

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
*Campus* DIVINÓPOLIS  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Gabriel Oliveira Ferreira

CONTROLADORES, TRATAMENTOS DE SINAIS E PROGRAMAÇÃO  
APLICADOS À PISCICULTURA.



Divinópolis 2017

Gabriel Oliveira Ferreira

CONTROLADORES, TRATAMENTOS DE SINAIS E PROGRAMAÇÃO  
APLICADOS À PISCICULTURA.

Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à comissão avaliadora do curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção da aprovação na disciplina de TCC II.

Áreas de integração: Controle, Mecânica e Eletrônica.

Orientador: Dr. Luís Filipe Silva

Co-orientador: Dr. Ralney Nogueira

Divinópolis 2017

F383c Ferreira, Gabriel Oliveira.

Controladores, tratamentos de sinais e programação aplicados à piscicultura / Gabriel Oliveira Ferreira. - Divinópolis, 2017.  
82f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Luís Filipe Silva Pereira.

Coorientador: Prof. Dr. Ralney Nogueira de Faria.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas.

1. Mecânica. 2. Eletrônica. 3. Controle. 4. Compensadores. 5. Modelagem. 6. Piscicultura. I. Pereira, Luís Filipe Silva. II. Nogueira, Ralney de Faria. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU: 62(043)



**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais**  
**CEFET-MG/ Campus Divinópolis**  
**Curso de Engenharia Mecatrônica**

Monografia intitulada “CONTROLADORES, TRATAMENTOS DE SINAIS E PROGRAMAÇÃO APLICADOS À PISCICULTURA”, de autoria do graduando Gabriel Oliveira Ferreira, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

---

Prof. Dr. Luís Filipe Pereira Silva - CEFET-MG / Campus Divinópolis - Orientador

---

Prof. M.Sc. Fernando Thomé de Azevedo Silva - CEFET-MG / Campus Divinópolis

---

Prof. M.Sc. Marlon Henrique Teixeira - CEFET-MG / Campus Divinópolis

---

Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecatrônica  
CEFET-MG / Campus Divinópolis

# Agradecimentos

Agradeço,

aos meus pais, Antônio e Vanderlene e aos meus irmãos, Victor e Vinícius, que sempre se esforçaram para que eu tivesse um estudo de qualidade. Agradeço também aos vários familiares que de alguma forma auxiliaram nessa caminhada, em especial, ao meu Tio Valdir. Agradeço também aos meus amigos, que estiveram presente ao longo desses 5 anos muito felizes e produtivos.

# Resumo

Este Trabalho de Conclusão de Curso propõe o desenvolvimento de técnicas e tecnologias que otimizem a produção de peixes em ambientes fechados. Vê-se que muitas técnicas rudimentares são usadas em tal meio, que circula grandes quantias de dinheiro. De acordo com o IBGE, o Brasil produziu, em 2013, 392.500 toneladas de peixe em cativeiro, fazendo circular cerca de 2,02 bilhões de reais. Nesse contexto, espera-se a automação do processo, por meio de controladores, sensores, etc . Para tanto, uma pesquisa sobre condições apropriadas de ambiente que otimizam a reprodução, crescimento e qualidade dos peixes será realizada. A partir disso, dados sobre a temperatura da água serão levantados, objetivando alcançar seu ponto ótimo. Inicialmente, buscar-se-ão modelagens matemáticas para o sistema estudado, podendo, assim, conhecer mais sobre a sua dinâmica. Com a modelagem em mãos, será realizado um estudo sobre o melhor tipo de sensor, a fim de conhecer suas limitações e características, para que o mesmo seja calibrado da melhor maneira possível, evitando falseamentos nos sinais coletados. Posteriormente, será realizado um estudo acerca dos controladores e da melhor sintonia de cada um para o processo. Nessa etapa, espera-se que simulações via MatLab possam ser realizadas a fim de se obter compensadores que atendam aos critérios de desempenho previamente estabelecidos. Após essa etapa, esses compensadores serão testados em protótipos construídos a partir de componentes e dispositivos existentes na Unidade do CEFET-MG Divinópolis ou adquiridos via recursos próprios. Espera-se que ao final do projeto, tenha-se controladores capazes de manipular a temperatura da água, deixando-a em seu ponto ótimo.

Palavras-chave: controle, compensadores, modelagem e piscicultura.

# Abstract

This completion work proposes the development of techniques e technologies that optimize the fish production in closed environment. It is possible to see that plenty of rudimentary techniques are still used in this area, that involves a lot of money. According to IBGE, in 2013, Brazil produced 392.500.000 Kg of fish in captivity, worth of R\$ 2.02 billions in revenue. In this context, the objective is automatize the process, using controllers, sensors, etc. In order to accomplish that, a research of appropriated environment conditions that optimize the reproduction, growth and fish quality will be performed. After that, the goal is to reach the greatest level of temperature. The first step is calculating the system's mathematics models, that will provide enough data about its dynamic, while the second is to study about the best temperature sensors. Posteriorly, a research about the best controllers and their optimum tuning strategy will be ran. At this high, it is expected that simulations through Matlab can be done in order to calculate controllers with reliable results. After that, these compensators will be tested in prototypes built at the CEFET-MG laboratory. It is expected that by the end of the project, the compensators are going to be able to manipulate the water, achieving its greatest point.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Acrônimos e Notação</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Definição do problema e contextualização . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	2
1.3.1 Objetivo Geral . . . . .	2
1.3.2 Objetivos Específicos . . . . .	3
1.4 Estado da Arte . . . . .	3
1.5 Organização do Documento . . . . .	4
<b>2 Fundamentos</b>	<b>5</b>
2.1 Revisão de Literatura . . . . .	5
2.2 Metodologia . . . . .	7
2.3 Fundamentação Teórica . . . . .	8
2.3.1 Piscicultura . . . . .	8
2.3.2 Controle . . . . .	11
2.3.3 Termodinâmica . . . . .	18
2.4 Considerações finais . . . . .	21
<b>3 Projeto</b>	<b>22</b>
3.1 Definição de como são realizadas as trocas de calor . . . . .	22
3.2 Modelagem . . . . .	23
3.2.1 Tanque 1 . . . . .	23
3.2.2 Tanque 2 . . . . .	24
3.3 Definição das dimensões dos tanques . . . . .	25
3.4 Projeto dos Controladores . . . . .	27
3.4.1 Tanque 1 . . . . .	27
3.4.2 Tanque 2 . . . . .	29
3.5 Definição dos Atuadores . . . . .	31
3.5.1 Resistência . . . . .	31
3.5.2 Bombas de Água . . . . .	34



---

3.6	Definição dos Sensores . . . . .	37
3.6.1	Sensor de Temperatura . . . . .	37
3.6.2	Sensor de pH . . . . .	38
3.6.3	Microcontrolador . . . . .	38
3.6.4	<i>Display</i> LCD . . . . .	39
3.7	Orçamento . . . . .	39
3.8	Considerações finais . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Execução do Projeto</b>	<b>41</b>
4.1	Calibração dos sensores e atuadores . . . . .	41
4.1.1	Calibração do sensor de temperatura DS18B20 . . . . .	41
4.1.2	Calibração da resistência elétrica . . . . .	43
4.1.3	Calibração das bombas de água . . . . .	44
4.2	Tanque 1 . . . . .	46
4.2.1	Validação do modelo . . . . .	46
4.2.2	Controlador . . . . .	47
4.2.3	Controlador discreto . . . . .	48
4.3	Tanque 2 . . . . .	51
4.3.1	Validação do modelo . . . . .	51
4.3.2	Controlador . . . . .	52
4.3.3	Controlador Discreto . . . . .	54
4.4	Considerações finais . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>57</b>
5.1	Conclusões . . . . .	57
5.2	Propostas de continuidade . . . . .	58
<b>A</b>	<b>Projeto dos Controladores</b>	<b>59</b>
A.1	Tanque 1 . . . . .	59
A.2	Tanque 2 . . . . .	60
<b>B</b>	<b>Códigos implementados</b>	<b>64</b>
B.1	Tanque 1 . . . . .	64
B.2	Tanque 2 . . . . .	66
	<b>Referências</b>	<b>70</b>

# Lista de Figuras

1.1	Industrialização da piscicultura, Fonte: APT <sup>1</sup> . . . . .	3
2.1	Crescimento da produção de tilápia, Fonte: Ministerio da Pesca e Aquicultura <sup>2</sup> . . . . .	6
2.2	Métodos de controle de produção apresentados, Fonte KUBITZA (2011) . . . . .	7
2.3	Resposta ao degrau unitário (OGATA, 2010, p.154) . . . . .	12
2.4	Compensador em Avanço (OGATA, 2010, Adaptado p.285) . . . . .	13
2.5	Sistema de controle (OGATA, 2010, p.285) . . . . .	13
2.6	Polo e zero do compensador (OGATA, 2010, Adaptado p.290) . . . . .	14
2.7	Compensador em Atraso (OGATA, 2010, Adaptado p.285) . . . . .	15
2.8	Sistema em malha fechada apenas com a ação proporcional . . . . .	15
2.9	Resposta ao degrau unitário para sistema em malha fechada apenas com a ação integral . . . . .	16
2.10	Estrutura física de um controlador PID . . . . .	17
2.11	Transferência de calor até o equilíbrio térmico (SOARES, 2000, p.267) . . . . .	18
2.12	Processo de condução térmica TODA MATERIA <sup>3</sup> . . . . .	19
2.13	Processo de convecção térmica BOABAID (2010) . . . . .	20
2.14	Convecção natural e forçada PROJECT2R <sup>4</sup> . . . . .	20
3.1	Circulação do fluido . . . . .	22
3.2	Diagrama P&I da planta . . . . .	23
3.3	Vista frontal dos tanques . . . . .	26
3.4	Vista superior dos tanques . . . . .	26
3.5	Lugar das raízes para o tanque 1 . . . . .	28
3.6	Resposta ao degrau para o tanque 1 . . . . .	28
3.7	Lugar das raízes para o tanque 2 . . . . .	30
3.8	Resposta ao degrau para o tanque 2 . . . . .	30
3.9	Sinal de controle necessário para atender aos critérios de desempenho . . . . .	31
3.10	Resistência Elétrica Fonte: MERCADOLIVRE <sup>5</sup> . . . . .	32
3.11	Relé de Estado Sólido ALEXNLD <sup>6</sup> . . . . .	32
3.12	Sinal de controle necessário para atender aos critérios de desempenho . . . . .	34
3.13	Modelo de bomba Fonte:MERCADOLIVRE <sup>7</sup> . . . . .	35
3.14	Alimentação e tensão de saída da ponte H VIDADESILICIO <sup>8</sup> . . . . .	36
3.15	Ponte H-L298N Fonte:ALIBABA <sup>9</sup> . . . . .	36
3.16	DS18B20 Fonte:FILIFELOP <sup>10</sup> . . . . .	37
3.17	Sensor de pH Fonte:BIDORBUY <sup>11</sup> . . . . .	38

