

é que sua curva tem grande sensibilidade no ponto de emissão de fontes comuns, principalmente LEDs (*Light Emitting Diode*) infravermelhos (WENDING, 2010).



Figura 17 - Fototransistor (WENDING, 2010).

Na determinação da quantidade de luz que incide sobre o cultivo, é necessário que seja um sensor específico para uso submerso, e que seja feito de um material inerte e que não sofra nenhum tipo de dano em ambientes redutores.

A faixa de luminosidade a ser medida não terá valores extremos, portanto a grande maioria dos sensores consegue suprir essa necessidade. A opção mais atrativa, tanto em função das vantagens apresentadas com em função do preço e disponibilidade do sensor são os LDRs. É um sensor bastante simples de ser utilizado, e suas características são suficientes para a aplicação desejada.

O modelo ideal para o sistema de controle de um reator tipo *raceway* seria constituído por algum material inerte e que impedisse ou evitasse a criação de biofilme, a aderência de células microalgais na superfície do sensor, o que interferiria na leitura da variável. Porém, esse problema pode ser sanado simplesmente por realizar uma manutenção periódica semanal, pois a velocidade de crescimento desse biofilme não será muito elevada devido à agitação empregada. Outro fator que pode interferir na leitura da luminosidade é o fato de que, no decorrer do cultivo, a transparência do líquido irá se alterar, devido ao crescimento celular.

2.5 MOTORES ELÉTRICOS

A agitação do reator será feita através de um conjunto de impelidores, que é constituído basicamente de seis pás ligadas a um eixo, que será rotacionado fazendo com que o meio de cultivo seja impelido a se movimentar.

Para fazer a rotação dos impelidores é necessário algum tipo de dispositivo mecânico, como um motor, por exemplo. Existem diferentes tipos de motores que podem ser utilizados para essa finalidade, e por se tratar de um protótipo em pequena escala, o motor não deve ter dimensões nem potência muito elevadas.

Leite, *et al.*, 2003 os define como: “Um motor elétrico é um dispositivo que transforma energia elétrica em energia mecânica, em geral energia cinética”. Ou seja, a aplicação de uma corrente elétrica, que pode ser contínua ou alternada, gera movimento de um eixo, movimento esse que pode ser aproveitado em diferentes aplicações (LEITE, *et al.*, 2003).

Os motores de corrente alternada (CA) mais utilizados nas indústrias são os de indução de gaiola, por ser a configuração mais econômica. Estima-se que 90% das unidades fabricadas sejam desse tipo. O controle de velocidade desse tipo de motor é ainda muito básico e não atende as necessidades exigidas por muitas aplicações. Contudo, o constante desenvolvimento da eletrônica de potência provavelmente irá eliminar essa dificuldade no ajuste e controle de velocidade, e os motores CA irão conquistar outra faixa do mercado (LEITE, *et al.*, 2003).

Já os motores de corrente contínua (CC) são conhecidos por seu controle preciso e ajuste fino da velocidade de rotação, por isso são utilizados amplamente em aplicações que exigem uma precisão maior. O funcionamento básico de um motor CC, de forma simplificada, se dá pela interação entre campos eletromagnéticos. O princípio fundamental em que os motores eletromagnéticos são baseados é que há uma força mecânica em todo o fio ao conduzir corrente elétrica estando imerso em um campo magnético. A força é descrita pela lei de Lorentz e é perpendicular ao fio e ao campo magnético (LEITE, *et al.*, 2003).

Os motores CC podem ser utilizados, por exemplo, em aplicações como o posicionamento de um braço de robô. Mas eles apresentam uma grande desvantagem, pois, para que um computador dê um comando para que o braço se mova para uma determinada posição com precisão, é necessário um complicado circuito externo provido de sensores de posição, que informe ao computador que o braço já está na posição escolhida. E é justamente para que se resolva este problema que foi desenvolvido outro tipo de motor, o motor de passo (LEITE, *et al.*, 2003).

Os motores de passo funcionam diferentemente dos outros motores, que simplesmente giram quando uma tensão é aplicada, e possui três estágios: parado, ativado com o rotor travado ou girando em etapas. Um motor de passo de rotação é um dispositivo eletromecânico que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos que geram variações angulares pequenas, denominadas passos. Eles são utilizados cada vez mais em áreas como informática e robótica, pois conseguem se movimentar com uma precisão altíssima, além de serem rápidos, confiáveis e fáceis de controlar. Podendo, inclusive, girar apenas alguns graus e parar na posição desejada, sem necessitar de um sistema de frenagem. (BRITES & SANTOS, 2008; QUEIROZ, 2002).

Uma comparação entre cada tipo de motor citado pode ser avaliada através da Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação com outros tipos de motores.

	Motor CC	Motor de Passo	Servo-Motor
Velocidade	Alta	Baixa	Média
Torque	Zero/Alto	Alto/Médio	Baixo/Alto
Facilidade de controle	Fácil	Média	Complexo
Precisão	Nenhuma	Alta	Muito Alta
Durabilidade	Média	Ótima	Média
Requer manutenção?	Sim	Não	Sim

Fonte: Adaptado de BRITES & SANTOS, 2008.

O motor escolhido para a aplicação foi um motor de passo, principalmente devido ao fato de que a velocidade de agitação não seria influenciada pela quantidade de líquido no reator. Caso fosse utilizado um motor CC, por exemplo, seria necessário a implantação de um sensor de velocidade angular para monitorar essa variável, transformando o controle em malha fechada. Além disso, o acionamento do motor de passo é bastante simples e dispensa qualquer tipo de circuito de acionamento, quando utilizado um *driver* específico.

3 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR

Para realizar o controle das variáveis de processo definidas anteriormente (temperatura, luminosidade, aeração e agitação) serão utilizados os dois tipos de controle existentes: malha aberta e malha fechada. As variáveis que estão sujeitas a condições externas, e por isso tem uma grande tendência de sofrerem oscilações durante o cultivo, terão um controle em malha fechada. Já as variáveis que não sofrem influência do ambiente, e terão somente seus valores definidos pelo usuário, terão um controle em malha aberta, sem a necessidade de um sensor.

3.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA

Primeiramente é importante conhecer o sistema de cultivo como um todo, para poder compreender como cada variável poderá ser controlada. É um sistema de pequena escala, destinado somente a cultivos experimentais em laboratório. Porém, com um controle adequado sobre as variáveis mais significativas, é uma ferramenta muito útil para o desenvolvimento de um novo processo, ou a alteração de um processo já existente. Com ele é possível definir quais as melhores condições de cultivo com os componentes disponíveis de forma rápida e barata.

O reator tem capacidade útil de aproximadamente 6 litros, com dimensões aproximadas de 0,80 x 0,25 metros. Foi desenvolvido em um projeto de iniciação científica do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Universidade Federal do Paraná, no qual participaram, o autor do presente trabalho, o professor Júlio Cesar de Carvalho e o aluno Luis Cesar Da Costa Junior, nos anos de 2010 a 2012.

Como pode ser visto na Figura 18, o reator já possui um sistema de agitação, porém, é um sistema improvisado e bastante precário e foi modificado, sendo aproveitadas somente as pás com o eixo.

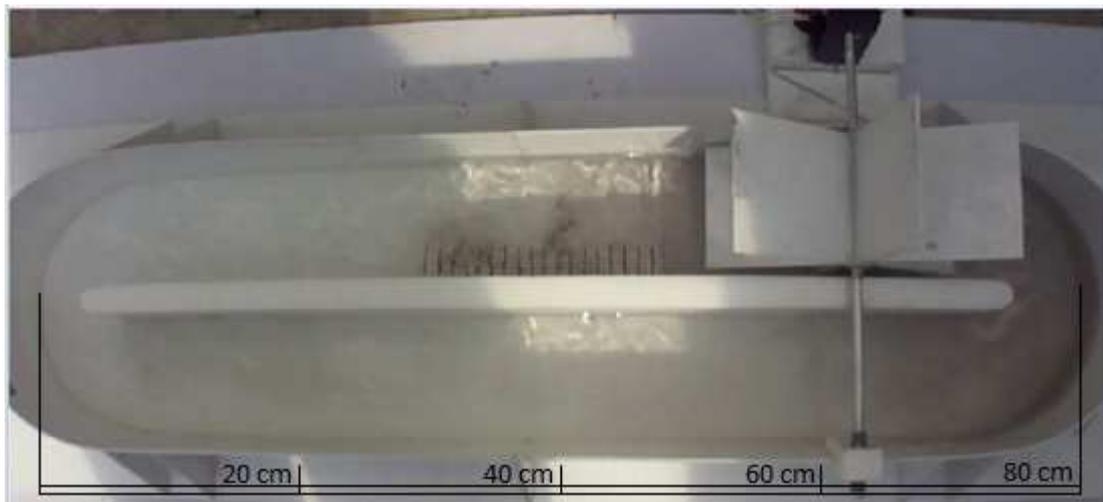


Figura 18 - Lagoa *raceway* que será utilizada no sistema de controle (Autoria própria).

Além do sistema de agitação, o reator também terá um sistema de aeração, um sistema de controle de temperatura e um sistema de controle de luminosidade. Todos esses sistemas, inclusive o de agitação, serão controlados pelo microcontrolador presente no *kit LaunchPad*. Os sistemas serão melhor detalhados nos próximos itens.

3.2 VISÃO GERAL DO SISTEMA DE CONTROLE

Primeiramente o usuário deverá inserir as informações sobre os parâmetros de processo, qual a temperatura desejada para o cultivo; qual a iluminância e o regime claro-escuro; qual a velocidade de agitação desejada e qual a taxa de aeração.

Inicialmente no projeto, estava prevista a utilização de um teclado matricial para a inserção dos valores pelo usuário, com o apoio de um display LCD para a visualização dos valores que fossem digitados. Porém, como esses componentes não são essenciais para o funcionamento do controlador, foi decidido retirá-los do projeto e substituí-los por uma interface gráfica através do próprio *software* de programação utilizado e inserindo os dados através do teclado do computador.

Como citado anteriormente, pode-se dividir basicamente o sistema em duas partes, a parte que será controlada em malha fechada e a que será controlada em malha aberta.

A temperatura e a luminosidade do cultivo sofrem com a variação externa dessas mesmas variáveis, portanto exigem um controle mais preciso. Para isso serão utilizados

sensores para determinar os valores instantâneos para comparação com os valores desejados, aqueles inseridos pelo usuário.

Para a agitação e aeração, diferentemente do controle da temperatura e luminosidade, não há a necessidade de se fazer a medição da variável, pois elas não são dependentes das condições externas. Será, portanto, um controle em malha aberta, sendo o único parâmetro de controle o valor definido pelo usuário. O diagrama de blocos do sistema está demonstrado na Figura 19 a seguir.

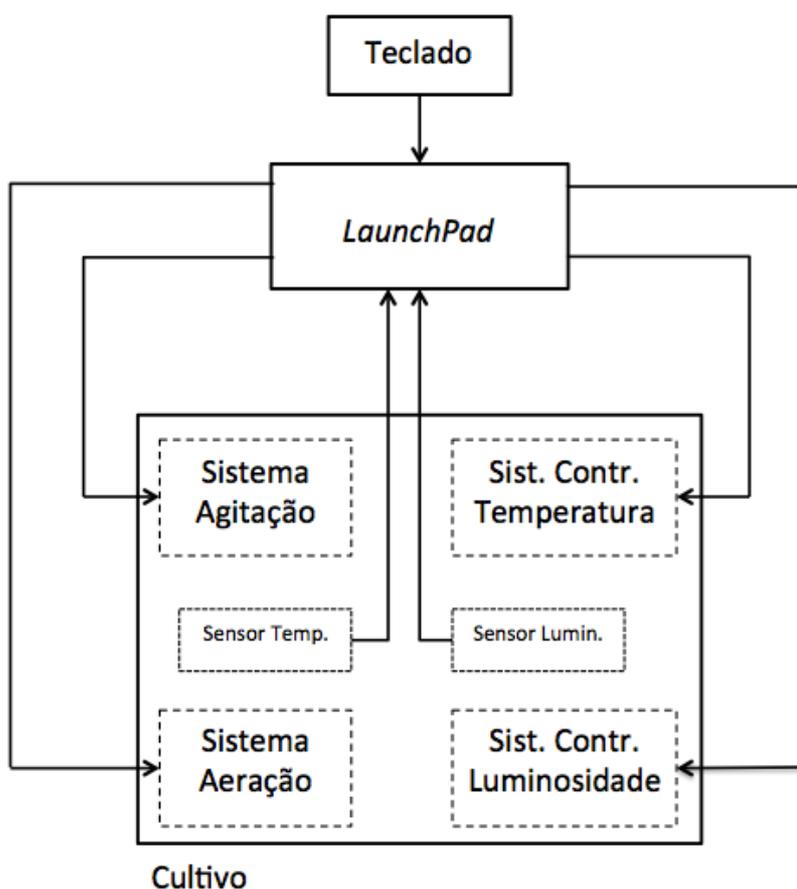


Figura 19 - Diagrama de blocos do sistema (Autoria própria).