---

3.18	Arduino Uno Fonte:WIKIPEDIA <sup>12</sup> . . . . .	39
3.19	<i>Display</i> LCD 16x2 Fonte:MERCADOLIVRE <sup>13</sup> . . . . .	39
4.1	Histerese apresentada pelo DS18B20 . . . . .	42
4.2	Curva de calibração . . . . .	44
4.3	Curva de calibração . . . . .	45
4.4	Validação do modelo . . . . .	46
4.5	Ajuste fino realizado no modelo . . . . .	47
4.6	Sistema em malha fechada . . . . .	48
4.7	Sinal de controle . . . . .	48
4.8	Frequência de corte do sistema em malha fechada . . . . .	49
4.9	Malha fechada com Equação a diferenças e Função de Transferência . . . . .	50
4.10	Planta em malha fechada com Equação a diferenças . . . . .	50
4.11	Sinal de controle . . . . .	51
4.12	Validação da modelagem- Tanque 2 . . . . .	51
4.13	Comparativo entre modelos com e sem ajuste fino . . . . .	52
4.14	Sistema em malha fechada com o compensador . . . . .	53
4.15	Sinal de controle demandado . . . . .	53
4.16	Diagrama de Bode . . . . .	54
4.17	Sistema em malha fechada com Equação a diferenças e com a Função de Transferência . . . . .	55
4.18	Sistema em malha fechada com Equação a diferenças . . . . .	56
4.19	Sinal de controle . . . . .	56

# Lista de Tabelas

2.1	Peixes mais cultivados no Brasil (ABRUNHOSA, 2011, p.25) . . . . .	8
2.2	Impacto da Temperatura para as tilápias (KUBITZA, 2000, p.25) . . . . .	9
2.3	Impacto do pH para as Tilápias (KUBITZA, 2011, p.46) . . . . .	9
3.1	Condutividade Térmica H. D. YOUNG (1992) . . . . .	27
3.2	Variação de PWM e tensão da rede . . . . .	33
3.3	Variação da saída analógica e vazão da bomba de água . . . . .	35
3.4	Dados referentes à Ponte H-L298N . . . . .	36
3.5	Comparação entre sensores de temperatura . . . . .	37
3.6	Dados referentes ao DS18B20 . . . . .	37
3.7	Dados referentes ao sensor de pH . . . . .	38
3.8	Dados referentes ao <i>Display</i> LCD 16x2 . . . . .	40
3.9	Orçamento . . . . .	40
4.1	Dados comparativos entre DS18B20 e sensor padrão . . . . .	42
4.2	Calibração da resistência elétrica . . . . .	43
4.3	Calibração das bombas de água . . . . .	45

# Lista de Acrônimos e Notação

FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
OMS	Organização Mundial da Saúde
PID	Proportional-Integral-Derivative (Proporcional-Integral-Derivativo)
PI	Proportional-Integral (Proporcional-Integral)
PD	Proportional-Derivative (Proporcional-Derivativo)
pH	Potencial hidrogênico
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
UNESP	Universidade Estadual Paulista
CEPTA	Centro Nacional de Pesquisa e Conservação da Biodiversidade Aquática Contine
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação de Largura de Pulso)
APT	Aquiculture Production Technology LTD

$\zeta$	fator de amortecimento do sistema
$\omega_n$	frequência natural não amortecida do sistema
$t_s$	tempo de acomodação do sistema
$K_p$	ganho proporcional
$K_i$	ganho integral
$K_d$	ganho derivativo
$\tau_i$	tempo integral
$\tau_d$	tempo derivativo
$\epsilon$	emissividade da superfície
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann
$\phi$	contribuição angular do compensador

# Introdução

## 1.1 Definição do problema e contextualização

A ingestão de peixes possui diversos benefícios para a saúde. Sua carne é composta por diversos minerais e vitaminas que fazem parte de uma dieta saudável, além de possuir substâncias que não são produzidas pelo organismo, devendo assim, serem adquiridas através da alimentação, como o ácido graxo ômega-3. Dentre as conveniências dessa ingestão, pode-se citar: aumento da saúde cardiovascular, promover melhor domínio sobre a pressão arterial, diminuição da taxa de colesterol, além de sua carne possuir vitaminas A, E e D e auxiliar na ação anti-inflamatória. De acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura FAO, em 2015, o consumo mundial de peixe bateu recorde, sendo consumido 20 Kg por pessoa, 8 Kg a mais que o recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Ainda de acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura FAO, um dos fatores foi o aumento da produção em viveiros, o que proporcionou uma maior distribuição desse alimento. O Brasil tem contribuído bastante para esse aumento na produção de peixe, e segundo representantes da FAO, o país tem grandes possibilidades de continuar crescendo nesse ramo e ser uma das potências na produção de pescado no mundo. Em destaque, é possível citar, de acordo com o grupo Águas Claras, a produção de tilápia, presente em 24 estados brasileiros, sendo o peixe de água doce mais cultivado no país desde 2002. Nesse contexto, apresenta-se a importância do Trabalho de Conclusão de Curso em questão.

Tendo em vista o aumento da produção de peixe, um fator importante para a otimização desse processo é uma condição adequada do ambiente. Diante disso, pH, temperatura e quantidade de oxigênio devem ser monitoradas e atuadas para se alcançar valores ideais. Portanto, passa-se a ter um problema de controle.

Para realização dessa tarefa, faz-se necessário o uso de sensores que possam quantificar as grandezas citadas acima. É indispensável, então, a calibração dos mesmos para que não haja falseamento dos sinais coletados. De acordo com a Omega Engineering, “Todo

dispositivo usado para medições críticas de processo deve ser checado periodicamente para verificar se continua a mostrar a exatidão necessária. Quando é possível fazer ajustes, um dispositivo que faz medições fora dos limites esperados deve ser reajustado conforme um nível de desempenho aceitável, mas no caso de equipamentos não ajustáveis, o desvio ou o desempenho da medição devem ser registrados e deve-se decidir se o equipamento continua adequado para sua finalidade”.

Com os dados coletados, partir-se-á para a parte do projeto dos controladores. Para o presente estudo, propõe-se o projeto de controladores PID objetivando levar a temperatura para seu ponto ótimo, que no caso das tilápias, está entre 27 e 32 graus Celsius. Controladores PID são ajustados a partir de três ações: proporcional, integral e derivativa, as quais são combinadas de forma a se conseguir sintonias que possam levar o processo para a referência sem erros de estados estacionários e em um tempo de acomodação condizente com o sistema. Dentre as vantagens de tal tipo de compensador, pode-se citar sua facilidade de implementação, bem como regras de sintonia que podem contornar imperfeições que por ventura possa haver no modelo matemático que descreva o processo. De acordo com Ogata (2010,p.521), “A utilidade de controladores PID está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido, e portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controladores PID se mostram os mais úteis.”. Para as outras variáveis de processo, pH e quantidade de oxigênio presente na água, propõe-se o monitoramento das mesmas.

## 1.2 Motivação

Embora o mercado de piscicultura esteja em ascensão, é possível constatar que várias etapas do processo possuem técnicas rudimentares de monitoramento ou controle. Logo, tem-se como motivação para o trabalho inserir técnicas de controle e programação nesse meio, o que pode ocasionar o aumento da produção de peixes, bem como melhorar sua qualidade, tornando-o mais saudável e com tamanho mais adequado para o mercado.

## 1.3 Objetivos

Na presente seção é descrito de forma concisa o objetivo geral do trabalho, o qual almeja-se alcançar, sendo apresentados também os objetivos específicos.

### 1.3.1 Objetivo Geral

Construir um protótipo que simule as condições aquáticas em que se inserem as tilápias, almejando o controle em malha fechada da temperatura do mesmo, visto que essa variável é de extrema importância para a qualidade e crescimento dos peixes.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar sobre as condições aquáticas ideais para o desenvolvimento ótimo das tilápias;
- Estudar os melhores sensores, considerando preço e qualidade, para quantificar a grandeza proposta;
- Revisar sobre Teoria de Controle que o processo envolve, verificando a melhor maneira de projeto de controladores para o sistema;
- Estudar sobre os melhores atuadores que modificarão a temperatura do ambiente aquático;
- Elaborar e construir um protótipo onde seja possível simular o ambiente aquático que se deseja monitorar e controlar;
- Obter e validar o modelo do sistema desenvolvido via modelagem caixa branca;
- Projetar controladores PID que consigam atender aos critérios de desempenho previamente estabelecidos (apenas temperatura será controlada);
- Aplicar controlador no protótipo desenvolvido;

## 1.4 Estado da Arte

Atualmente, vê-se que vários projetos sobre tanques tecnológicos voltados para a piscicultura são estudados. Isso pode ser explicado pela necessidade de otimizar a produção de peixes, buscando seu crescimento e reprodução máximos em um tempo mínimo, diminuindo seu custo de produção. Nesse contexto, observa-se, em grande quantidade, a inserção de técnicas de controle no meio da criação dos peixes, alcançando as condições aquáticas desejadas. Têm-se, na Figura 1.1, ilustrações sobre a modernização em tal meio.



Figura 1.1: Industrialização da piscicultura, Fonte: APT<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Disponível em <http://www.aquaculture.co.il/> Acesso em março de 2017



Recentemente, verifica-se também uma grande evolução no desenvolvimento de aplicativos que auxiliam no monitoramento dos ambientes aquáticos em que tais técnicas são aplicadas. Por meio de *softwares*, é possível identificar e analisar se as grandezas estão com grau de controle satisfatório ou se alguma ação corretiva deve ser tomada. De acordo com G1 (2015), a tecnologia vem ganhando cada vez mais espaço entre os piscicultores, pois “[...] em vez de percorrer os tanques com pranchetas na mão, os tratadores agora levam *tablets*” e “[...] programas de computador e aplicativos ajudam no planejamento da criação”.

Dentre as empresas que inserem tecnologia na aquicultura, é possível destacar a *Aquiculture Production Technology Ltd.* Ela atua em 30 países de 5 continentes e realiza todas as etapas de projeto, como controle de temperatura, pH, quantidade de amônia, claridade da água, etc.

Em relação aos novos estudos sobre inserção tecnológica no meio da piscicultura, os mais relevantes estão sendo realizados na Europa e América do Norte. Este último, realizado no Canadá, planeja integrar as áreas de aquicultura, agricultura e energia renovável, sendo necessárias tecnologias vindas da Alemanha, Canadá e Israel.