3.2.1 Malha De Controle Da Temperatura

A temperatura do cultivo varia conforme a temperatura do ambiente, por isso ela deve ser controlada em malha fechada (Figura 20). Um sensor colocado em local estratégico dentro do reator irá medir a temperatura do meio de cultivo e repassar essa informação ao controlador.

Caso essa medição esteja fora da faixa de valores pré-determinada pelo usuário, 30 °C por exemplo, o controlador irá atuar no sistema.

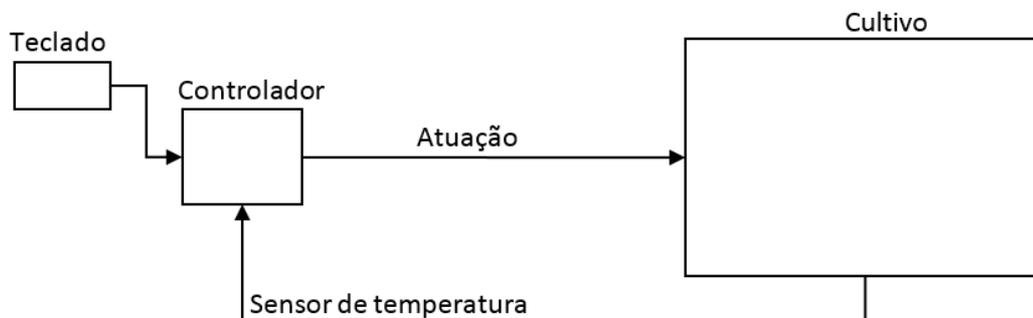


Figura 20 - Diagrama de blocos do controle de temperatura (Autoria própria).

Para tornar o trabalho mais palpável, pode-se admitir que o espaço onde serão feitos os experimentos, um laboratório, seja refrigerado, e mesmo o calor cedido ao meio de cultura pela agitação e crescimento celular não é suficiente para manter a temperatura dentro dos níveis desejados pelo usuário. Portanto, o sistema para o controle de temperatura terá somente a função de aquecer o meio, e será formado, além do sensor, por resistências térmicas, ou “rabo quente” como é chamado comercialmente. As resistências utilizadas possuem potência de 60 W que exigem 5 amperes quando alimentadas em 12 V. Para aquecer o meio de cultivo e mantê-lo na temperatura desejada são necessárias, no mínimo, duas resistências, resultando em, aproximadamente 120 W entregues ao sistema para o aquecimento. Foram utilizadas três resistências para tentar melhorar o tempo de resposta do sistema.

Para trabalhos posteriores ou futura comercialização do produto, pode-se ser implementado um sistema único de transferência de calor que sirva tanto para aquecer como para esfriar a lagoa de cultivo. Isso pode ser feito, por exemplo, através de uma serpentina plana, similar a uma manta térmica, por onde possa ser circulado um fluido quente ou frio, dependendo da situação. Seria necessário ter duas fontes desse fluido ligadas a uma bomba, que seria responsável por circular o fluido dentro da serpentina, e um sistema de válvulas controlando a quantidade de proporção dos fluidos. A quantidade de cada fluido a circular na serpentina seria controlada através de válvulas na saída dos recipientes, e seria definida pelo controlador, através da medição das temperaturas das duas fontes e do cultivo, que então acionaria as válvulas.

3.2.2 Malha De Controle Da Luminosidade

A luminosidade é o outro parâmetro que será controlado em malha fechada, pois varia conforme o ambiente, depende do horário do dia e da quantidade de luz solar que incide no reator. Um sensor dentro do reator irá determinar qual a incidência de luz e o controlador irá comparar esse valor com o desejado pelo usuário, e se necessário irá ligar lâmpadas para atingir esse valor, a malha desse controle pode ser observada na Figura 21, a seguir.

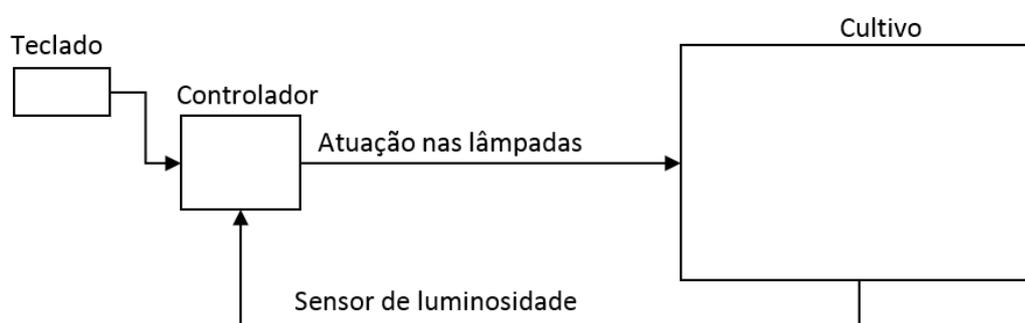


Figura 21 - Diagrama de blocos do controle de luminosidade (Autoria própria).

Também será contado o tempo para controlar o regime claro-escuro, apagando as lâmpadas quando estiver na fase de escuro. O ideal seria que o período de escuro coincida com o período noturno, para que não tenha nenhuma luz incidindo no reator durante esse tempo. E para garantir que isso ocorra em vários ciclos seguidos, a duração de um ciclo deve ser de 24 horas, ou seja, a soma do tempo do período claro com o tempo do período escuro deve ser 24.

Essas informações serão fornecidas pelo usuário ao iniciar o programa de controle. O mais comum, como já citado anteriormente, é ter somente dois períodos, um claro e um escuro, e é nisso que será baseado o programa do controlador. Porém, pode haver espécies que necessitem de um ciclo diferente e específico, até mesmo durante as diferentes fases de crescimento celular. Esse é outro ponto que poderá ser implementado em trabalhos futuros, criar a possibilidade do usuário entrar com um programa completo de luminosidade, e não somente um período para ser repetido. Poderia ser, por exemplo, uma determinada microalga que precise de pouca luz durante o seu período de crescimento, mas necessite de mais luz para o período que irá produzir a substância de interesse, e até mesmo diferentes regimes de claro-escuro para esses períodos.

Foi utilizada uma fita de LEDs com potência total de 8,4 W e 412 lumens, o que seria suficiente para suprir a necessidade das células no caso de ausência de luz natural. A alimentação dessa fita é de 12 V e demanda uma corrente de 0,7 A.

3.2.3 Malha De Controle Da Agitação

No caso da agitação, que será controlada em malha aberta (Figura 22), o valor inserido deverá ser uma velocidade rotacional, medido em RPM (Rotações Por Minuto). O controlador irá receber essa informação, o usuário irá inserir o valor através do computador, e acionará o motor, que estará acoplado ao eixo do impelidor, de forma a se obter a velocidade desejada.

As pás do impelidor são constituídas do mesmo material das paredes do reator, e o eixo é feito de alumínio. As pás estão coladas no eixo com uma cola bastante flexível para permitir um certo trabalho na junção e não prejudicar nem quebrar a cola.

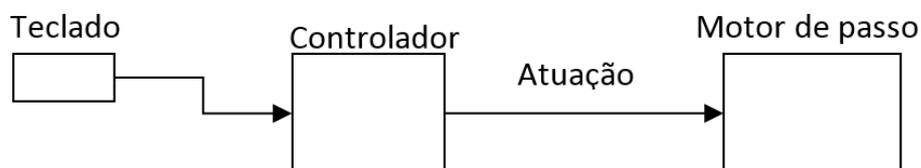


Figura 22 - Diagrama de blocos do controle de agitação (Autoria própria).

O motor de passo utilizado para atuar no sistema é do modelo AK17/1.10F6LN1.8, do fabricante Akiyama Motors. A sequência de fases para o acionamento do motor foi retirada do seu *datasheet* (Figura 23), assim como o seu esquema de ligação (Figura 24).

Passo	Sentido: horário				Sentido: anti-horário
	A+	B-	A-	B+	
0	+	+			
1		+	+		
2			+	+	
3	+			+	

Iniciando do Passo 0 – Sentido horário
 Iniciando do Passo 3 – Sentido anti-horário

Figura 23 - Sequência de fases do motor de passo (NEOYAMA, s.d.).

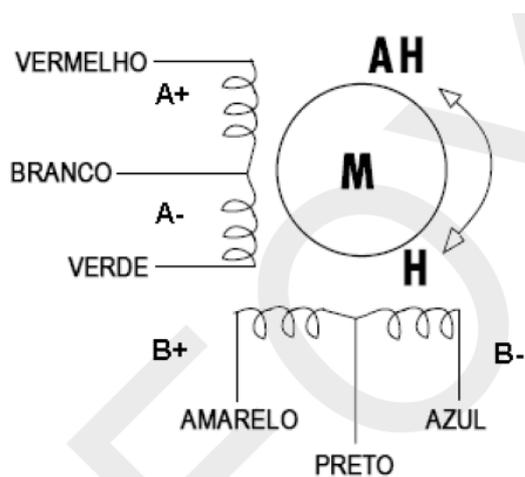


Figura 24 - Esquema de ligação do motor de passo (NEOYAMA, s.d.).

3.2.4 Malha De Controle Da Aeração

No caso da aeração, o valor inserido deverá ser uma taxa de aeração, medida em mL/min. O controlador irá receber essa informação e acionar o compressor de ar, que terá sua saída submersa no reator, com uma pedra difusora para melhorar a distribuição do ar, de forma a se obter a taxa de aeração desejada.

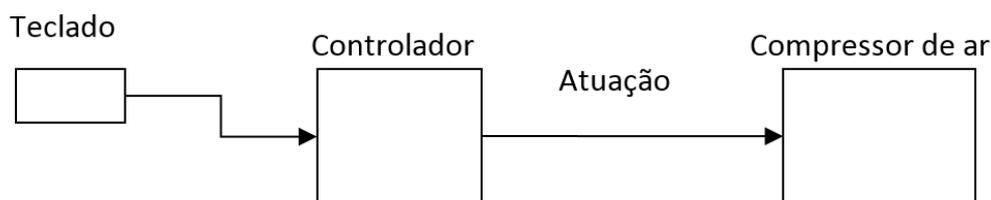


Figura 25 - Diagrama de blocos do controle de aeração (Autoria própria).

O compressor utilizado no projeto é do modelo D-200, do fabricante Boyu. A recomendação do fabricante desse modelo de compressor é que seja aplicada uma tensão de 1,5 V sobre seu motor. Porém, foram realizados testes nos quais o motor suportou uma tensão de até 5 V, gerando uma série de dados que foram analisados resultando na Equação (1) a seguir:

$$V_{comp} = 0,4231 \times e^{2,331 \times T_{ar}} \quad (1)$$

Sendo T_{ar} a taxa de aeração, medida em litro por minuto, e V_{comp} a tensão de alimentação do compressor, medida em Volts.

3.3 ESQUEMAS DE LIGAÇÃO

Definidos como vão funcionar todos os sistemas de controle, e quais serão os atuadores e sensores, é necessário determinar a forma que serão ligados esses componentes, e as suas comunicações com o *LaunchPad*.

3.3.1 Controle de Temperatura

O *hardware* do sistema de controle de temperatura é composto por duas partes separadas, o sensor de temperatura e a resistência térmica, cada um com seu circuito de ligação específico.

Para conseguir uma medição mais precisa da temperatura do líquido, foram utilizados dois sensores e o controlador irá trabalhar com a média dos dois valores recebidos.

O sensor de temperatura escolhido é o LM35, que é um sensor de temperatura com boa precisão, tem uma resposta linear às diferenças de temperatura, variando $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ (TEXAS INSTRUMENTS, 2013). Ele pode ser ligado diretamente no controlador, conforme Figura 26 a seguir, sendo somente necessárias a associação de um resistor no pino de tensão de saída para estabilizar a leitura do componente, e de um capacitor em paralelo na alimentação para diminuir a influência de ruídos vindos da fonte.