## 1.5 Organização do Documento

No Capítulo 2, é apresentada a revisão de literatura do trabalho, tendo como objetivo mostrar um pouco da história de controle relacionado com a piscicultura. Ainda no Capítulo 2, tem-se a metodologia, onde são detalhadas as etapas necessárias para o desenvolvimento do projeto, e a fundamentação teórica, onde os conceitos usados no trabalho são explicados.

No Capítulo 3, são expostas as modelagens dos tanques, bem como as definições de suas dimensões, dos sensores e atuadores para o processo. São apresentados projetos de dois controladores, um para cada tanque em questão.

No Capítulo 4, é descrita uma conclusão sobre o projeto desenvolvido, mostrando o que ocorreu conforme esperado e as adversidades encontradas durante seu andamento. Além disso, é realizada uma análise do cronograma proposto anteriormente.

## Fundamentos

No presente capítulo, situam-se revisão de literatura, metodologia e fundamentação teórica do trabalho.

### 2.1 Revisão de Literatura

Estima-se que a piscicultura teve seus primeiros registros por volta de 4000 anos a.C. Dentre as várias culturas que utilizavam essa técnica, pode-se citar os egípcios e os chineses (STICKNEY, 1994). Porém, tais metodologias eram usadas, predominantemente, sem fins econômicos.

O grande salto na área se deu durante a Idade Média (V-XV), quando as relações comerciais já se mostravam significativas, bem como o aumento demográfico, demandando maior quantidade de alimento. Nesse contexto, verificou-se a necessidade de inserir técnicas que otimizassem a produção.

Em se tratando do Brasil, pode-se dizer que algumas técnicas de cultivo começaram a ser desenvolvidas a partir do século XVIII por colonizadores holandeses, como os viveiros de peixe através da costa nordeste do país (R7, 2013).

Dentre os nomes importantes não só para a piscicultura nacional, pode-se citar Rodolfo Von Ihering, pesquisador considerado o pai da piscicultura brasileira. Em meados de 1927, Rodolfo iniciou seus estudos na área da ictiologia, ramo da zoologia que estuda os peixes. Seus resultados apareceram em 1934, quando um novo método de reprodução artificial de peixes foi desenvolvido, conhecido com hipofisação. Sua pesquisa, além de gerar reconhecimento internacional, proporcionou recursos para a construção de estações de piscicultura nos estados de São Paulo e Rio Grande do Sul (ABRUNHOSA, 2011).

Pode-se dizer que os projetos comerciais pioneiros no Brasil se deram ao final dos anos 80. Estimulado por uma aquicultura estrangeira em pleno desenvolvimento, o Brasil tentou acompanhar o movimento, porém vários obstáculos foram encontrados: ausência de recursos financeiros, baixo investimento em tecnologia e logística deficitária. Mesmo

com as adversidades citadas, vários centros de pesca esportiva, conhecidos como pesque-pague, fizeram a demanda por peixes destinados ao empreendimento crescer, estimulando o cultivo de espécies de uma forma geral (R7, 2013).

Já no início dos anos 90, foi possível verificar altos investimentos em tecnologia voltada para a prática da piscicultura, como a reversão sexual, estratégias de produção em tanques-rede e desenvolvimento na produção de ração. Dentre as principais instituições responsáveis pelo avanço nessa área, é possível citar o DNOCS (com estações de piscicultura no Ceará), a CODEVASF (com estações de piscicultura no Rio São Francisco), a UNESP (com setor de piscicultura em Jaboticabal, SP) e o CEPTA (com estação de piscicultura em Pirassununga). Nesse contexto, grandes empreendimentos começaram a implantar-se em várias partes do país, dentre eles: Piscicultura Tamborá (TO), Piscicultura Gaspar (MT), Agropeixe (MS), etc. (KUBITZA, 2007).

Ainda nos anos 90, o crescimento do envolvimento da tecnologia com a piscicultura possibilitou o destaque de uma espécie importantíssima no cenário econômico da piscicultura atual: a tilápia. Até o início de tal década, essa espécie era tratada como praga nos rios. Entretanto, através do uso de tecnologia de reversão sexual, introdução de material genético selecionado, aprimoramento da produção em tanques-rede e inserção da engenharia no campo do cultivo, criando condições aquáticas ideais para os peixes, a produção de tilápia apresentou aumento significativo, chegando a ser a espécie mais produzida no país, como pode ser verificado na Figura 2.1. (KUBITZA, 2007).

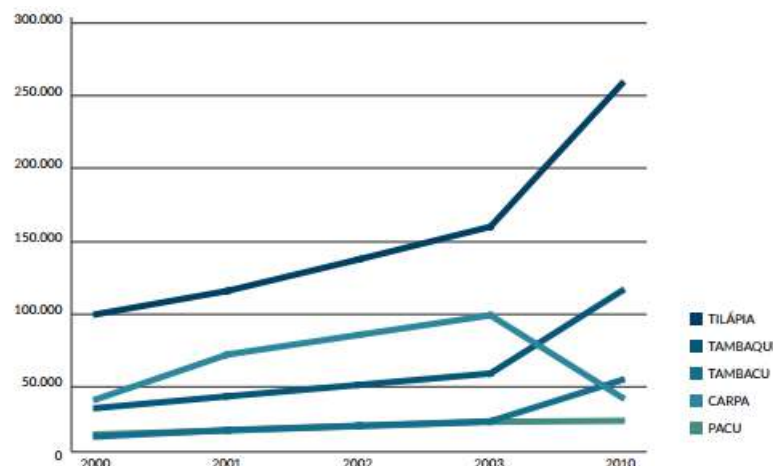


Figura 2.1: Crescimento da produção de tilápia, Fonte: Ministerio da Pesca e Aquicultura<sup>2</sup>

Já nos anos 2000 até a presente data, é possível verificar que a inserção da tecnologia na piscicultura continua crescendo, focando não só no controle do meio aquático, mas também em softwares que auxiliam os produtores. De acordo com Kubitzka (2012, p.27),

<sup>2</sup>Disponível em [http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS\\_CHRONUS/bds/bds.nsf/4b14e85d5844cc99cb32040a4980779f/\\$File/5403.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/4b14e85d5844cc99cb32040a4980779f/$File/5403.pdf) Acesso em março de 2017

“...temos aí, portanto, um grande potencial de negócio a ser explorado por empresas que já possuem ou que planejam desenvolver *softwares* específicos para a atividade”. Tal perspectiva pode ser observada na Figura 2.2, na qual é mostrada grande quantidade de produtores que ainda não apresentam meios eletrônicos aplicados ao controle da produção, fato que ocorre principalmente na Região Sul. Nesse contexto, vê-se um ramo com grande perspectiva de crescimento em termos de engenharia.



Figura 2.2: Métodos de controle de produção apresentados, Fonte KUBITZA (2011)

## 2.2 Metodologia

Inicialmente, busca-se revisões bibliográficas sobre Piscicultura, Teoria de Controle e Mecânica dos Fluidos. A partir desses estudos, é possível definir parâmetros sobre o trabalho, como o tamanho do protótipo que será desenvolvido, os critérios de desempenho desejados para a dinâmica apresentada pela temperatura da água e os sensores e atuadores que serão utilizados.

Posteriormente, realizar-se-á um estudo acerca dos controladores (para temperatura) e a melhor sintonia de cada um para o processo. Nessa etapa, simulações via MATLAB serão realizadas a fim de se obter compensadores que atendam critérios de desempenho previamente estabelecidos. Após essa etapa, inicia-se o TCC 2, quando esses compensadores serão testados em protótipos que serão construídos nos laboratórios do CEFET-MG.

A partir da montagem do protótipo, será possível validar o modelo calculado em etapas anteriores, bem como aplicar o controlador projetado. Se necessário, serão levantados novos modelos, bem como projetados novos controladores.

## 2.3 Fundamentação Teórica

### 2.3.1 Piscicultura

A tilápia é o peixe mais cultivado do Brasil, conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Peixes mais cultivados no Brasil (ABRUNHOSA, 2011, p.25)

ESPÉCIE	Quantidade(t)	Porcentagem
Tilápia	67.850,5	38,0
Carpa	42.490,5	23,8
Tambaqui	25.011,0	14,0
Tambacu	10.874,5	6,1
Pacu	9.044,0	5,1
Tambatinga	2.494,5	1,4
Truta	2,351,5	1,3
Outros	17.058,8	8,0
TOTAL	178.746,5	100,0

Para tanto, faz-se necessário que diversas variáveis estejam de acordo com as condições ótimas para essa espécie: temperatura, pH, quantidade de amônia, oxigênio dissolvido, nitrogênio, alcalinidade e até mesmo a transparência da água (ABRUNHOSA, 2011, p.97). A qualidade da água impacta de forma direta em diversas atividades naturais de um peixe, como respirar, alimentar, reproduzir e até mesmo excretar (A. OSTRENSKY, 1998, p.75). Nesse contexto, será apresentado, de forma individual, o impacto de cada uma dessas variáveis na piscicultura.

#### Temperatura

Os peixes são animais pecilotérmicos, logo sua temperatura corporal varia de acordo com o ambiente em que estão submetidos, o que pode acarretar diversas consequências indesejadas em seu cultivo. De acordo com Ostrensky (1998, p.79) “[...] quando a temperatura da água varia, todo metabolismo do peixe é afetado. Em temperaturas mais altas, os peixes de clima quente comem mais, ficam mais ágeis, crescem mais...quando a temperatura cai, os peixes deixam de comer e diminuem bastante seu ritmo biológico”.

A temperatura está relacionada, principalmente, com o desenvolvimento físico do peixe, influenciando diretamente em sua taxa de crescimento. Além disso, está associada também com a capacidade de reprodução das tilápias. Para essa espécie, a temperatura ideal é 28°C (ABRUNHOSA, 2011, p.97). A Tabela 2.2 apresenta as consequências para os peixes quando expostos a diferentes temperaturas.

Tabela 2.2: Impacto da Temperatura para as tilápias (KUBITZA, 2000, p.25)

TEMPERATURA	CONSEQUÊNCIA
Abaixo de 10°C	Morte
10-20°C	Crescimento lento, baixa tolerância ao manuseio e à doenças
20-27°C	Consumo de alimento reduzido e crescimento lento
27-32°C	Região de conforto térmico
32-38°C	Redução do apetite baixa resistência ao manejo e à doenças
Acima de 38°C	Morte

## pH

De forma simplificada, o pH é a grandeza que permite identificar o quanto uma substância é básica ou ácida. Seu valor varia de 0 a 14, sendo que valores abaixo de 7 são considerados ácidos e aqueles acima do mesmo são considerados básicos. Em 7, considera-se pH neutro.

pH abaixo de 3 causa a morte dos peixes em um intervalo de até 3 dias, enquanto ocorre morte em até 19 dias quando tal variável é fixada com valor 4. Em geral, as mortes verificadas apresentam sinais de asfixia (AQUICULTURA, 2000, p.45). Ainda de acordo com a revista Panorama da Aquicultura (2000, p.46) “Acidez excessiva causa aumento na secreção de muco, irritação e inchaço nas brânquias, culminando com a destruição do tecido branquial.” Em contrapartida, quando inseridos em meio bastante alcalinos, os peixes apresentam taxa de mortalidade menor do que quando inseridos em meios muito ácidos, porém vários problemas podem ocorrer, como de acordo com a revista Panorama da Aquicultura (2000, p.46) “... o elevado pH pode potencializar os problemas com toxidez por amônia e aumentar a susceptibilidade dos peixes às doenças, ao manuseio e transporte.”

De acordo com a Tabela 2.3, é possível verificar o impacto dessa variável no desenvolvimento dos peixes, sendo seu ponto ótimo entre 6 e 9.

Tabela 2.3: Impacto do pH para as Tilápias (KUBITZA, 2011, p.46)

pH	EFEITO
4	Ponto de morte ácida
4-5	não há reprodução
5-6	Crescimento lento
6-9	Melhor Crescimento
9-11	Crescimento lento
11	Ponto de morte ácida

### **Oxigênio dissolvido**

De acordo com Abrunhosa (2011, p.100) “A fisiologia respiratória dos peixes também depende da concentração de oxigênio dissolvido na água, tornando essa uma importante variável”. Quando submetidas à baixa quantidade de oxigênio, as tilápias apresentam maior tendência em adquirir doenças e também diminuem sua capacidade metabólica (KUBITZA, 2000, p.45).

Em países como o Brasil, que possui temperaturas elevadas durante grande parte do ano, deve-se atentar para a quantidade de oxigênio presente na água, já que sua concentração diminui com temperaturas elevadas. Outro fator que pode causar baixo teor de tal molécula presente na água é a superpopulação de peixes em um determinado espaço, bem como o excesso de alimento (ração), pois sendo orgânico, reage com a água e diminui o nível de oxigênio dissolvido (A. OSTRENSKY, 1998, p.83).

Caso essa grandeza não esteja dentro de sua margem de tolerância, os peixes podem deixar de alimentar-se, prejudicando seu desenvolvimento e podendo até haver aumento na taxa de mortalidade dos mesmos (A. OSTRENSKY, 1998, p.86). Segundo Kubitza, a concentração mínima de oxigênio para as tilápias é cerca de 1,6 miligramas por litro, entretanto o peixe começa a reduzir sua atividade quando a concentração de oxigênio dissolvido está em torno de 4 miligramas por litro.

### **Amônia**

A amônia presente na água é proveniente da própria excreção nitrogenada dos peixes, bem como da decomposição de materiais orgânicos na água. Embora não sejam registradas mortalidade de peixes por intoxicação por amônia, a exposição indevida à essa substância pode afetar de forma negativa a produção de peixes em tanques, fazendo-se necessário monitorar semanalmente as concentrações de amônia na água (KUBITZA, 2000, p.46). Ainda em conformidade com Kubitza (2000, p.46) “[...] a exposição de peixes a níveis sub-letais de amônia afeta a lucratividade do empreendimento, por comprometer o crescimento e a conversão alimentar, a tolerância ao manuseio e transporte e a condição de saúde dos peixes”. Segundo Kubitza, a concentração de 0,2 mg/L de amônia não ionizada deve servir de alerta para os produtores.

### **Nitrogênio**

De acordo com Abrunhosa (2011, p.101) “o nitrogênio contido na água de piscicultura é produto do metabolismo nitrogenado dos peixes e outros organismos aquáticos e da decomposição orgânica.”Tal substância é tóxica para os peixes, podendo variar o grau de toxicidade de espécie para espécie. Em contrapartida, em quantidades ideais é de extrema importância no metabolismo de sistema aquáticos, já que possui relação direta

na formação de proteínas (Instituto de Ciências e Tecnologia das Águas). Sua quantidade ideal varia de acordo com o pH do sistema em que está envolvido.

### Alcalinidade

Alcalinidade pode ser definida como a capacidade que um sistema aquoso possui de neutralizar substâncias ácidas que entram em contato com ela. Na piscicultura, os bicarbonatos e os carbonatos são os responsáveis por essa característica. De um forma geral, para as espécies de peixes tropicais, a alcalinidade ideal está em torno de 55mg/L (ABRUNHOSA, 2011, p.103).

### Transparência da água

A transparência da água pode ser relacionada com a capacidade que a luz possui de entrar na água. Tal grandeza pode referenciar a quantidade de plâncton, sendo a transparência inversamente proporcional ao número de algas no viveiro. De maneira geral, a transparência ideal encontra-se entre 40 cm e 60 cm (ABRUNHOSA, 2011, p.104).

## 2.3.2 Controle

Quando se deseja controlar um sistema, uma das ferramentas mais eficazes é colocar sua Função de Transferência em malha fechada com um compensador. Esse procedimento consegue reposicionar os polos de malha fechada dominantes do sistema, forçando o mesmo a atender características de regimes transitório (*overshoot*, tempo de acomodação, tempo de subida, etc.) e estacionário.

Por conseguinte, é necessário calcular quais os polos de malha fechada conseguem atender aos critérios pré-estabelecidos, o que pode ser realizado determinando o fator de amortecimento  $\zeta$  e a frequência natural não amortecida  $\omega_n$  do sistema, através das Equações 2.1 e 2.2 (OGATA, 2010, p.525).

$$\%overshoot = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

$$t_s = \frac{4}{\zeta \cdot \omega_n} \quad (2.2)$$

Como pode ser verificado na Figura 2.3, para valores de  $\zeta$  menores ou iguais a 0,4, tem-se um *overshoot* bastante elevado; já para números maiores ou iguais à 0,8, tem-se uma resposta lenta. Para que se obtenha uma resposta transitória com boa relação entre amortecimento e rapidez,  $\zeta$  deve estar situado entre 0,4 e 0,8 (OGATA, 2010, p.155).

Com essas constantes calculadas, é possível obter os polos de malha fechada desejados  $P$  através da Equação 2.3



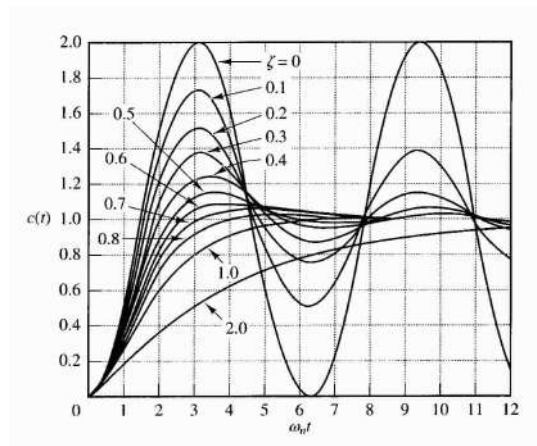


Figura 2.3: Resposta ao degrau unitário (OGATA, 2010, p.154)

$$P = -\zeta\omega_n + -j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.3)$$

### Projeto de Controladores pelo Método Lugar das Raízes

Dentre as diversas formas de projeto de controladores, pode-se destacar a técnica por alocação de polos de malha fechada do sistema. Relaciona-se a posição dessas raízes com as estabilidades relativa e absoluta da malha de controle, ou seja, para que características de regime transitório de determinada função de transferência sejam atendidas, faz-se necessário um estudo sobre a localização de seus polos no gráfico lugar das raízes. Ogata (2010, p.246) diz que “A característica básica da resposta transitória de um sistema de malha fechada está intimamente relacionada à localização dos polos de malha fechada.”

Dentre as vantagens dessa técnica de projeto em relação aos métodos de sintonia de controladores aplicados diretamente na planta (Ziegler Nichols, por exemplo), é possível citar a capacidade de prever as consequências da adição de polos ou zeros na função (OGATA, 2010, p.246). É possível relacionar a adição de polos à função de transferência com a ação integral, bem como a ação derivativa está associada à inserção de zeros no sistema, o que será abordado juntamente com controladores PID.

O projeto de compensadores pelo método de lugar das raízes fundamenta-se na alteração do lugar das raízes do sistema, impondo que esse passe pelos polos de malha fechada desejados. (OGATA, 2010, p.281).

Nesse contexto, apresentam-se os compensadores por avanço, atraso e avanço-atraso de fase.

### Compensação por Avanço de Fase

O compensador em avanço de fase é usado quando um sistema apresenta-se com características de resposta transitória indesejáveis ou é instável. Tal controlador possui como

característica um zero situado mais próximo ao eixo  $j\omega$ , quando comparado ao polo, conforme Figura 2.4. O zero mais próximo a origem adianta a fase do sistema, possibilitando ao projetista posicionar os polos de malha fechada dominantes no local desejado, atendendo à critérios de desempenho pré-estabelecidos (OGATA, 2010, p.285).

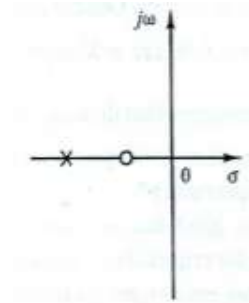


Figura 2.4: Compensador em Avanço (OGATA, 2010, Adaptado p.285)

Para projetar compensadores em avanço, é necessário calcular a contribuição angular  $\phi$  que o controlador deve possuir, o que é feito através da condição de fase, conforme Equação 2.4.

$$\angle G_c(s) + \angle G(s) = 180^\circ \quad (2.4)$$

Onde  $G_c(s)$  e  $G(s)$  representam as Funções de Transferência do compensador e do sistema não compensado, de acordo com Figura 2.5.

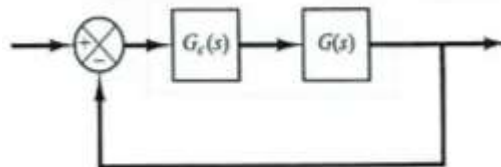


Figura 2.5: Sistema de controle (OGATA, 2010, p.285)

As contribuições angulares são calculadas no polo de malha fechada desejado. Dentre as várias metodologias para se calcular um compensador em avanço, uma delas é posicionar o zero do controlador sobre o polo do sistema que se deseja controlar; já para determinar seu polo faz-se um análise gráfica, segundo Figura 2.6.

Com o polo e zero do compensador calculados, é necessário determinar seu ganho  $K_c$ , o que pode ser feito através do critério de módulo, apresentado na Equação 2.5.

$$|K_c.G_c(s).G(s)| = 1 \quad (2.5)$$

Após determinar  $K_c$ , basta substituir os valores na Equação 2.6, e tem-se um compensador em avanço projetado.