Para proteger a entrada analógica do microcontrolador, que aceita como tensão máxima $3,3 \text{ V}$ somente, foi adicionado um limitador simples de tensão com dois diodos conectando a entrada analógica aos níveis de tensão $3,3$ e $0,0 \text{ V}$. Essa filosofia foi aplicada em todas as entradas analógicas utilizadas neste trabalho, para evitar que um pico de tensão maior que $3,3 \text{ V}$ seja aplicado no controlador.

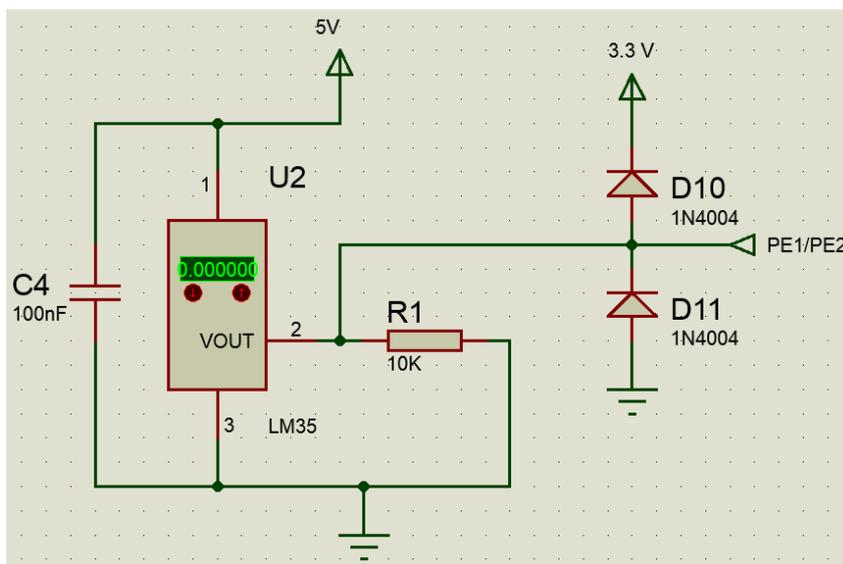


Figura 26 - Ligação do sensor de temperatura (Autoria própria).

Já os circuitos que irão acionar as resistências térmicas para aquecer o meio de cultivo são um pouco mais complexos, e consistem em um transistor MOSFET comutando a tensão para a carga, respondendo ao sinal enviado pelo *LaunchPad*, Figura 27.

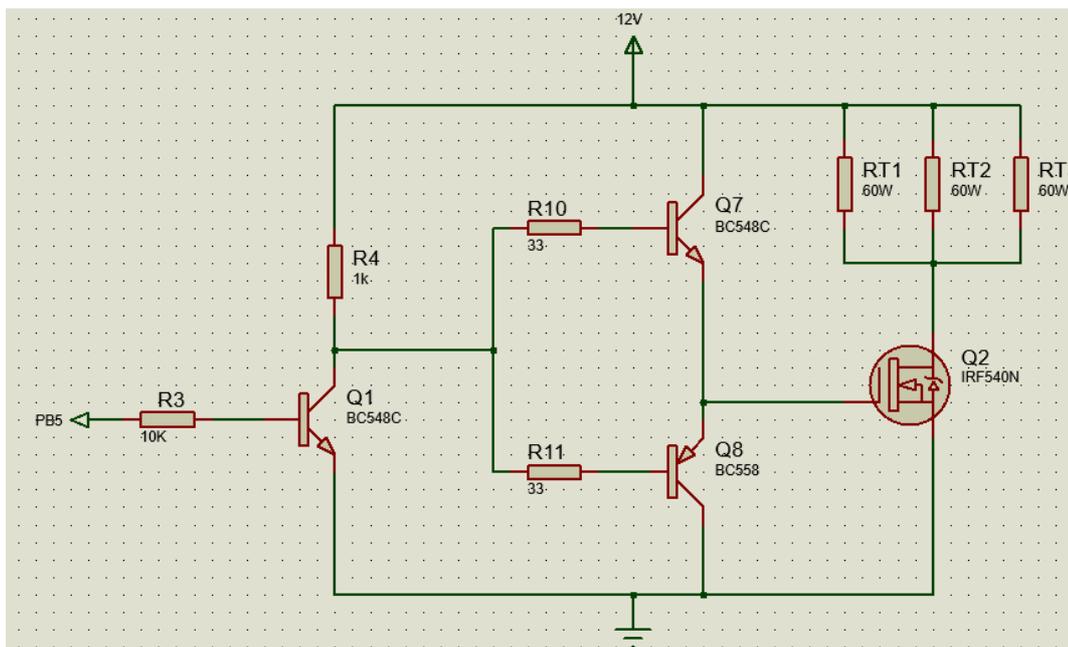


Figura 27 - Esquema de ligação do acionador das resistências térmicas (Autoria própria).

3.3.2 Controle de Luminosidade

Da mesma forma que o sistema de controle de temperatura, o controle da luminosidade também possui duas partes, o sensor e o atuador, os LEDs. Foi utilizada a mesma lógica empregada na aquisição dos dados da temperatura, porém, empregado somente um sensor LDR para captar a quantidade de luz incidente no fundo do reator. Isso devido à alta variação entre as resistências dos sensores, o que geraria um sinal diferente de cada sensor para um mesmo valor de luminosidade, implicando em um erro na leitura. O esquema de ligação desse sensor é o mostrado na Figura 28.

Esse sensor tem uma resposta não linear em relação à quantidade de luz que incide sobre sua resistência. Essa relação pode ser equacionada conforme a Equação (2) abaixo (SELL & LEINI, s.d.):

$$E = 255,84 \times R^{-10/9} \quad (2)$$

Sendo E a intensidade luminosa medida em lx, e R a resistência do LDR medida em ohms (Ω).

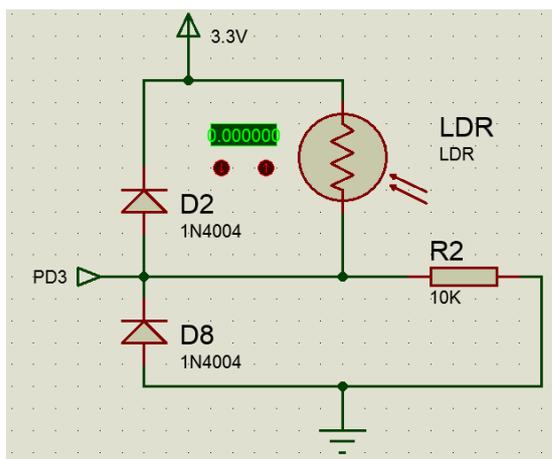


Figura 28 - Ligação do sensor de luminosidade (Autoria própria).

O acionamento dos LEDs será feito através de um circuito similar ao empregado no acionamento das resistências térmicas, mais simples devido ao fato de a potência consumida pela fita de LEDs ser bem menor, o circuito é mostrado na Figura 29.

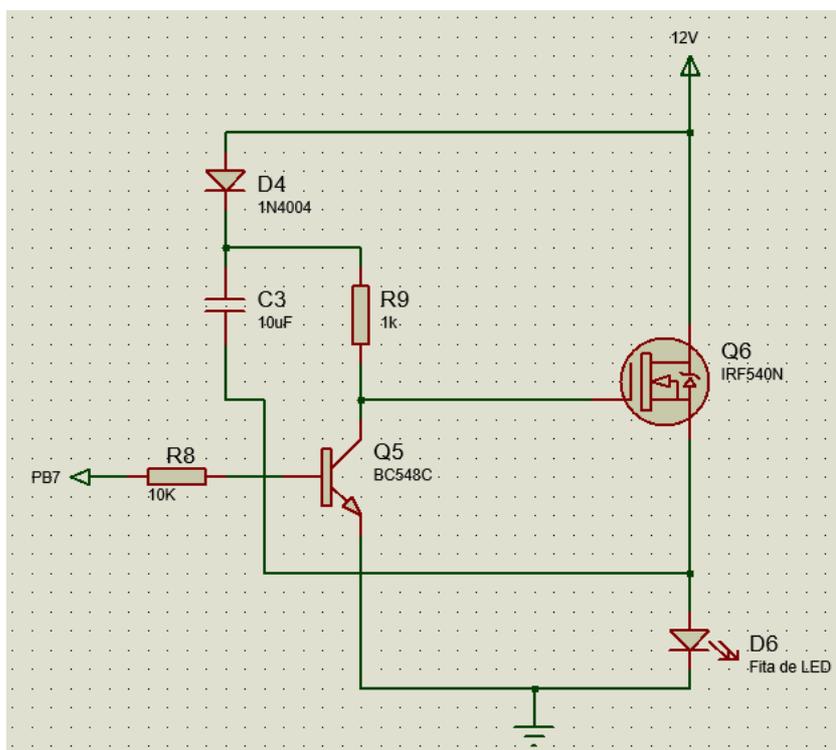


Figura 29 - Esquema de ligação do acionador dos LEDs (Autoria própria).

3.3.3 Controle da Agitação

Conforme citado anteriormente, a agitação é realizada através de um motor de passo, que é controlado pelo *LaunchPad* através de um circuito integrado de 8 transistores de potência, capazes de entregar até 500 mA em cada pino (ULN2003A), Figura 30.

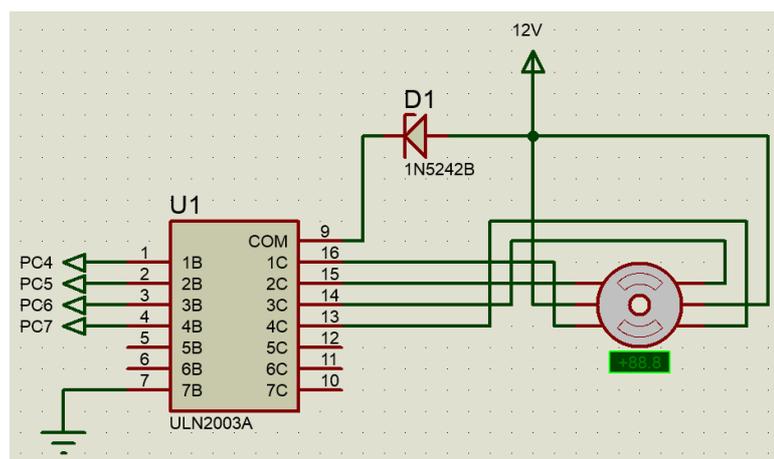


Figura 30 - Esquema de ligação do motor de passo (Autoria própria).

3.3.4 Controle da Aeração

A aeração é realizada através do compressor de ar, cujo acionamento é feito utilizando o mesmo circuito empregado no sistema de controle da luminosidade, as únicas diferenças são a tensão de trabalho do motor do compressor e a inserção de um diodo de roda livre para descarregar uma possível corrente presa na impedância do motor CC, conforme a Figura 31 abaixo.

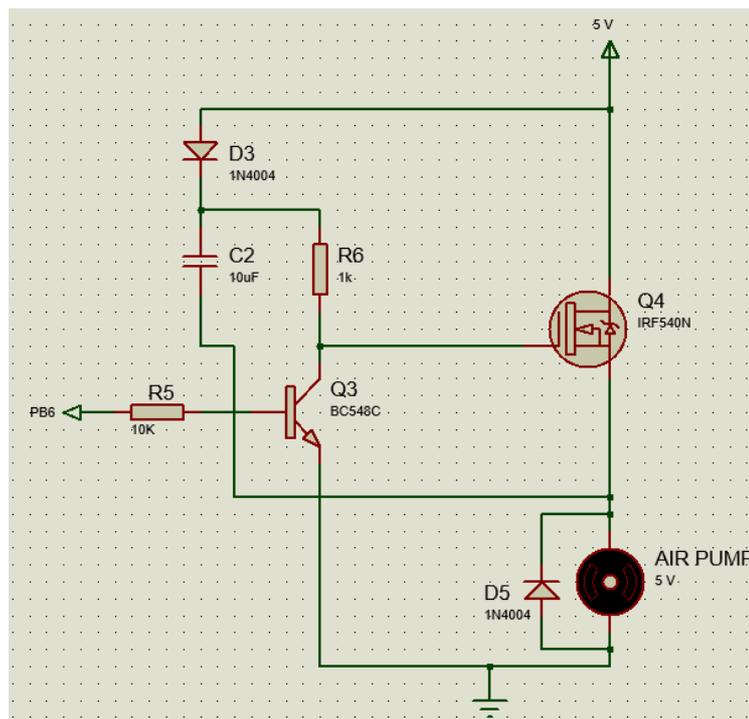


Figura 31 - Esquema de ligação do acionador do compressor de ar (Autoria própria).