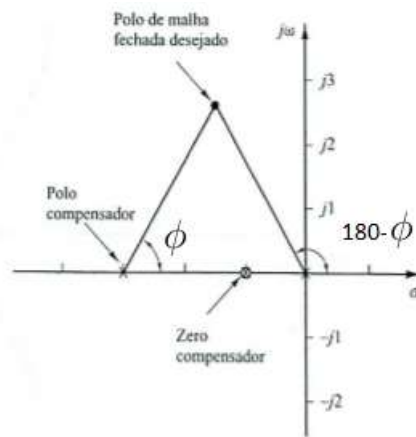


Figura 2.6: Polo e zero do compensador (OGATA, 2010, Adaptado p.290)

$$G_c(s) = K_c \frac{s + a}{s + b} \quad (2.6)$$

Onde:

- $a$  = zero do compensador;
- $b$  = polo do compensador;

### Compensação por Atraso de Fase

O compensador por atraso é utilizado quando um determinado sistema atende às características de regime transitório, porém apresenta estado estacionário indesejado. Em outras palavras, é possível dizer que é necessário aumentar o ganho de malha aberta do sistema sem alterar, de forma considerável, o lugar das raízes nas proximidades dos polos dominantes de malha fechada. Para evitar tal modificação, a contribuição angular de um compensador em atraso é fixada em no máximo  $5^\circ$ , o que pode ser conseguido posicionando o polo e o zero da rede de atraso próximos um do outro (OGATA, 2010, p.294). Nesse contexto, apresenta-se a condição de ângulo, Equação 2.7.

$$-5^\circ < \angle G_c(s) < 0^\circ \quad (2.7)$$

Como especificidade de tal controlador, tem-se o polo mais próximo ao eixo imaginário, quando comparado ao zero, conforme Figura 2.7, gerando o atraso de fase.

Há várias maneiras de se projetar um compensador em atraso, porém não serão abordadas, visto que os controladores arquitetados no Capítulo 3 utilizam um integrador na origem, o que será explicado mais à frente.

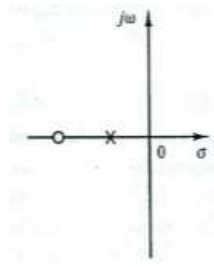


Figura 2.7: Compensador em Atraso (OGATA, 2010, Adaptado p.285)

### Controlador PID

Os controladores PIDs são os algoritmos de controle mais usados na indústria, de acordo com a National Instruments. Há várias maneiras de projetar esses tipos de controladores, dentre elas, muitas são baseadas na resposta da planta, como Ziegler-Nichols, Cohen-Coin, Curva de Reação, etc.

Controladores PID são constituídos de três ações: proporcional, integral e derivativa, onde cada uma delas possui função específica, porém, na maioria das vezes são utilizadas de forma integrada para que seja possível obter as vantagens de cada uma em um mesmo controlador (OGATA, 2010, p.21).

Relaciona-se a ação proporcional com precisão do sistema em malha fechada, porém quando aplicada de forma isolada não corrige erro de estado estacionário (para sistemas do tipo 0) (OGATA, 2010, p.197). Outro ponto a se destacar, é que em uma planta real, uma ação proporcional bastante alta pode levar o sistema à instabilidade GOMES (2000). A Figura 2.8 mostra tal dinâmica quando se fecha a malha apenas com ação proporcional implementada.

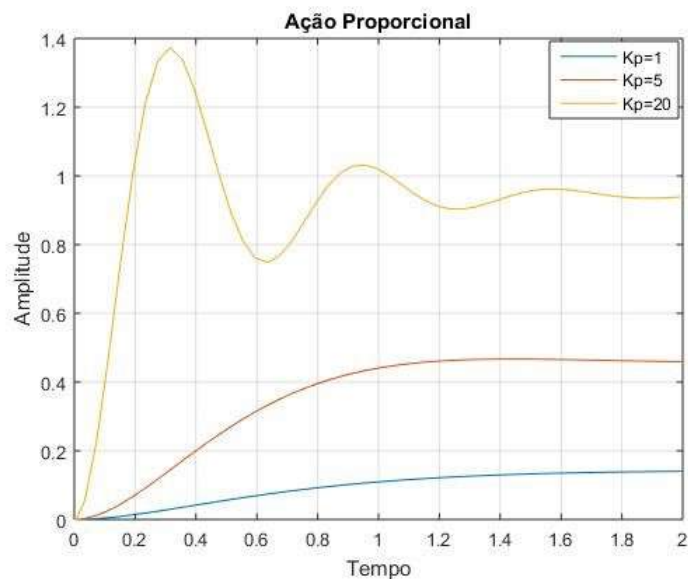


Figura 2.8: Sistema em malha fechada apenas com a ação proporcional

Pela figura 2.8, observar-se que à medida que a ação proporcional é aumentada, diminui-se o erro de estado estacionário, porém o sistema tende a oscilar, podendo tornar-se instável.

A ação integral está relacionada com a correção de erros de regime permanente. Para sistemas do tipo 0, consegue-se tornar o erro de estado estacionário nulo quando se insere o integrador puro. Em conformidade com Ogata (2010, p.201) “No controle proporcional de uma planta, cuja função de transferência não possui um integrador  $1/s$ , existe um erro estacionário, ou erro residual, na resposta a uma entrada degrau. Esse erro residual pode ser eliminado se uma ação de controle integral for incluída no controlador ”. Assim como no controle proporcional, ao passo que se aumenta a ação integral, tende-se à instabilizar o sistema. Na prática, o que ocorre é o deslocamento do gráfico do lugar das raízes para a direita por meio da inserção de um polo na origem. A Figura 2.9 mostra a dinâmica quando se varia esse parâmetro.

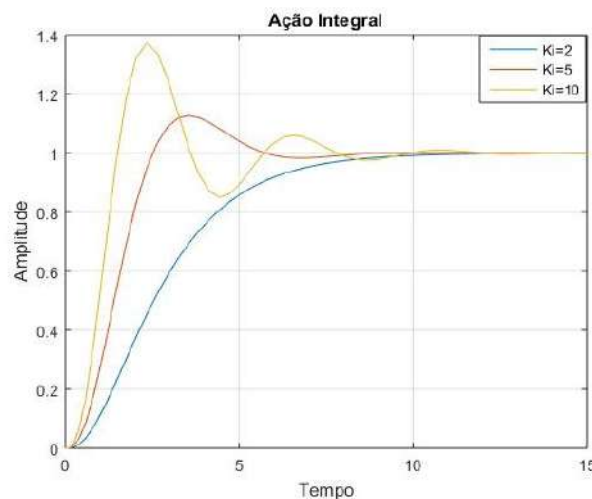


Figura 2.9: Resposta ao degrau unitário para sistema em malha fechada apenas com a ação integral

A ação derivativa não é usada de forma isolada, pois não atua diretamente sobre o erro, mas sim sobre sua taxa de variação. Sua função está ligada à estabilizar o sistema, atuando sobre características de regime transitório, como *overshoot* e tempo de acomodação. Sua principal vantagem está ligada à obtenção de um controlador de alta sensibilidade, que age sobre o erro antes que o mesmo se torne grande, (OGATA, 2010, p.201). De acordo com Ogata (2010, p. 201) “A adição de um zero à função de transferência de malha aberta tem o efeito de deslocar o lugar das raízes para a esquerda, tendendo a tornar o sistema mais estável e mais rápida a acomodação da resposta. Fisicamente, a adição de um zero na função de transferência do ramo direto significa adicionar um controle derivativo ao sistema ”.

Com as três ações explicitadas, cabe ao projetista observar quais ações devem ser com-

binadas a fim de obter-se a melhor resposta para o sistema a ser controlado. Como exemplo, pode-se citar os controladores PD e PI. Com o primeiro, obtém-se as características semelhantes a de um compensador em avanço, onde procura-se melhorar características de regime transitório. Em conformidade com Ogata (2010, p. 451) “A compensação por avanço de fase resulta, essencialmente, em uma melhoria apreciável na resposta transitória...” e Ogata (2010, p. 563) “O controlador PD é uma versão simplificada do compensador de avanço...”. Já o PI pode ser associado a um compensador em atraso, onde deseja-se melhorar o estado estacionário do sistema em malha fechada. De acordo com Ogata (2010, p. 467) “Como o compensador por atraso de fase tende a integrar o sinal de entrada, ele atua aproximadamente como um controlador proporcional-integral” e Ogata (2010, p. 21) diz que “A compensação por atraso de fase é usada para melhorar o desempenho em estado permanente”.

Controladores PID possuem função de transferência equivalentes à Equação 2.8, (OGATA, 2010, p.21):

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) = \frac{K_p s^2 + K_i s + K_d}{s} \quad (2.8)$$

Observa-se então, por possuir numerador de grau maior do que o denominador, que tal sistema é não causal, ou seja, depende de respostas futuras. Para que sua implementação seja causal, tem-se como saída a adição de um polo no mesmo, entretanto esse valor deve possuir dinâmica dez ou mais vezes mais rápida do que o polo dominante.

De acordo com a Equação 2.8, é possível montar o digrama de blocos representativo de um controlador PID. Com o auxílio do MATLAB, chegou-se no modelo apresentado pela Figura 2.10 .

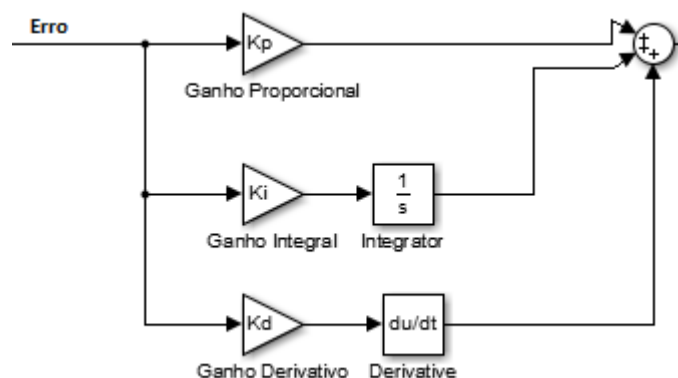


Figura 2.10: Estrutura física de um controlador PID

### Modelagem caixa branca e caixa preta

A modelagem em caixa branca é aquela onde se conhece sobre as leis da Física que ditam o sistema. Através de equacionamentos, obtém-se a Função de Transferência da planta; em outras palavras, as relações matemáticas que descrevem determinado fenômeno são conhecidas. Entretanto, em diversos casos, torna-se inviável a modelagem matemática de processos devido à elevada complexidade que envolvem; nesse contexto, apresenta-se a modelagem caixa preta: aplica-se entradas no sistema e através de sua relação com a saída, calcula-se a Função de Transferência do sistema.

### 2.3.3 Termodinâmica

Calor pode ser definido como a energia térmica em trânsito entre corpos que possuem diferentes temperaturas. De acordo com Borgnakke (2009, p.79) “[...] calor é definido como sendo forma de transferência de energia através da fronteira de um sistema, numa dada temperatura, a outro sistema (ou ambiente), que apresenta temperatura inferior, em virtude da diferença entre as temperaturas dos dois sistemas”. Quando os dois corpos atingirem a mesma temperatura, cessa-se a troca de calor, e tem-se o equilíbrio térmico. Ainda em concordância com Borgnakke (2009, p.79) “Nessa situação não mais ocorre transferência de calor porque não há diferença de temperatura”, Figura 2.11.

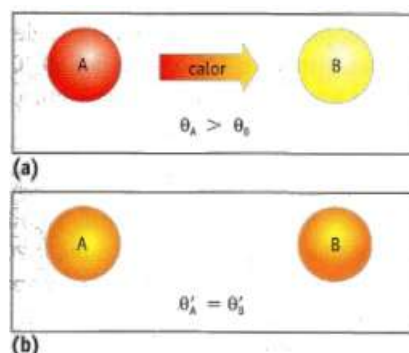


Figura 2.11: Transferência de calor até o equilíbrio térmico (SOARES, 2000, p.267)

Partindo do princípio que a energia não se perde, tem-se que o somatório entre a quantidade de calor cedida por um corpo e a quantidade absorvida por outro deve ser zero, a não ser que haja calor cedido para o ambiente (CORDEIRO, 2010). De acordo com Soares (2000, p.267), “Quando dois corpos trocam calor entre si, até estabelecer-se o equilíbrio térmico, é nula a soma das quantidades de calor trocadas por eles”.

Nesse contexto, tem-se a Fórmula Geral da Calorimetria, que relaciona a quantidade de calor trocada por um corpo de massa  $m$ , com sua variação de temperatura (SOARES, 2000, p.265) e pode ser expressa pela Equação 2.9:

$$Q = m.C.\Delta\theta \quad (2.9)$$

onde  $C$  representa o calor específico do material e  $\Delta\theta$  sua variação de temperatura. Logo, para o sistema da Figura 2.11, pode-se chegar à Equação 2.10.

$$Q_A + Q_B = m_A.C_A.\Delta\theta_A + m_B.C_B.\Delta\theta_B = 0 \quad (2.10)$$

A transferência de calor pode ocorrer de três maneiras: condução, radiação e convecção.

Condução é o processo de transmissão de calor que ocorre de uma partícula para outra, sem que haja o transporte de matéria. Tal método de transferência de calor se dá nos três estados físicos da matéria: sólido, líquido e gasoso. De acordo com Boles (2007, p.75) “Condução de calor em uma substância é a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas adjacentes menos energéticas”. Embora ocorra nos três estados físicos, se dá principalmente nos sólidos.

Ainda de acordo com Boles (2007, p.75) “A taxa com a qual o calor é transferido por condução através de uma camada de espessura constante  $\Delta x$  é diretamente proporcional à diferença de temperatura  $\Delta T$  através da camada e à área  $A$  normal na direção da transferência de calor, e é inversamente proporcional à espessura da camada”. Dessa maneira, relaciona-se tais grandezas de acordo com a Equação 2.11.

$$\dot{Q} = K_i.A.\frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.11)$$

Como exemplo, pode-se citar o aquecimento da extremidade de um material metálico, quando a outra extremidade é submetida à uma fonte de calor, como a colher ilustrada na Figura 2.12.



Figura 2.12: Processo de condução térmica TODA MATERIA<sup>3</sup>

onde  $k_i$  representa a condutividade térmica do material. Tal constante diz respeito à capacidade de determinado corpo de conduzir calor, ou seja, quanto maior  $k_i$  de uma material, melhor condutor térmico ele é.

Diferentemente da condução, a convecção é o processo de transferência de calor que ocorre havendo o transporte de matéria entre dois pontos. Esse método ocorre devido

<sup>3</sup>Disponível em <https://www.todamateria.com.br/conducao-termica/> Acesso em abril de 2017



às correntes de convecção de um determinado fluido geradas pela diferença de densidade entre a parte aquecida e a que ainda não recebeu calor. De acordo com Boles (2007, p.76) “... convecção é o modo de transferência de energia entre uma superfície sólida e líquido ou gás em movimento adjacente à superfície. ”

Como exemplo, pode-se citar uma placa de metal aquecida colocada em um ambiente aberto. O ar que está a sua volta será aquecido por condução, conseqüentemente sua densidade irá diminuir. Logo, tal fluido aquecido irá elevar-se, dando lugar a uma porção de ar que não recebeu calor da placa, criando, assim, uma corrente de convecção, já que o processo se repete até alcançar-se equilíbrio térmico entre o metal e o fluido em questão, como pode ser visto na Figura 2.13.

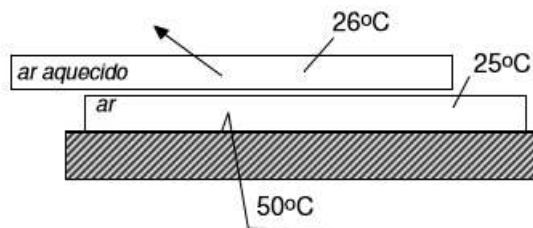


Figura 2.13: Processo de convecção térmica BOABAID (2010)

Nesse contexto, para que o movimento do fluido ocorra de forma mais rápida, é possível inserir meios artificiais que favoreçam o procedimento, como ventiladores ou abanadores, Figura 2.14. Tem-se, então, o que se conhece por convecção forçada. Em contrapartida, quando o próprio aquecimento do fluido gera o movimento das correntes, como no exemplo da Figura 2.13, tem-se a convecção natural (M. BOLES, 2007, p.76).

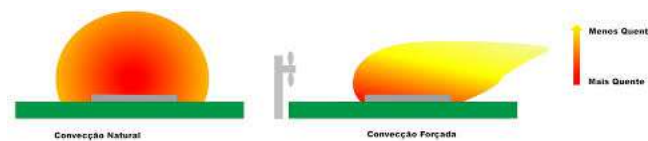


Figura 2.14: Convecção natural e forçada PROJECT2R<sup>4</sup>

O cálculo da taxa de transferência de calor por convecção pode ser feito através da Lei de Resfriamento de Newton, expressa pela Equação 2.12, BOLES (2007, p. 77).

$$\dot{Q} = h.A.(T_p - T_f) \quad (2.12)$$

Onde:

- $h$  = coeficiente de troca de calor por convecção;

<sup>4</sup>Disponível em <https://project2r.com/2015/02/25/pc-cooling-pt-3-estrategias-activas-de-dissipacao>  
Acesso em abril de 2017

- $A$  = representa a área de troca de calor na superfície sólida;
- $T_p$  = temperatura da superfície;
- $T_f$  = temperatura do fluido;

A irradiação térmica pode ser definida como a transmissão de calor na forma de ondas eletromagnéticas. Em contrapartida aos dois métodos citados acima, esse pode ocorrer no vácuo. Como principal exemplo, pode-se citar a energia térmica que o planeta Terra recebe do Sol.

Qualquer objeto emite ondas eletromagnéticas, porém também as recebe de outros corpos. O balanço entre essas duas taxas diz se um corpo está aquecendo um resfriando, ou seja, caso um corpo emita mais ondas do que recebe, esse tenderá a diminuir sua temperatura porque está perdendo energia.

Esse meio de transmissão de energia pode ser calculado através da Equação 2.13.

$$\dot{Q} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2.13)$$

Onde:

- $\epsilon$  = emissividade da superfície;
- $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann;
- $A$  = área da superfície;
- $T$  = temperatura absoluta da superfície;

## 2.4 Considerações finais

No Capítulo 2, apresentou-se a revisão de literatura sobre tecnologia aplicada à piscicultura, bem como os conhecimentos necessários para o desenvolvimento do projeto. Focou-se nas três principais áreas presentes no trabalho: piscicultura, Controle e Termodinâmica.

## Projeto

Neste capítulo, o projeto de uma planta piloto de criação de tilápia é apresentado. Nesse contexto, discute-se sobre a modelagem do processo, a definição de sua estrutura e quais os sensores e atuadores que são utilizados. Além disso, é apresentado o projeto de um controlador.

### 3.1 Definição de como são realizadas as trocas de calor

Tem-se água separada em três reservatórios distintos, onde no primeiro tem-se água a  $35^{\circ}\text{C}$ , no segundo a  $28^{\circ}\text{C}$  e no terceiro, o fluido encontra-se à temperatura ambiente. A água que possui maior quantidade de calor (setas vermelhas) é bombeada sempre na parte inferior da planta, favorecendo as trocas de calor por convecção devido à sua densidade inferior, conforme Figura 3.1.

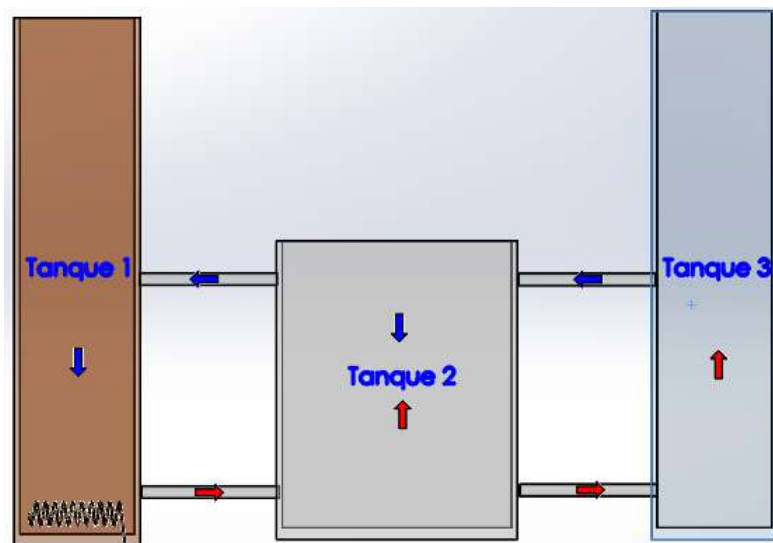


Figura 3.1: Circulação do fluido

Nesse contexto, foi possível definir o posicionamento dos atuadores e sensores, representados pelo Diagrama P&I da planta, conforme Figura 3.2.