Em resumo, a pinagem utilizada do microcontrolador pode ser verificada na tabela de pinos (Tabela 4) a seguir, juntamente com a função de cada pino e sua utilidade no sistema de controle.

Tabela 4 - Tabela de Pinos.

Pino	Função	Utilidade
PB5	MOPWM3	Resistências Térmicas
PB6	MOPWM0	Compressor de ar
PC4	U4RX	Motor de Passo
PC5	U4TX	Motor de Passo
PC6	U3RX	Motor de Passo
PC7	U3TX	Motor de Passo
PD3	AIN8	Sensor Luminosidade
PE1	AIN2	Sensor Temperatura
PE2	AIN1	Sensor Temperatura
PB7	MOPWM1	LEDs

Fonte: Autoria própria.

3.3.5 Alimentação

A alimentação do sistema é feita através de diversas fontes, devido à alta demanda de potência exigida pelo sistema, sendo a maioria dessa potência consumida no controle de temperatura. A alimentação do controlador é feita através da conexão pela porta USB de um computador. Os circuitos que utilizam 3,3 V são alimentados direto do próprio controlador, que possui uma saída constante de 3,3 V. Os sensores também são alimentados pelo *kit* LaunchPad, que possui uma saída constante de 5 V. A utilização dessa saída de 5 V foi feita para eliminar os ruídos provenientes de outras fontes disponíveis, a presença de ruídos na fonte de alimentação dos sensores é uma fonte de imprecisão na leitura das amostras.

Já para alimentar os atuadores são utilizadas fontes chaveadas de 5 V e 12 V. O compressor de ar é alimentado por uma fonte de 5 V capaz de fornecer até 3 A. Já o motor de passo e a fita de LEDs são alimentados por uma fonte de 12 V capaz de fornecer até 3 A. Já as resistências térmicas são alimentadas por duas fontes de 12 V em paralelo, capazes de fornecer 8 A cada.

O projeto montado pode ser visualizado na Figura 32.



Figura 32 - Projeto finalizado (Autoria própria).

3.4 PROGRAMAÇÃO DO CONTROLADOR

A programação do *kit LaunchPad* foi feita utilizando o *Code Composer Studio* (CCS) versão 6.0.0, que é a plataforma de desenvolvimento para processadores embarcados da *Texas Instruments*, principalmente para dispositivos baseados em ARM (*Advanced RISC Machine*) como o microcontrolador empregado no presente trabalho. O CCS é baseado no *framework open source Eclipse* e é uma solução completa para desenvolvimento, *debug* e *deploy* (CESTAROLLI, 2012). Outra ferramenta utilizada na programação foi o *Tiva PinMux Utility*, que é um programa que auxilia na inicialização dos pinos a serem utilizados.

A lógica utilizada para programar o controlador foi baseada em *Tasks*, que são funções que se comportam como funções principais, e que são inicializadas em um único programa *main*, dessa forma é possível monitorar e controlar todas as malhas simultaneamente. A primeira *Task* executada pelo controlador é a de interface gráfica, que irá permitir ao usuário inserir os parâmetros do cultivo de forma bastante simples e intuitiva. As outras *Tasks* ficam aguardando a permissão do usuário para serem executadas. A Figura 33 a seguir mostra um diagrama de blocos dessa lógica do programa.

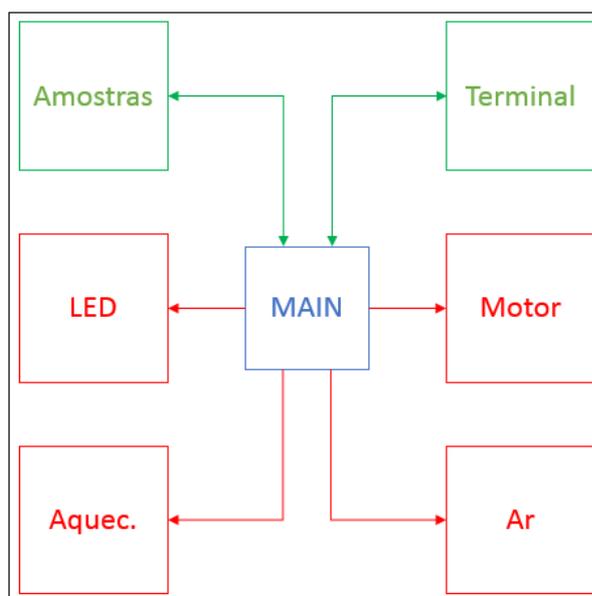


Figura 33 - Diagrama das *Tasks* do programa (Autoria própria).

Após o usuário iniciar o controle através do terminal, as outras *Tasks* recebem os valores inseridos e começam a enviar os sinais aos circuitos atuadores, que irão alimentar os

equipamentos. Além disso, para os controles em malha fechada, os valores lidos pelos sensores são enviados para as *Tasks* correspondentes para serem utilizadas nas equações dos PIDs.

3.4.1 Interface Gráfica

A inicialização do programa de controle é feita através de uma tela de comando (Figura 34), gerada através do aplicativo *Tera Term*, versão 4.83, no computador que estiver rodando o programa e alimentado o controlador. Nessa tela são pedidos os parâmetros do cultivo e, durante a execução do programa, fica a opção de atualizar qualquer uma das variáveis, além de ficarem sendo mostrados os valores atualizados das variáveis controlados.

```

X X XXXXX XXXXX XXXXX XXXXX
X X x X X X X X
X X X XXXXX XXXXX XXXXX
X X X X X X X
XXXXX X X X X X

Desenvolvimento de Controlador para Cultivo de Microalgas em Lagoas tipo Raceway.
Task do receptor de parametros iniciada corretamente
Task da iluminacao iniciada corretamente
Task da aeracao iniciada corretamente
Task da temperatura iniciada corretamente
Task do motor de passos iniciada corretamente
Task do contador de tempo iniciada corretamente
ADC inicializado T = 20000 us .
Sistema inicializado. O controlador esta executando

Favor inserir os parametros para o cultivo.
Valores inseridos:
Velocidade de agitacao: 0 rpm.
Taxa de aeracao: 0 mL/min.
Temperatura: 0 oC.
Luminosidade: 0 lx.
Intervalo de tempo para alternar entre periodo claro e escuro: 0 horas.
Pressione a tecla 'a' para alterar a velocidade de agitacao desejada.
Pressione a tecla 'e' para alterar a taxa de aeracao desejada.
Pressione a tecla 't' para alterar a temperatura desejada.
Pressione a tecla 'l' para alterar a luminosidade desejada.
Pressione a tecla 'c' para alterar o ciclo claro/escuro desejado.
Pressione a tecla 's' para visualizar o status das variaveis medidas pelos sensores.
Deseja iniciar o controle? (y)

```

Figura 34 - Tela inicial apresentada no terminal (Autoria própria).

3.4.2 Motor de Passo

A *Task* referente ao motor de passo é bastante simples, ela envia para as portas onde estão conectadas o *driver* ULN2003A do motor os valores necessários para alimentar as bobinas na sequência correta, mostrada na Figura 23. Essa sequência seria ligar inicialmente as bobinas 1 e 2, ligar as bobinas 2 e 3, ligar as bobinas 3 e 4, ligar as bobinas 4 e 1, e começar o ciclo

novamente. Entre cada pulso enviado pelo controlador, é feito um atraso, que serve para controlar a velocidade de rotação do motor.

Esse atraso é calculado em função da velocidade em RPM fornecida pelo usuário e o número de passos por volta do motor utilizado. Dessa forma, o motor irá girar na velocidade determinada pelo usuário.

3.4.3 Compressor de Ar

O valor da taxa de aeração desejada pelo usuário é enviado para a *Task* responsável por gerar o PWM que irá controlar o funcionamento do compressor de ar, sendo empregado para calcular a razão de trabalho desse pulso, utilizando a Equação (1).

3.4.4 Controle da Temperatura

O controle da temperatura é feito através de um controle PID, que recebe ambos os valores, o *setpoint* fornecido pelo usuário e o valor medido pelo LM35, e calcula qual deve ser a razão de trabalho do PWM enviado ao circuito atuador. Esse controlador PID possui, ainda, a aplicação da lógica *anti-windup* na parte integral do PID, que ativa esse termo somente quando não está saturado o atuador. Ou seja, o termo integral do PID só é atualizado quando a razão de trabalho do PWM for menor que 100%.

Esse PID possui três constantes que foram definidas de forma empírica, realizando simulações com diferentes valores e gerando a curva de resposta. Essas curvas foram analisadas para entender a resposta do sistema, e então essas constantes foram refinadas para se conseguir o melhor resultado possível. A definição das constantes será mostrada mais adiante neste trabalho.

3.4.5 Controle da Luminosidade

A lógica do controle de luminosidade é dividida em duas *Tasks*, a primeira controla o período claro e escuro, contando o tempo que os LEDs ficaram ligados e desligados. A outra parte controla o valor enviado pelo LDR, que representa a luminosidade.

O controle da luminosidade é feito, também, através de um controle PID, captando a leitura do sensor, calculando o erro do valor medido com o valor desejado pelo usuário. Esse erro é utilizado na equação do PID para determinar a porcentagem do ciclo do PWM enviado ao circuito dos LEDs, de forma análoga ao controle de temperatura. Da mesma forma que nesse último controle, foi necessária a definição das constantes, que está explicada mais detalhadamente no próximo capítulo.

4 SIMULAÇÕES E AJUSTE DO PID

Os controles das quatro variáveis foram feitos conforme detalhado anteriormente, neste capítulo serão analisados os resultados das simulações feitas, e o ajuste das constantes dos controles PID da temperatura e luminosidade. Apesar de cada controle ser dependente do outro, a exceção da luminosidade, a análise pode ser feita separadamente.

Em relação ao controle da agitação, a resposta do motor de passo utilizado para girar as pás do reator ficou dentro do esperado. Não houve perda de torque em decorrência do leito de líquido, e a velocidade se manteve constante, independe se houve variação na altura de líquido ou não, dentro do esperado para um cultivo.

Já para o controle da aeração, o aerador empregado apresentou uma variação não linear em relação à tensão de alimentação, conforme a Equação (1) mostrada anteriormente. Essa relação não se mostrou muito adequada para o tipo de controle necessário para um cultivo de microalgas. Devido ao fato de não se ter a possibilidade de variações muito sutis em determinadas faixas de valores de taxa de aeração. Isso se deve a uma deficiência do compressor de ar utilizado, e não do controle desenvolvido neste trabalho.

Esses dois controles têm influência para o controle da temperatura, portanto, todas as simulações realizadas com foco no controle da temperatura foram feitas com valores constantes para essas duas variáveis, 20 RPM de rotação e 600 mL/min de aeração. A agitação melhora a resposta do controle de temperatura, por promover distribuição do calor dissipado pelas resistências. Já a aeração tende a resfriar um pouco o meio, ao borbulhar ar frio dentro do cultivo.

4.1 CONTROLE PID

O controle de temperatura e o de luminosidade, conforme explanado anteriormente, foram desenvolvidos baseados em um controle PID. Esse tipo controle pode ser dividido em três parcelas independentes, que atuam de forma distinta no sistema: proporcional, integral e diferencial. A relação matemática que define um controle PID pode ser observada na Equação (3) a seguir.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (3)$$

Essa equação não pode ser implementada digitalmente, por ser uma equação contínua, sendo necessário, portanto, discretizar a equação. O resultado dessa discretização é a Equação (4).

$$u[k] = K_p e[k] - \frac{K_i T}{2} \{e[k] + e[k-1]\} + u[k-1] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T} \quad (4)$$

O termo proporcional reage ao erro corrente, e sua utilização confere ao sistema uma resposta mais rápida, diminui razoavelmente o erro, porém não o elimina. Já o termo integral, ou integrativo, reage ao erro passado, por isso elimina o erro, mas deixa o sistema com um tempo de resposta maior e com mais oscilatório, quando utilizado separadamente. Enquanto que o termo diferencial, ou derivativo, antecipa o erro futuro, aumentando o amortecimento e a estabilidade do sistema, e ainda diminui o *overshoot* (MORITZ, 2014).

Ainda é possível implementar o *anti-windup*, conforme mencionado anteriormente, em uma malha de controle que possua um tempo de resposta muito grande, como a malha de controle da temperatura apresentada neste trabalho. Isso impedirá que o termo integral seja atualizado enquanto o sinal de controle estiver saturado, quando a razão de trabalho do PWM for maior do que 100% neste caso, e não demora tanto para descarregar o erro acumulado neste termo. Com isso, é evitado *overshoot*, melhorada a estabilidade em regime e torna o sistema mais rápido.