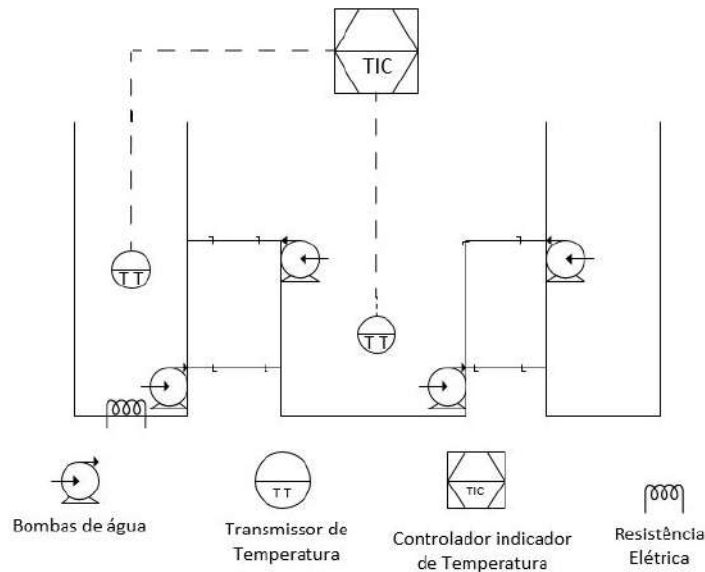


Figura 3.2: Diagrama P&I da planta

## 3.2 Modelagem

Objetivando obter controladores com alto grau de eficiência, faz-se necessário obter modelos para cada um dos tanques acima, conforme é mostrado a seguir.

### 3.2.1 Tanque 1

Para o tanque 1, tem-se a seguinte condição: a resistência cede uma determinada quantidade de calor por unidade de tempo (J/s), onde tal grandeza é absorvida pela água ou perdida por convecção entre as paredes do tanque e o meio, que se encontra em uma temperatura mais baixa. Os tanques são de vidro, material que possui baixa condutividade térmica, reduzindo as perdas de calor. Dessa forma, é possível obter o modelo a partir da Equação 3.1.

$$P_{res} = \dot{Q}_{absorvido} + \dot{Q}_{convecção} \quad (3.1)$$

Onde:

- $P_{res}$  = potência da resistência (Watts);
- $\dot{Q}_{absorvido}$  = calor absorvido pela água por segundo (J/s);
- $\dot{Q}_{convecção}$  = calor perdido por convecção para o meio (J/s).

Da Equação 3.1, pode-se chegar a Equação 3.2.

$$P_{res} = m_1 \cdot C \cdot \frac{\delta T}{\delta t} + h_{ar} \cdot A \cdot (T_p - T_f) \quad (3.2)$$

Onde:

- $m_1$  = massa de água presente no tanque 1 (Kg);
- $h_{ar}$  = coeficiente de convecção do ar ( $5-30 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ );
- $A$  = área total do tanque ( $m^2$ );
- $T_p$  = temperatura da superfície de acrílico ( $^{\circ}C$  ou K);
- $T_f$  = temperatura ambiente ( $^{\circ}C$  ou K);
- $C$  = Calor específico da água ( $J/Kg \cdot ^{\circ}C$ );

Aplicando a Transformada de Laplace na Equação 3.2, tem-se:

$$P_{res} = m \cdot C \cdot sT(s) + h_{ar} \cdot A \cdot T(s) \quad (3.3)$$

Assim, obtém-se a função de transferência apresentada pela Equação 3.4, que descreve a dinâmica da temperatura da água no tanque 1 a medida que se fornece energia para a resistência.

$$\frac{T(s)}{P_{res}} = \frac{1}{\frac{m_1 \cdot C}{h_{ar} \cdot A} s + 1} \quad (3.4)$$

Com o objetivo de reduzir as perdas de calor para o ambiente, o tanque em questão é fechado. Como a temperatura da água nesse recipiente é consideravelmente mais elevada do que a temperatura do ar, e esse se apresenta obstruído nas seis faces, foi necessário considerar a perda de calor por convecção entre suas paredes e o ar, embora essas apresentem baixa condutividade térmica.

Como é possível observar, a temperatura é a saída da função de transferência, bem como sua entrada é a potência cedida pela resistência.

### 3.2.2 Tanque 2

O processo de obtenção das equações que descrevem a dinâmica do tanque 2 se deu de forma similar à vista acima. Conforme já citado, a energia absorvida pela água em nesse recipiente advém da água aquecida pela resistência elétrica. Como esse tanque possui uma face aberta, deve-se considerar a perda de calor por convecção em tal área. Logo tem-se a Equação 3.5:

$$\dot{Q}_q = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{conveccao2} \quad (3.5)$$

Onde:

- $\dot{Q}_q$  = quantidade de calor cedida pela água quente por segundo ( $J/s$ );
- $\dot{Q}_2$  = quantidade de calor absorvida pela água do tanque 2 por segundo ( $J/s$ );
- $\dot{Q}_{conveccao2}$  = quantidade de calor perdida pelo tanque 2 por convecção para o meio ( $J/s$ ).

De 3.5 pode-se inferir:

$$\dot{Q}_q = m_2 \cdot C \cdot \frac{\delta T}{\delta t} + h_{ar} \cdot A_2 \cdot (T_{p2} - T_f) \quad (3.6)$$

Onde:

- $m_2$  = massa de água presente no tanque 2 (Kg);
- $A_2$  = área da região de contato entre água e ar ( $m^2$ );
- $T_{p2}$  = temperatura da água presente no tanque 2 ( $^{\circ}C$  ou K);

Aplicando a Transformada de Laplace, tem-se:

$$\frac{T(s)}{\dot{Q}_q} = \frac{\frac{1}{h_{ar} \cdot A_2}}{\frac{m_2 \cdot C}{h_{ar} \cdot A_2} s + 1} \quad (3.7)$$

É possível observar que a entrada  $Q_q$  está relacionada com a potência das bombas que serão utilizadas, o que será tratado mais a frente.

Como a temperatura do tanque dois,  $28^{\circ}C$ , é muito próxima da temperatura ambiente e o vidro possui baixa condutividade térmica, a perda por convecção entre as paredes do tanque e o ambiente é desprezível.

### 3.3 Definição das dimensões dos tanques

Conforme pode ser verificado nas Equações 3.4 e 3.7, a modelagem dos tanques foi feita em função das variáveis que influenciam no processo. Esse procedimento possibilita modelar a planta para diversas dimensões. Como se trata de um protótipo, definiu-se medidas que possibilitassem simular o ambiente em questão, apresentando constantes de tempo relativamente elevadas, cerca de 5.700 segundos para o tanque 1 e 42.000 para o segundo (em malha aberta), e que possuísse fluido o bastante para permitir as correntes

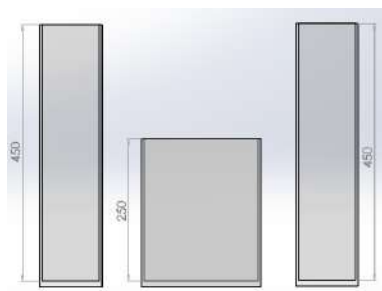


Figura 3.3: Vista frontal dos tanques

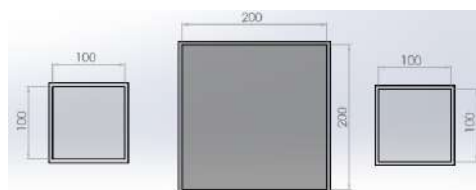


Figura 3.4: Vista superior dos tanques

de convecção geradas com o auxílio da bomba. Para atender a esses critérios, calculou-se as dimensões apresentadas nas Figuras 3.3 e 3.4 .

Como pode ser visto na Figura 3.3, a altura dos tanques 1 e 3 é de 450 mm, onde apenas 350 mm serão preenchidos com água. De acordo com a Equação 3.8, é possível calcular o volume de água presente nos mesmos.

$$V_1 = V_3 = A_b \cdot h_1 = 3500 \text{ cm}^3 = 3,5L \quad (3.8)$$

De forma análoga, é possível calcular o volume de água presente no tanque 2, onde apenas 200 mm dentre os 250 mm de altura disponíveis serão preenchidos, Equação 3.9.

$$V_2 = A_b \cdot h_2 = 8000 \text{ cm}^3 = 8L \quad (3.9)$$

Onde:

- $A_b$  = Área da base do tanque ( $m^2$ );
- $h_1$  = Altura da coluna de água no tanque 1( $m$ );
- $h_2$  = Altura da coluna de água no tanque 2( $m$ ).

Para definir qual o material de fabricação dos tanques, levou-se em consideração a condutividade térmica dos materiais, procurando selecionar aquele com maior dificuldade de ceder calor para o meio.

Tem-se na Tabela 3.1 abaixo os valores da condutividade de alguns possíveis materiais para a construção da planta.

Tabela 3.1: Condutividade Térmica H. D. YOUNG (1992)

MATERIAL	CONDUTIVIDADE TÉRMICA ( $W/m.K$ )
Alumínio	205
Ferro	79,5
Vidro comum	0,8

Com esses dados, definiu-se que o vidro como material para a construção dos tanques. Além de comportar-se como isolante térmico, há ainda a vantagem de viabilidade econômica apresentada por tal equipamento.

Tendo as dimensões dos reservatórios e a quantidade de água presente em cada tanque definidas, é possível chegar às Funções de Transferência do processo, substituindo os valores nas Equações 3.4 e 3.7. Como densidade da água é de aproximadamente 1g/ml para a temperatura ambiente WEAST (1984), através da volume de fluido presente no tanque, pode-se calcular sua massa. Conseqüentemente, tem-se as Equações 3.10 e 3.11 representando as modelagens dos tanques 1 e 2, respectivamente.

$$\frac{T(s)}{P_{res}} = \frac{0,68}{5700s + 1} \quad (3.10)$$

$$\frac{T(s)}{\dot{Q}_q} = \frac{1,25}{42.000s + 1} \quad (3.11)$$

## 3.4 Projeto dos Controladores

### 3.4.1 Tanque 1

A Função de Transferência para o primeiro tanque é apresentada pela Equação 3.10. As características de projeto foram fixadas em 10% de *overshoot* e tempo de acomodação de 250 segundos, visto que com tais valores consegue-se uma dinâmica mais rápida quando comparada ao Tanque 2. Através das Equações 2.1 e 2.2 foi possível determinar o coeficiente de amortecimento  $\zeta$  do sistema e sua frequência natural não amortecida  $\omega_n$ . Com essas constantes, determinou-se a localização dos polos de malha fechada da planta, através da Equação 2.3. Os valores são mostrados abaixo.

- $\omega_n = 2,71 \cdot 10^{-2}$  e  $\zeta = 0,59$ ;
- Polo de malha fechada =  $-1,5989 \cdot 10^{-2} + j2,188 \cdot 10^{-2}$ ;
- Polo de malha fechada =  $-1,5989 \cdot 10^{-2} - j2,188 \cdot 10^{-2}$ ;

Com a localização dos polos de malha fechada determinada, projetou-se um compensador em avanço-atraso, dado pela Equação 3.12



$$G_c(s) = \frac{10,75s + 0,002925}{s^2 + 0,03198s}; \quad (3.12)$$

Na Figura 3.5, tem-se o lugar das raízes para o sistema compensado. Nela, é possível observar que os polos de malha fechada estão situados na parte que garante a resposta com os critérios de desempenho desejados. O polo de malha fechada próximo à origem é anulado pelo efeito do zero do controlador.