Tabela 5 - Resumo das respostas dos termos do PID.

Resposta	T _s	P.O.	T _e	Erro
K _p	Diminui	Aumenta	-	Diminui
K _i	Aumenta	Diminui	Aumenta	Elimina
K _d	-	Diminui	Diminui	-

Fonte: MORITZ, 2014.

Essas informações foram utilizadas como base para ajustar as constantes dos controles PIDs utilizados no projeto. Foram realizadas diversas tentativas modificando as constantes, e analisando o gráfico da resposta em função do tempo. Essa análise levou em consideração alguns parâmetros, e foram utilizados parâmetros diferentes para cada malha de controle, por

possuírem características diferentes, além de terem diferentes importâncias para o sistema, do ponto de vista de bioprocessos.

4.1.1 Controle da Temperatura

A resposta da malha de controle da temperatura deve apresentar as seguintes características: não pode apresentar *overshoot*, ou de no máximo 10% do valor de referência; deve possuir o menor tempo de resposta possível; não deve apresentar erro de regime.

Com esses parâmetros definidos, a melhor curva de resposta conseguida foi utilizando os seguintes valores para as constantes:

$$K_p = 50$$

$$K_i = 1$$

$$K_d = 5$$

O gráfico da resposta em função do tempo obtida com esses valores de constantes é mostrado na Figura 35 a seguir.

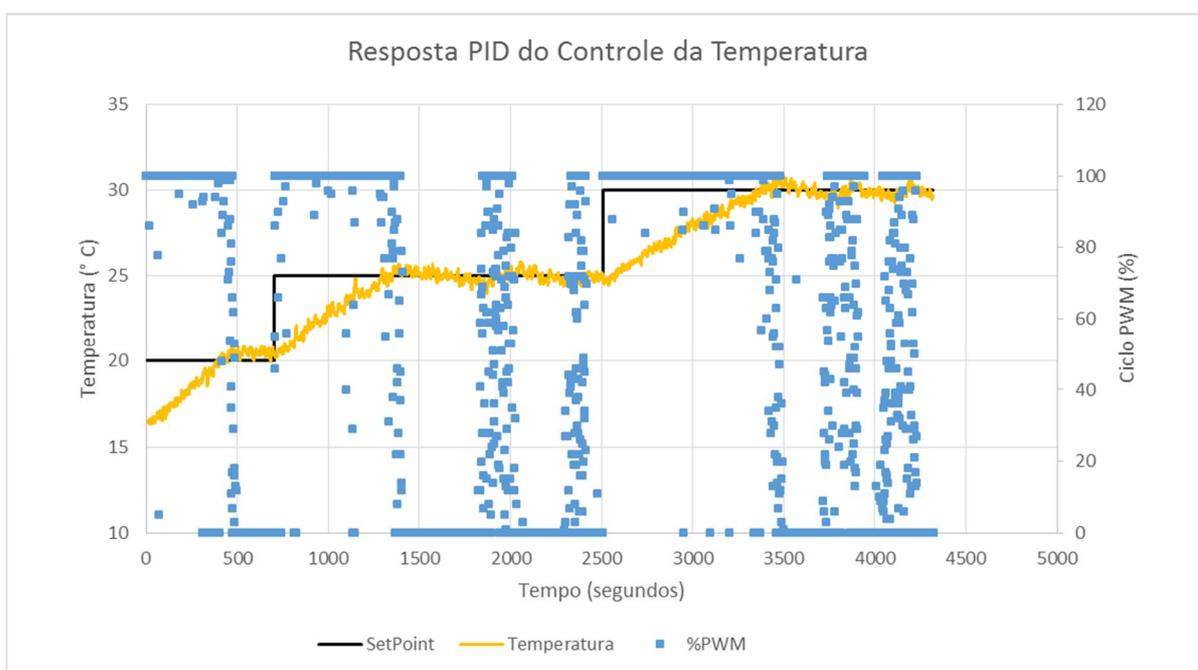


Figura 35 - Curva de resposta do controle de temperatura (Autoria própria).

O gráfico apresenta três conjuntos de dados, em preto está o *setpoint* que foi inicialmente programado para 20° C e aumentado para 25° C e posteriormente para 30° C. Em azul está a razão de trabalho enviado ao PWM, em porcentagem. E em laranja a temperatura medida pelo sensor em ° C. Os dados de temperatura foram tratados para diminuir o ruído na leitura, foi utilizada uma média móvel a cada dez amostras para suavizar a curva, além de serem eliminados os valores muito discrepantes, sendo substituídos pela média entre os valores imediatamente antes e depois.

Como é possível observar no gráfico, o tempo de resposta da malha foi bastante grande, porém, essa é uma característica do sistema escolhido. Devido às características da aplicação desejada para o reator, não é aconselhado ter um sistema de aquecimento com potência muito alta, pois as células de microalgas que entrarem em contato com a superfície aquecida poderiam morrer.

Uma possibilidade para tentar melhorar o tempo de resposta seria adicionar mais resistências térmicas no sistema, porém com isso, o consumo de energia elétrica iria aumentar, além de ser necessário a utilização de mais fontes em paralelo para fornecer corrente para essa carga a mais, pois as fontes utilizadas já estão quase sobrecarregadas.

Outro aspecto interessante mostrado no gráfico é o quase inexistente *overshoot*, sendo que o pico máximo de temperatura atingido foi de 31,5 aproximadamente. O que representa somente 5% do valor de *setpoint*. Essa característica se deve, também, à utilização do *anti-windup*, que evita o acúmulo de erro no termo integral. Após esse pico, o sistema ainda apresentou uma pequena oscilação até estabilizar no valor desejado. Isso é observado em cada rampa de subida de temperatura, sendo, portanto, uma característica do controle.

O único ponto negativo que merece ser destacado é em relação ao ruído presente no circuito e que acaba interferindo no sinal dos sensores, tanto no LM35 quanto no LDR, como poderá ser observado na sequência. As fontes desses ruídos estão relacionadas, em partes, com o chaveamento de potência e às fontes chaveadas utilizadas na alimentação. Futuramente poderiam ser implementadas algumas medidas para tentar reduzir o efeito desses ruídos, por exemplo, adicionar filtros analógicos nas malhas, implementar filtros digitais e sincronizar a aquisição de dados nas portas analógicas com o chaveamento dos PWMs, defasando a amostragem em 180° do início do ciclo.

4.1.2 Controle da Luminosidade

A resposta da malha de controle da luminosidade deve apresentar as seguintes características: pode apresentar *overshoot* de até no máximo 10% do valor de referência; deve possuir o menor tempo de resposta possível; não deve apresentar erro de regime, deve ser estável.

Essa malha de controle apresentou uma deficiência no sensor escolhido. A conversão do sinal emitido pelo LDR em um valor de luminosidade em lux não é linear, por isso não foi possível utilizar os valores em lux para o controle PID. Para contornar essa deficiência foram utilizados os valores crus lidos pela porta analógica do controlador. Ainda assim, esse sinal apresenta uma descontinuidade em sua linearidade.

Para determinação da linearidade do sensor foram feitas diversas leituras utilizando somente uma fonte de luz variável. Foi utilizada a fita de LEDs como essa fonte variável de luz, sendo que a variação foi feita através da variação da razão de trabalho do PWM, ou seja, de 0 a 100. Ficou evidente que a resposta do sensor possui duas regiões que podem ser consideradas lineares com inclinações diferentes. A primeira de 0 a 20% do ciclo do PWM (Figura 36) e a segunda de 21 a 100% (Figura 37).

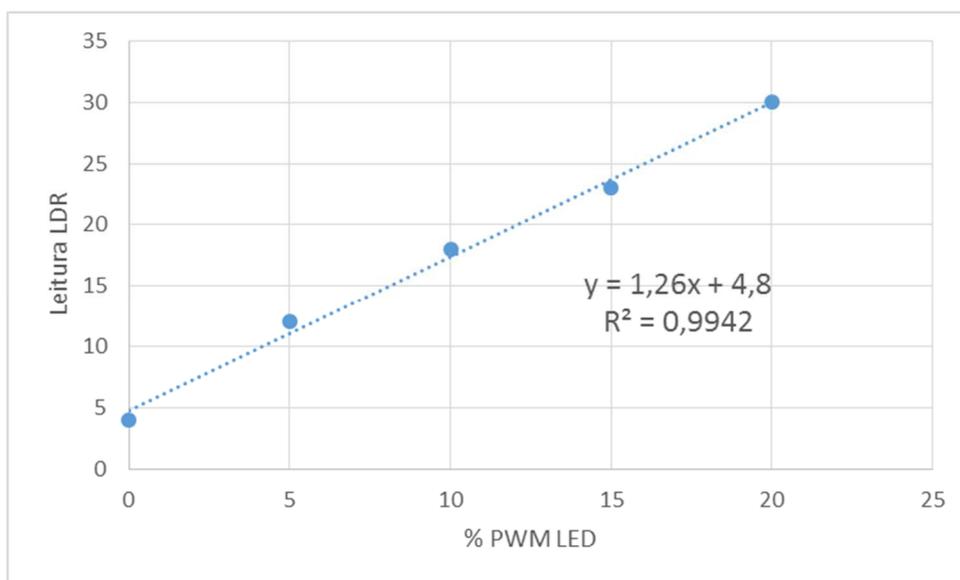


Figura 36 - Primeira região linear da resposta do LDR (Autoria própria).

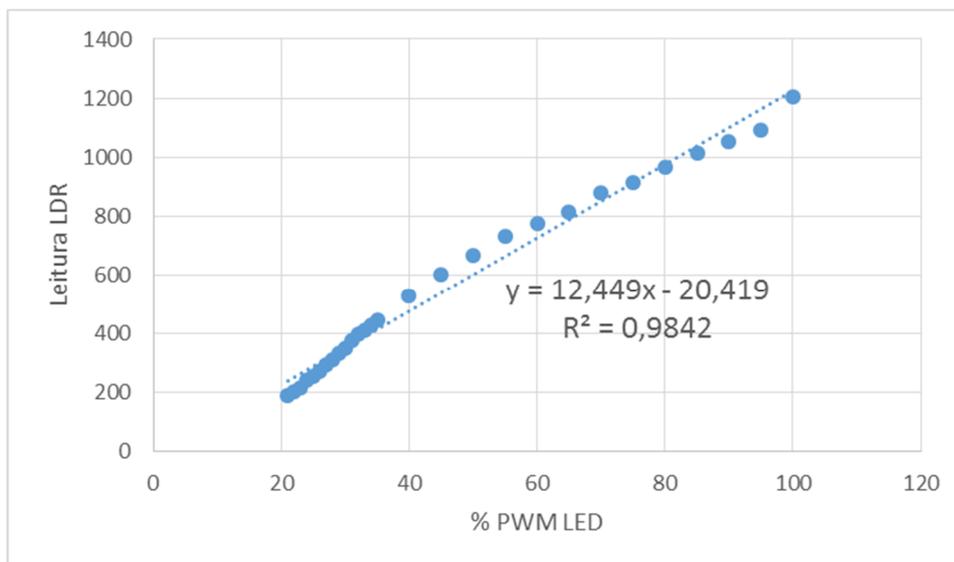


Figura 37 - Segunda região linear da resposta do LDR (Autoria própria).

Como o controle a ser feito será para iluminar o cultivo, foi escolhida a segunda região para servir como faixa de trabalho. Portanto, o controlador só poderá atuar dentro dessa faixa, apesar de que muito provavelmente ainda possa trabalhar acima dessa faixa, mas nunca abaixo, senão irá passar pela descontinuidade e irá desestabilizar e perder a convergência.

O controle será feito, então, utilizando o valor lido pela porta analógica do microcontrolador e, portanto, o valor de *setpoint* deve ser referente a essa variável, e não ao iluminamento. Para que fosse possível converter o valor lido em iluminamento, seria necessária a calibração do LDR utilizado, e caso fosse trocado o sensor, nova calibração seria necessária. Muito provavelmente resultaria em uma série de dados não lineares, porém poderia ser feita a interpolação dos valores próximos ao valor lido para determinar qual a taxa de iluminação.

Com esses parâmetros definidos, a melhor curva de resposta conseguida foi utilizando os seguintes valores para as constantes:

$$K_p = 0,08$$

$$K_i = 0,008$$

$$K_d = 0,003$$

O gráfico da resposta em função do tempo obtida com esses valores de constantes, é mostrado na Figura 38 a seguir.

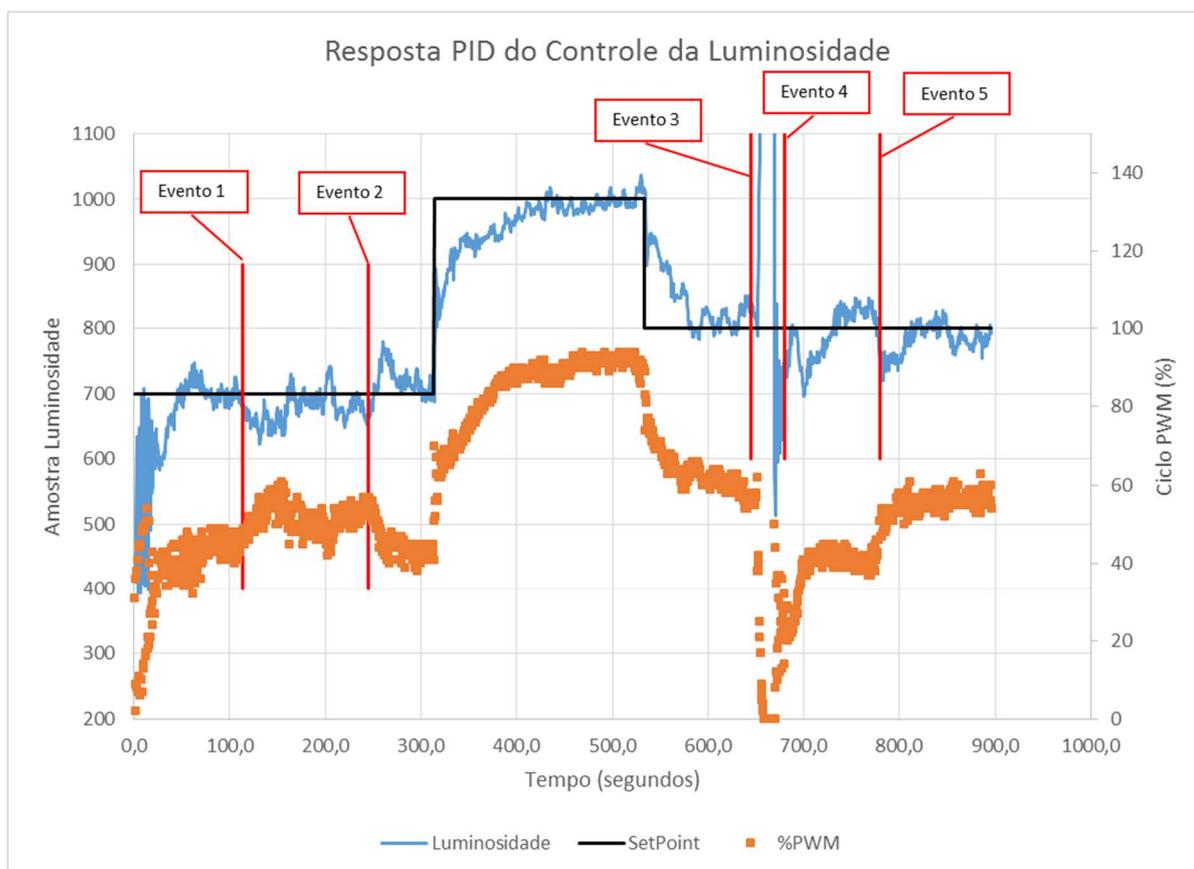


Figura 38 - Curva de resposta do controle de luminosidade (Autoria própria).

A resposta do controle da luminosidade é bem mais rápida que a do controle de temperatura. Porém, conforme pode-se observar no gráfico, é uma resposta que oscila mais, mesmo em regime. Apesar de não ser o ideal, essa característica do controle não é prejudicial ao cultivo, pois as microalgas não sofrem com uma variação tão pequena na luminosidade. Caso fosse uma variação maior, as células poderiam ficar estressadas e perder produtividade.

O experimento que gerou os dados apresentados neste gráfico foi realizado da seguinte forma. Inicialmente foi configurado como *setpoint* o valor de 700 para a leitura do LDR e aguardou-se a estabilização da malha de controle. Neste momento foi inserida uma perturbação, foi apagada uma fonte de luz externa (Evento 1), o que resultou em uma resposta do sistema. Após a nova estabilização, foi retornado ao estado anterior, ligando novamente a luz (Evento 2), o que gerou nova resposta do sistema, que voltou a estabilizar.

Na sequência foi alterado o valor de entrada para 1000, fazendo o sistema responder e se adequar ao desejado. Em seguida foi reduzido o *setpoint* para 800, e após a estabilização foi feita nova perturbação, dessa vez foi adicionada uma outra fonte de luz (Evento 3), que ultrapassava o valor desejado, fazendo o sistema desligar as fitas de LEDs a fim de tentar manter a luminosidade desejada. Essa fonte de luz foi afastada um pouco (Evento 4) para que o sistema

tivesse que ligar os LEDs, e em seguida foi retirada completamente (Evento 5), gerando a resposta do sistema que estabilizou a leitura do LDR em torno dos 800.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a finalização do projeto proposto, restam somente algumas considerações finais, em relação a alguns tópicos específicos, como o escalonamento do sistema, os aspectos que ainda podem ser melhorados e as conclusões obtidas do trabalho como um todo.

5.1 ESCALONAMENTO

O projeto para o escalonamento desse sistema como um todo, desde o reator em si até a programação do controlador é bastante simples, porém com um valor bastante elevado, mas que pode ser viável dependendo da produtividade e do produto que será produzido.

O reator pode ser construído em diversos tipos de material (terra, plástico, concreto, entre outras opções). As pás giratórias podem ser feitas em alumínio, enquanto que o motor de passo pode ser trocado por um motor CA. Essa alteração no tipo do motor irá acarretar em uma alteração no projeto do circuito de acionamento, adicionando um sensor para acompanhar a rotação das pás, fechando a malha de controle. Com isso, seriam necessárias, também, alterações na programação do controlador.

O sistema de controle da temperatura pode ser melhorado, tornando-se mais complexo e versátil, utilizando serpentinas embutidas nas paredes e/ou no fundo do reator para a passagem de fluídos de troca térmica tanto para aquecer quanto para resfriar o meio de cultivo, dependendo da necessidade. Da mesma forma que o sistema de agitação, será necessária uma alteração no circuito de acionamento e na programação do controlador para atuar sobre a variável temperatura.

Já o sistema de controle da luminosidade pode ser feito de diferentes formas, dependendo de como e onde está instalado o reator. Uma das possibilidades, caso o reator esteja em algum tipo de estufa externa, é criar um sistema de cobertura móvel, de preferência que tenha pequenos módulos independentes que fechem somente uma fração da área total do teto da estufa, permitindo assim um controle mais refinado da entrada de luz natural. Além disso, ainda é necessária a instalação de uma fonte de luz artificial que será acionada em dias com pouca incidência da luz solar. Outra possibilidade é a instalação do reator em um local fechado, onde toda a iluminação seja artificial e acionada pelo controlador, em um sistema

bastante similar ao utilizado no presente trabalho. Outra opção, mais barata, porém menos eficaz, seria a instalação do reator aberto, sem qualquer proteção contra a luz solar, somente com a instalação de algum tipo de luz artificial para ser acionada em dias de pouca luz natural.

A parte que menos sofreria modificações seria a aeração, só seria necessária uma maior vazão de ar, ou seja, um compressor com maior capacidade, mantendo a mesma lógica na programação e o mesmo circuito acionador, caso o novo compressor funcione também em corrente contínua.

Vale ressaltar ainda, que qualquer modificação no sistema requer novo ajuste das constantes dos controles PIDs.

5.2 MELHORIAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho foi focado em desenvolver um protótipo de um controlador para cultivos de microalgas em reatores do tipo *raceway*. Havia a intenção inicial de se desenvolver um protótipo completo e que trabalhasse de forma independente, sem a necessidade de estar conectado a outro dispositivo, como um computador. Porém, para simplificar o protótipo, a parte de interface entre o controlador e o usuário foi modificada. Passou-se a utilizar um computador para realizar a comunicação entre o usuário e o controlador, através de um terminal de comando.

Este aspecto do protótipo é uma das possíveis melhorias a serem feitas, e possui diferentes soluções. Pode ser implementado um sistema como o inicialmente pensado para esse trabalho, um teclado matricial juntamente com um display de LCD. Outra opção é utilizar a tecnologia de conectividade *bluetooth*, conectando um dispositivo que possua esse tipo de tecnologia com o controlador. Essa é a solução mais moderna e necessitaria o desenvolvimento de um aplicativo para ser instalado no dispositivo móvel que permita essa comunicação de forma clara e intuitiva.

Outra funcionalidade a ser estudada seria o armazenamento dos dados amostrados pelos sensores e plotagem em um gráfico, para o melhor acompanhamento do cultivo. Esses dados armazenados serviriam para realizar a análise do cultivo, juntamente com outras curvas, de crescimento e de produção do composto de interesse, por exemplo.

Seria interessante, também, realizar a calibração dos sensores utilizados. No presente trabalho foram utilizados dados de terceiros para transformar o sinal emitido pelos sensores nos

valores correspondentes. No caso do LM35 a fonte dessa relação é o próprio fabricante do componente, mas ainda assim é possível que haja algum tipo de variação com a real temperatura. Já para o LDR, a relação foi obtida de um artigo, acreditando que a equação conseguida pelo autor represente a relação correta, mas sem nenhuma confirmação. Que apresentou uma característica não linear o que a tornou inadequada para um controle PID.

Outra função que pode ser ainda melhorada é o controle dos ciclos claro e escuro. No presente trabalho foi implementada uma função bastante simples, que não leva em consideração o horário do dia no qual se inicia o cultivo. Poderia ser implementado um relógio em tempo real (RTC, do inglês *Real Time Clock*), que iria, então, controlar os ciclos de acordo com o desejado pelo usuário, que iria inserir um horário fixo para começar o ciclo claro e outro horário para iniciar o ciclo escuro.

5.3 CONCLUSÕES

Durante a elaboração desse trabalho de conclusão de curso, foi possível realizar todo o levantamento teórico que foi necessário para finalizar cada aspecto do estudo e desenvolver o controlador.

Foram encontradas diversas dificuldades durante o decorrer do projeto, como a escolha de como seria a atuação do controlador no sistema, principalmente em encontrar uma resistência térmica que fornecesse potência suficiente em 12 V. Outro ponto de dificuldade foi durante a programação, mais especificamente em conhecer as bibliotecas de funções disponíveis para o *kit LaunchPad* e saber utilizar essas funções.

No geral, o trabalho foi bem sucedido e todos os objetivos foram alcançados. O protótipo desenvolvido ficou bem completo, e apresentou um desempenho bastante satisfatório. Ainda carece de algumas poucas melhorias para se transformar em um produto com aplicação em pesquisas sobre cultivo de microalgas, não pela sua funcionalidade, mas pelo fato de não permitir a gravação dos dados dos cultivos, e não possuir uma interface que permita a plotagem dos dados em tempo real.

6 REFERÊNCIAS

ALFARONE, R.M., **Persiana residencial automatizada utilizando sensor de luminosidade**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário de Brasília, 2010.

BAUTZER, Tatiana, Alltech Aposta nas Algas. **Dinheiro Rural**. São Paulo, n. 081, p. 86-87, Julho 2011.

BECKER, W. **Microalgae in human and animal nutrition**. Richmond, A. (Ed). *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. London: Blackwell Science, 566p. 2004.

BRITES, F.; SANTOS, V. P. D. A. **Motor de Passo**, PETele, Niterói, 2008. Disponível em <http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf> Acesso em 14/07/2014.

CESTAROLLI, A. V. **Simulação de Fotoperíodo através da Modulação da Intensidade Luminosa de LEDs por Microcontrolado MSP430 Operado via Comunicação sem fio Bluetooth**. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

CHAVARETTE, F. B., **Introdução aos Sistemas de Controle**. Disponível em <http://www.rc.unesp.br/igce/demac/balthazar/controle/SistemasControle.pdf> Acessado em 15/07/2013.

CHISTI, Y. **Biodiesel from microalgae**. *Biotechnology Advances* v. 25, p. 294-306, 2007.

COELHO, J.P., **Sensores e Actuadores: Material de Apoio às Aulas**. Instituto Politécnico de Bragança. 2005.

COELHO, M.S., **Técnicas de Medição de Temperatura**. Material de Apoio às Aulas. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

COSTA, J. A. V., **Produção de Microalgas a Partir de CO₂ Gerado em Termelétrica**. In: IV Congresso Internacional de Bioenergia, 2009, Curitiba. Disponível em <http://www.porthuseventos.com.br/site/eventos/2009/eventobioenergia.com.br/congresso/br/palestras/JorgeAlbertoVieiraCosta.pdf> Acessado em 26/07/2013.

DEMIRBAS, A., **Production of Biodiesel from Algae Oils**. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31:2, 163-168, 2009.

DERNER, R.B.; OHSE S.; VILLELA, M; CARVALHO, S.M.; FETT, R. **Microalgas, produtos e aplicações**. 2010.

FERRAZ, C. A. M. **Produção de *Spirulina máxima*: Influência de ecofatores e uso de um sub produto da indústria alcooeira**. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências Farmacêutica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 223p .1986.

GOMES, R. **Microalgas, Aplicações e Futuro**. Seminário Energia dos Oceanos, 2008.

GUIMARÃES, J., AMARAL, R., SANTOS, M.F., SANTOS, L.M.A., **Colheita, identificação e conservação de microalgas**. ACOI, Algoteca do Departamento de Botânica Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 88p. 2009.

HABIB, M.A.; PARVIN, M. **A review on culture, production and use of *Spirulina* as food for human and feed for domestic animals and fish**. Bangladesh, 2008.

HENRIKSON, R., **Earth food *Spirulina***. California: Ronore Enterprises. 180p. 1989.

JAMES, S. C.; BORIAH V. **Modeling algae growth in an open-channel raceway**. Journal os Computational Biology, 2010.

JIMENEZ, C.; COSSIO, B.R.; LABELLA, D.; NIELLA, F.X. **The Feasibility of industrial production of *Spirulina* (Arthrospira) in Southern Spain**. Nueva Andalucia, Marbella, Spain. 2002.

JOHNSON, M. B; WEN, Z. **Production of Biodiesel Fuel from the Microalga *Schizochytrium limacinum* by Direct Transesterification of Algal Biomass**. Energy Fuels n. 23. American Chemical Society, p.5179-5183, 2009.

KHAN, et al. **Protective effect of *Spirulina* against doxorubicin-induced cardiotoxicity**. Phytother. Res., 19(12): 1030-1037, 2005.

KÖHLER, J.C.G; OLIVEIRA, **Estufa microcontrolada para testes**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.

LEE, R.E. **Phycology**. Cambridge University Press, Fourth Edition, 2008.

LEITE, B. H. F. C., *et al.*, **Estudo do Motor de Passo e seu Controle Digital**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003. Disponível em http://www.gta.ufrj.br/grad/01_1/motor/ Acesso em 07/02/2014.

LIMA, E. e MASINI, J. **Instituto de Química**. Universidade de São Paulo, São Paulo 1999.

LU, Y.; XIANG, W.; WEN, Y. ***Spirulina (Arthrospira) industry in Inner Mongolia of China: current status and prospects.*** 2010.

MARTINS, G.M., **Automação Industrial.** Apostila: Notas de Aula. Universidade Federal de Santa Maria. 2008.

MARTINS, N.A, **Sistemas Microcontrolados:** Uma Abordagem com o Microcontrolador PIC 16F84. Novatec Editora, 2008.

MICHEL, J. P. **Manual de metodologias y Alternativas para el Cultivo de Microalgas.** Ensenada, Baja California, Mexico, 1986.

MORITZ, G. L. **Controladores PID.** Notas de aula, UTFPR, 2014. Disponível em http://paginapessoal.utfpr.edu.br/moritz/et7gi-topicos-especiais-em-controle/aulas/05_ControladoresPID.pdf Acesso em 09/07/2014.

NEOYAMA, **Motor de Passo – Datasheet.** s.d.

NISE, M. S., **Control System Engineering,** 6 ed. John Wiley and Sons Inc. 2010.

OLIVEIRA, O.S.B.C. **Optimização da produtividade lipídica da microalga *Arthrospira platensis* como matéria-prima para biocombustíveis.** Dissertação. Universidade Nova de Lisboa, 2009.

PARENTE, E., **Termistores: NTC.** Notas de aulas, UFPR, 2000. Disponível em <http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/brenno/index.html> Acesso em 15/05/2014.

PATSKO, L.F., **Tutorial Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores.** Treinamento Maxwell Bohr – Instrumentação Eletrônica. 2006.

PINTO, L. A. V., **Sistemas de Controle,** 2000. Disponível em <http://www.vargasp.net/download/livros/instrumentac.pdf> Acessado em 15/07/2013.

PULZ, O. **Photobioreactors: production systems of phototrophic microorganisms.** *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 57: 287-293. 2001.

QUEIROZ, R. A. A., **Motores de Passo.** Universidade Salvador – UNIFACS. 2002. Disponível em http://www.zaplocadora.com.br/upload/produtos/arquivos/motor_20139910138.pdf Acesso em 07/03/2014.

QUEVEDO, C., **Princípios de Controle:** Notas de aulas. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

RAVEN, J.A., **Sensing pH?** *Plant, Cell and Environment*, 13: 721-729. 1990.

REHM, H.J., REED, G., **Enzimes, biomass, food and feed**. Biotechnology Multi Volume Comprehensive Treatise, 9: 170-215. 1995.

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

SELL, R.; LEINI, M. **Photoresistor**. s.d. Disponível em <http://home.roboticlab.eu/en/examples/sensor/photoresistor> Acesso em 3/07/2014.

SILVA, L. A. **Estudo do processo biotecnológico de produção, extração e recuperação do pigmento ficocianina da *Spirulina platensis***. Universidade Federal do Paraná, 2008.

TEDESCO, C. **Remoção de cromo VI pela microalga *Spirulina platensis***. Passo Fundo, 2010.

TEXAS INSTRUMENTS, **Tiva C Series TM4C123G LaunchPad Evaluation Board**. 2013. Disponível em <http://www.ti.com/lit/ug/spmu296/spmu296.pdf> Acesso em 9/03/2014.

THOMAZINI, D., **Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações**. 1ª Ed. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2005.

TIAGO, A. M. A. F., **Tanques de Microalgas**. 2013. Disponível em <http://biodieseldemicroalgas.wordpress.com/2013/03/11/tanques-de-microalgas/> Acessado em 26/07/2013.

VONSHAK, A. ***Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology***. Taylor & Francis e-Library, 233 pp. 2002.

WENDING, M. **Sensores**. Apostila: Notas de Aula. Universidade Estadual Paulista, campus Guaratinguetá, 2010.

ZARDO, I. **Análise de viabilidade econômica da produção de biodiesel a partir de microalgas**. Trabalho de Diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

ANEXO 1

Segue o código das *Tasks* escrito em linguagem C, através do CCS. O código completo, com mais comentários, está disponível juntamente com a cópia digital entregue.

- *Task* de amostragem de dados nas portas analógicas:

```
extern xQueueHandle g_pSampleQueue;
extern xQueueHandle g_pSampleQueue2;

uint32_t ui32Value[8];
uint32_t amostra_temperatura_media;
uint32_t amostra_temperatura1;
uint32_t amostra_luminosidade;
uint32_t amostra_temperatura2;

void ADCConversionDone() {

    uint32_t samples;

    portBASE_TYPE xHigherPriorityTaskWoken;
    portBASE_TYPE xHigherPriorityTaskWoken2;
    ADCIntClear(ADC0_BASE, 0);
    GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_3, 0xFF);
    xHigherPriorityTaskWoken = pdFALSE;
    samples = ADCSequenceDataGet(ADC0_BASE, 0, ui32Value);
    amostra_temperatura1 = ((3300*ui32Value[0]/4095)*100);
    amostra_temperatura2 = ((3300*ui32Value[1]/4095)*100);
    amostra_luminosidade = ui32Value[2];
    amostra_temperatura_media = (amostra_temperatura1+amostra_temperatura2)/2;

    xQueueSendToBackFromISR(g_pSampleQueue,
        (void*)&amostra_temperatura_media,&xHigherPriorityTaskWoken);
    xQueueSendToBackFromISR(g_pSampleQueue2,
        (void*)&amostra_luminosidade,&xHigherPriorityTaskWoken2);

    GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_3, 0x00);
    portEND_SWITCHING_ISR(xHigherPriorityTaskWoken ||
xHigherPriorityTaskWoken2);
}

uint32_t ADCInit(uint32_t SamplePeriod_uS)
{
    // Habilita o TIMER2
    ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_TIMER2);
    // Habilita o ADC0
    ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_ADC0);
    //configura o TIMER2 para servir de Trigger para o AD0
    TimerConfigure(TIMER2_BASE, (TIMER_CFG_A_PERIODIC));
}
```

```

// Set the count time for the the periodic trigger timer (TimerA).
float Timer2Frequency = 1000000.0 / SamplePeriod_uS;
TimerLoadSet(TIMER2_BASE, TIMER_A,
              (int32_t) (configCPU_CLOCK_HZ / Timer2Frequency));
// Configura o timer para trigggar o ADC
TimerControlTrigger(TIMER2_BASE, TIMER_A, true);
ADCSequenceConfigure(ADC0_BASE, 0, ADC_TRIGGER_TIMER, 0);
ADCSequenceStepConfigure(ADC0_BASE, 0, 0, ADC_CTL_CH1 );
ADCSequenceStepConfigure(ADC0_BASE, 0, 1, ADC_CTL_CH2 );
ADCSequenceStepConfigure(ADC0_BASE, 0, 2, ADC_CTL_IE | ADC_CTL_CH4 |
ADC_CTL_END );
//configura a interrupção do ADC
ADCIntClear(ADC0_BASE, 0);
ADCIntRegister(ADC0_BASE, 0, &ADCCConversionDone);
ROM_IntPrioritySet (INT_ADC0SS0, configMAX_SYSCALL_INTERRUPT_PRIORITY);
ADCIntEnable(ADC0_BASE, 0);
ADCSequenceEnable(ADC0_BASE, 0);
// Habilita o timer de trigger - Inicia o processo de amostragem
TimerEnable(TIMER2_BASE, TIMER_A);

return(0);
}

```

- *Task* para controlar o período claro/escuro:

```

extern uint32_t inicia_controlador;
extern uint32_t ciclo_claro_escuro;
extern uint32_t luminosidade;
uint32_t led;

void PeriodoTask(void *pvParameters)
{
    uint32_t tempo;
    led = luminosidade;

    while(1)
    {
        if(inicia_controlador == 1)
        {
            led = luminosidade;
            if (led != 0)
            {
                tempo = 0;
                while(tempo < ciclo_claro_escuro)
                {
                    vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ *5); //Aguarda 5 s
                    tempo = tempo + 5;
                }
                led = 0;
                vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ /3); //Aguarda 0,333 s
            }
            if (led == 0)

```

```

        {
            tempo = 0;
            while(tempo < ciclo_claro_escuro)
            {
                vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ *5); //Aguarda 5 s
                tempo = tempo + 5;
            }
            led = luminosidade;
            vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ /3); //Aguarda 0,333 s
        }
    }
}

int32_t PeríodoInit()
{
    ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_GPIOC);
    GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTC_BASE,GPIO_PIN_4 | GPIO_PIN_5 | GPIO_PIN_6
| GPIO_PIN_7);
    if (xTaskCreate(PeríodoTask, (signed portCHAR *)"STEPPER",
configMINIMAL_STACK_SIZE, NULL, tskIDLE_PRIORITY + PRIORITY_LED_TASK - 1, NULL)
!= pdTRUE)
    {
        UARTprintf("\nFalha ao iniciar a task do contador de tempo\n");
        return (1);
    }
    else
    {
        UARTprintf("\nTask do contador de tempo iniciada corretamente");
        return (0);
    }
}

```

- *Task* do controle de luminosidade:

```

xQueueHandle g_pSampleQueue2 = NULL;

#define SAMPLE_QUEUE2_SIZE (5)
#define SAMPLE_ITEM2_SIZE (sizeof(int32_t))

extern uint32_t inicia_controlador;
extern uint32_t g_T;
extern uint32_t luminosidade;
extern uint32_t led;
int32_t gFrequencyLED_Hz;
float tensao_LED;
int32_t cycle;

void PWM_LED_Task(void *pvParameters)
{
    int32_t RAWValue;
    int32_t errok=0;
    float kp=0.08;

```

```

float ki=0.008;
float kd=0.003;
float uk;
float uk1 = 0;
float uki;
float uki1 = 0;
float ukp;
float ukd;
float errok1 = 0;
float T = g_T*10e-6;

while(1)
{
    if(inicia_controlador == 1)
    {
        if(led != 0)
        {
            if (xQueueReceive(g_pSampleQueue2, (void*)&RAWValue,
portMAX_DELAY ) == pdTRUE)
            {
                errok = (luminosidade - RAWValue);
                ukp = kp*errok;
                uki= (ki *T /2) * (errok + errok1) + uki1;
                ukd = (kd/T) * (errok - errok1);
                uk = ukp + ukd + uki;
                tensao_LED = uk;

                SetPWM_LED_Cycle((int32_t) tensao_LED);

                uki1 = uki;
                errok1 = errok;

            }
        }
        else
        {
            tensao_LED = 0;
            SetPWM_LED_Cycle((int32_t)tensao_LED);
        }
    }
    else
    {
        SetPWM_LED_Cycle(0);
        vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ /3); //Aguarda 0,333 s
    }
}
}

int32_t SetPWM_LED_Cycle(int32_t cycle)
{
    int32_t PWMmax = configCPU_CLOCK_HZ / gFrequencyLED_Hz;
    cycle = PWMmax*cycle/100.0;
    if(cycle >= PWMmax)
    {
        cycle = PWMmax - 1;
    }
    if (cycle <= 0)
    {

```

```

        cycle = 1;
    }

    PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_1, PWMmax - cycle);
}

int32_t PWM_LED_Init(int32_t FrequencyLED_Hz)
{
    g_pSampleQueue2 = xQueueCreate(SAMPLE_QUEUE2_SIZE, SAMPLE_ITEM2_SIZE);

    gFrequencyLED_Hz = FrequencyLED_Hz;
    // Enable the GPIO Peripheral used by PWM0
    ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_GPIOB);
    // Configure GPIO Pins for PWM0
    ROM_GPIOPinConfigure (GPIO_PB7_M0PWM1);
    ROM_GPIOPinTypePWM (GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_7);
    //Habilita o PWM0
    ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_PWM0);
    // Configure the PWM generator for count down mode with immediate updates
    // to the parameters.
    PWMGenConfigure(PWM0_BASE, PWM_GEN_0,
                    PWM_GEN_MODE_DOWN | PWM_GEN_MODE_NO_SYNC |
                    PWM_GEN_MODE_DBG_RUN);
    PWMGenPeriodSet(PWM0_BASE, PWM_GEN_0, configCPU_CLOCK_HZ /
                    FrequencyLED_Hz);
    // Set the pulse width of PWM0 for a 0% duty cycle.
    PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_1, 0);
    // Start the timers in generator 0.
    PWMGenEnable(PWM0_BASE, PWM_GEN_0);
    // Enable the outputs.
    PWMOutputState(PWM0_BASE, (PWM_OUT_1_BIT), true);

    if (xTaskCreate(PWM_LED_Task, (signed portCHAR *)"PWM_LED",
        CONTROLLER_LED_STACK, NULL, tskIDLE_PRIORITY + PRIORITY_LED_TASK - 1, NULL)
        != pdTRUE)
    {
        UARTprintf("\nFalha ao iniciar a task da iluminacao\n");
        return (1);
    }
    else
    {
        UARTprintf("\nTask da iluminacao iniciada corretamente");
        return (0);
    }
}

```

- *Task* do controle da aeração:

```

extern uint32_t inicia_controlador;
extern uint32_t aeracao;

```

```

int32_t gFrequencyCompressor_Hz;
float tensao_compressor;
int32_t cycle;

void PWM_Compressor_Task(void *pvParameters)
{
    while(1)
    {
        if(inicia_controlador == 1)
        {
            if(aeracao != 0)
            {
                tensao_compressor = 20*(0.4231*exp(0.002331*aeracao));
            }
            else
            {
                tensao_compressor = 0;
            }
            SetPWM_Compressor_Cycle((int32_t)tensao_compressor);
            vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ /3); //Aguarda 0,333 s
        }
        else
        {
            SetPWM_Compressor_Cycle(0);
            vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ /3); //Aguarda 0,333 s
        }
    }
}

int32_t SetPWM_Compressor_Cycle(int32_t cycle)
{
    int32_t PWMmax = configCPU_CLOCK_HZ / gFrequencyCompressor_Hz;
    cycle = PWMmax*cycle/100.0;
    if(cycle >= PWMmax)
    {
        cycle = PWMmax - 1;
    }
    if (cycle <= 0)
    {
        cycle = 1;
    }

    PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_0, PWMmax - cycle);
}

int32_t PWM_Compressor_Init(int32_t FrequencyCompressor_Hz)
{
    gFrequencyCompressor_Hz = FrequencyCompressor_Hz;
    // Enable the GPIO Peripheral used by PWM0
    ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_GPIOB);
    // Configure GPIO Pins for PWM0
    ROM_GPIOPinConfigure (GPIO_PB6_M0PWM0);
    ROM_GPIOPinTypePWM (GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_6);
    //Habilita o PWM0
    ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_PWM0);
    // Configure the PWM generator for count down mode with immediate updates

```

```

    // to the parameters.
    PWMGenConfigure(PWM0_BASE, PWM_GEN_0,
                   PWM_GEN_MODE_DOWN | PWM_GEN_MODE_NO_SYNC |
PWM_GEN_MODE_DBG_RUN);
    PWMGenPeriodSet(PWM0_BASE, PWM_GEN_0, configCPU_CLOCK_HZ /
FrequencyCompressor_Hz);
    // Set the pulse width of PWM0 for a 0% duty cycle.
    PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_0, 0);
    // Start the timers in generator 0.
    PWMGenEnable(PWM0_BASE, PWM_GEN_0);
    // Enable the outputs.
    PWMOutputState(PWM0_BASE, (PWM_OUT_0_BIT), true);

    if (xTaskCreate(PWM_Compressor_Task, (signed portCHAR *)"PWM_Compressor",
configMINIMAL_STACK_SIZE, NULL, tskIDLE_PRIORITY + PRIORITY_LED_TASK - 1, NULL)
!= pdTRUE)
    {
        UARTprintf("\nFalha ao iniciar a task da aeracao\n");
        return (1);
    }
    else
    {
        UARTprintf("\nTask da aeracao iniciada corretamente");
        return (0);
    }
}

```

- *Task* do controle da temperatura:

```

xQueueHandle g_pSampleQueue = NULL;

#define SAMPLE_QUEUE_SIZE    (5)
#define SAMPLE_ITEM_SIZE    (sizeof(int32_t*))

extern uint32_t inicia_controlador;
extern uint32_t g_T;
extern uint32_t temperatura;
int32_t gFrequencyRaboQuente_Hz;
float tensao_RaboQuente;
uint32_t cycle;

void PWM_RaboQuente_Task(void *pvParameters)
{
    int32_t RAWValue;
    float errok=0;
    float kp=50;
    float ki=1;
    float kd=5;
    float uk;
    float uki;
    float UKI;
    float uki1 = 0;
    float ukp;
    float ukd;
    float errok1 = 0;

```

```

float T = g_T*10e-6;
float Tensao_RaboQuente;

while(1)
{
    if(inicia_controlador == 1)
    {
        if(temperatura != 0)
        {
            if (xQueueReceive(g_pSampleQueue, (void*)&RAWValue,
portMAX_DELAY ) == pdTRUE)
            {
                errok = (temperatura*1000.0 - RAWValue);
                ukp = kp*errok/1000;
                uki = (ki *T /2) * (errok/1000 + errok1/1000) +
uki1;

                UKI = (ki *T /2) * (errok/1000 + errok1/1000);
                ukd = (kd/T) * (errok/1000 - errok1/1000);
                uk = ukp + ukd + uki;
                Tensao_RaboQuente = uk;

                SetPWM_RaboQuente_Cycle((int32_t)
Tensao_RaboQuente);

                if(Tensao_RaboQuente >= 100)
                {
                    uki1 = uki - UKI;
                }
                else
                {
                    uki1 = uki;
                }

                errok1 = errok;
            }
        }
        else
        {
            SetPWM_RaboQuente_Cycle(0);
            vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ/3); //Aguarda 0,333 s
        }
    }
    else
    {
        SetPWM_RaboQuente_Cycle(0);
        vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ/3); //Aguarda 0,333 s
    }
}

void SetPWM_RaboQuente_Cycle(int32_t cycle)
{
    int32_t PWMmax = configCPU_CLOCK_HZ / gFrequencyRaboQuente_Hz;
    cycle = PWMmax*cycle/100;
    if(cycle >= PWMmax)
    {

```

```

        cycle = PWMmax - 1;
    }
    if (cycle <= 0)
    {
        cycle = 1;
    }

    PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_3, PWMmax - cycle);
}

int32_t PWM_RaboQuente_Init(int32_t FrequencyRaboQuente_Hz)
{
    g_pSampleQueue = xQueueCreate(SAMPLE_QUEUE_SIZE, SAMPLE_ITEM_SIZE);
    gFrequencyRaboQuente_Hz = FrequencyRaboQuente_Hz;
    // Enable the GPIO Peripheral used by PWM0
    ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_GPIOB);
    // Configure GPIO Pins for PWM0
    ROM_GPIOPinConfigure (GPIO_PB5_M0PWM3);
    ROM_GPIOPinTypePWM (GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_5);
    //Habilita o PWM0
    ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_PWM0);
    // Configure the PWM generator for count down mode with immediate updates
    // to the parameters.
    PWMGenConfigure(PWM0_BASE, PWM_GEN_1,
                    PWM_GEN_MODE_DOWN | PWM_GEN_MODE_NO_SYNC |
PWM_GEN_MODE_DBG_RUN);
    PWMGenPeriodSet(PWM0_BASE, PWM_GEN_1, configCPU_CLOCK_HZ /
FrequencyRaboQuente_Hz);
    // Set the pulse width of PWM0 for a 0% duty cycle.
    PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_3, 0);
    // Start the timers in generator 1.
    PWMGenEnable(PWM0_BASE, PWM_GEN_1);
    // Enable the outputs.
    PWMOutputState(PWM0_BASE, (PWM_OUT_3_BIT), true);

    if (xTaskCreate(PWM_RaboQuente_Task, (signed portCHAR *)"PWM_RaboQuente",
CONTROLLER_RaboQuente_STACK, NULL, tskIDLE_PRIORITY + PRIORITY_LED_TASK - 1,
NULL) != pdTRUE)
    {
        UARTprintf("\nFalha ao iniciar a task da temperatura\n");
        return (1);
    }
    else
    {
        UARTprintf("\nTask da temperatura iniciada corretamente");
        return (0);
    }
}
}

```

- *Task* do controle da agitação:

```

extern uint32_t inicia_controlador;
extern uint32_t RPM;

void StepperTask(void *pvParameters)

```

```

{
    while(1)
    {
        if(inicia_controlador == 1)
        {
            while(RPM != 0)
            {
                GPIOPinWrite(GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_4 | GPIO_PIN_5 |
GPIO_PIN_6 | GPIO_PIN_7, 0x30);
                vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ *60/(200*RPM));
                GPIOPinWrite(GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_4 | GPIO_PIN_5 |
GPIO_PIN_6 | GPIO_PIN_7, 0x60);
                vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ *60/(200*RPM));
                GPIOPinWrite(GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_4 | GPIO_PIN_5 |
GPIO_PIN_6 | GPIO_PIN_7, 0xC0);
                vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ *60/(200*RPM));
                GPIOPinWrite(GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_4 | GPIO_PIN_5 |
GPIO_PIN_6 | GPIO_PIN_7, 0x90);
                vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ *60/(200*RPM));
            }
            vTaskDelay(configTICK_RATE_HZ /3); //Aguarda 0,333 s
        }
    }
}

int32_t StepperInit()
{
    ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_GPIOC);
    GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTC_BASE,GPIO_PIN_4 | GPIO_PIN_5 | GPIO_PIN_6
| GPIO_PIN_7);
    if (xTaskCreate(StepperTask, (signed portCHAR *)"STEPPER",
configMINIMAL_STACK_SIZE, NULL, tskIDLE_PRIORITY + PRIORITY_LED_TASK - 1, NULL)
!= pdTRUE)
    {
        UARTprintf("\nFalha ao iniciar a task do motor de passos\n");
        return (1);
    }
    else
    {
        UARTprintf("\nTask do motor de passos iniciada corretamente");
        return (0);
    }
}

```