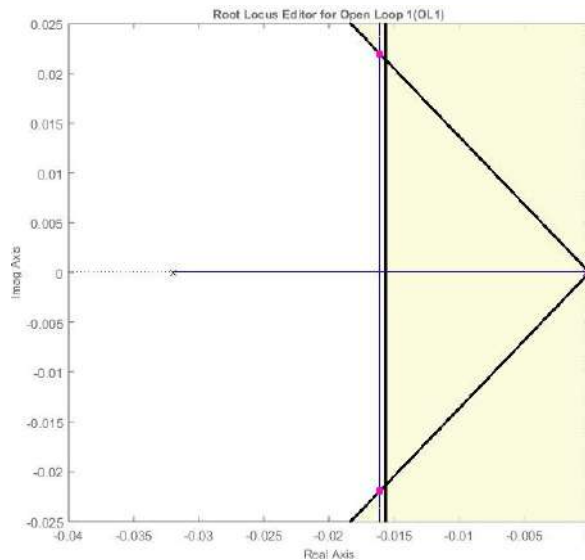


Figura 3.5: Lugar das raízes para o tanque 1

A resposta ao degrau para o sistema em malha fechada com o controlador projetado pode ser verificada na Figura 3.6. Fisicamente, o degrau simula a inserção, no Tanque 1, de água com temperatura inferior ao ponto ótimo adotado (35°C).

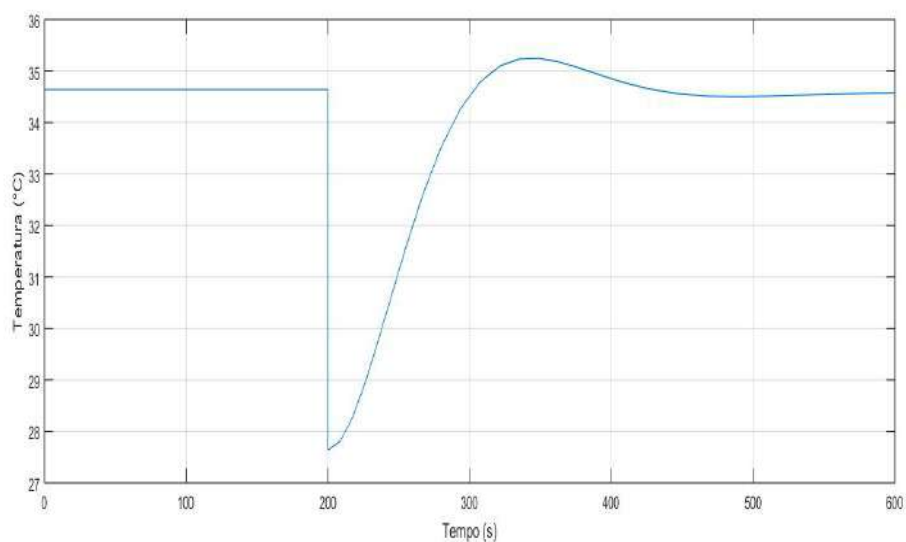


Figura 3.6: Resposta ao degrau para o tanque 1

Como pode ser observado na Figura 3.6, a planta encontrava-se próxima à referência quando sofreu uma perturbação (em 200 segundos). O sistema comportou-se conforme especificado, retornando ao ponto de operação apresentando menos de 10 % de *overshoot* e tempo de acomodação próximo de 200 segundos para o critério de 2 %.

### 3.4.2 Tanque 2

A Função de Transferência do tanque 2 é apresentada na Equação 3.11. Para esse reservatório, os critérios de desempenho são 2% de *overshoot*, visto que a temperatura deve estar sempre próxima de 28°C, e tempo de acomodação de 1000 segundos, visto que os peixes não devem ser submetidos à mudanças de temperatura rápidas. Com tais constantes e através das Equações 2.1 e 2.2, foi possível determinar o fator de amortecimento e a frequência natural não amortecida do sistema.

- $\omega_n = 5,13 \cdot 10^{-3}$ ;
- $\zeta = 0,78$ ;
- Polo de malha fechada =  $-4,10^{-3} + j3,21 \cdot 10^{-3}$ ;
- Polo de malha fechada =  $-4,10^{-3} - j3,21 \cdot 10^{-3}$ ;

Com a determinação da localização dos polos de malha fechada do sistema, projetou-se um compensador avanço-atraso, que pode ser visto na Equação 3.13

$$G_c(s) = \frac{0,79s + 1,88099 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 7,57 \cdot 10^{-3}s}; \quad (3.13)$$

$G_c(s)$  pode ser escrita na forma de um controlador PID, através do comando *PID* no MATLAB, o que resulta na Equação 3.14.

$$G_c(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{s}{T_f s + 1} = 104 + 0,00248 \frac{1}{s} - 1,37 \cdot 10^4 \frac{s}{132s + 1}; \quad (3.14)$$

Na Figura 3.7, tem-se o lugar das raízes para o sistema compensado. Nela, é possível observar que os polos de malha fechada estão situados na parte que garante a resposta com os critérios de desempenho desejados. O polo de malha fechada próximo à origem é anulado pelo efeito do zero do controlador.

A resposta à entrada degrau para a Função de Transferência do tanque 2, em malha fechada com o compensador pode ser observada na Figura 3.8. Nela, é possível observar o comportamento da planta quando insere-se água às temperaturas de 26°C (250 segundos) 30°C(em 1500 segundos) no recipiente. Para as duas simulações, os critérios de *overshoot* e tempo de acomodação foram respeitados.

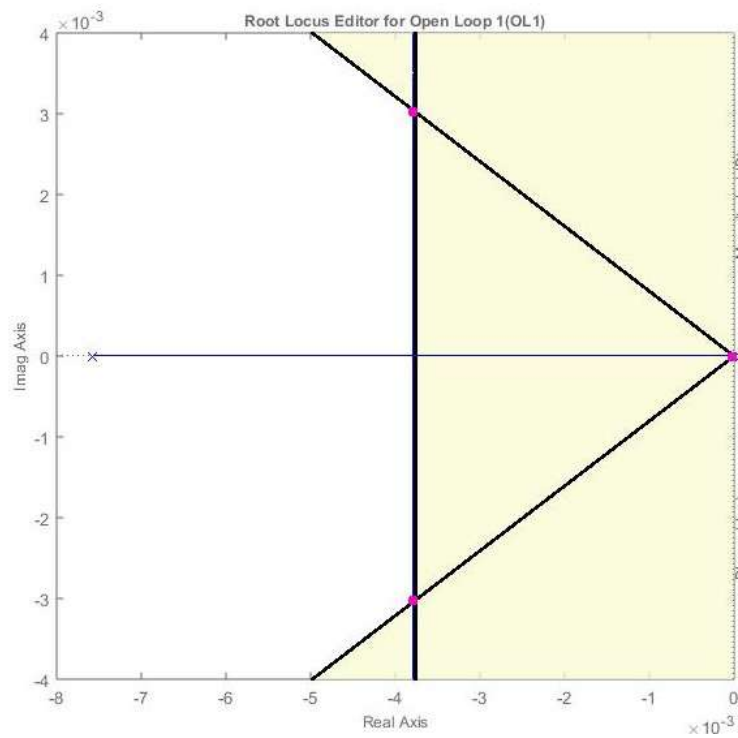


Figura 3.7: Lugar das raízes para o tanque 2

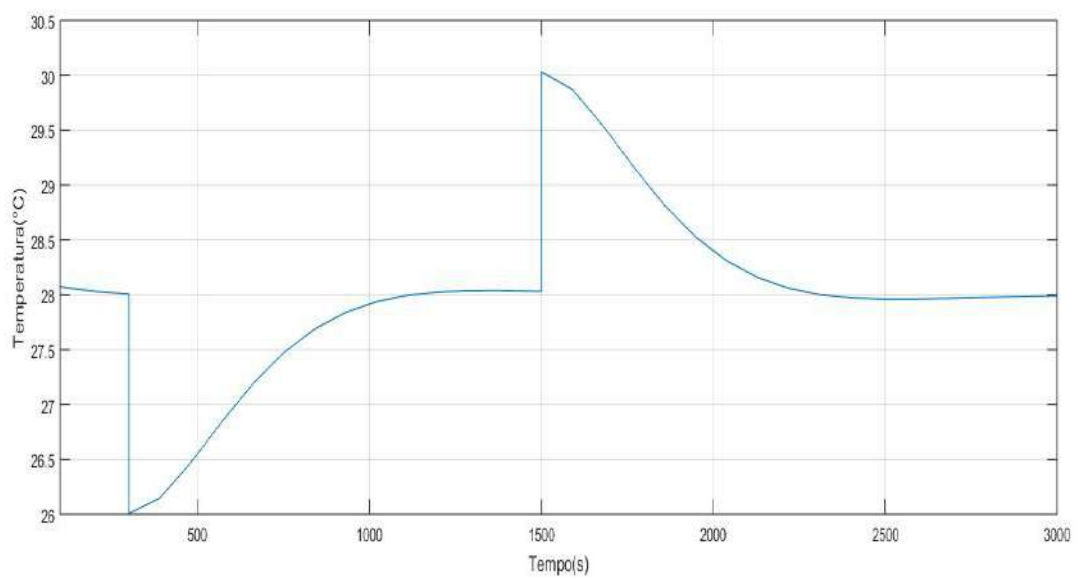


Figura 3.8: Resposta ao degrau para o tanque 2

Os cálculos detalhados usados para projetar os controladores são mostrados no Apêndice A.

## 3.5 Definição dos Atuadores

Com a definição das Funções de Transferência dos tanques e de seus controladores, Equações 3.10 e 3.11, faz-se necessário dimensionar os atuadores, de forma que esses consigam levar a planta para seu ponto de operação sem apresentar saturação.

### 3.5.1 Resistência

Para o primeiro tanque, definiu-se que sua temperatura seria controlada em  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pois dessa maneira consegue-se transferir calor para o tanque 2 sem que haja um grande choque térmico para os peixes durante o bombeamento dessa água, bem como durante as trocas de calor por convecção pelas correntes do fluido. Como no momento da transferência de fluido para o tanque 2, o primeiro também recebe água a  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , faz-se necessário que sua dinâmica se apresente mais rápida, impossibilitando que a perturbação (água a  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) diminua a temperatura do primeiro reservatório.

Com o auxílio do MATLAB, foi possível estimar qual a potência necessária para a resistência elétrica, Figura 3.9. Esse dado foi coletado a partir do sinal de controle necessário para que a resposta do sistema fosse apresentada de acordo com a Figura 3.6.

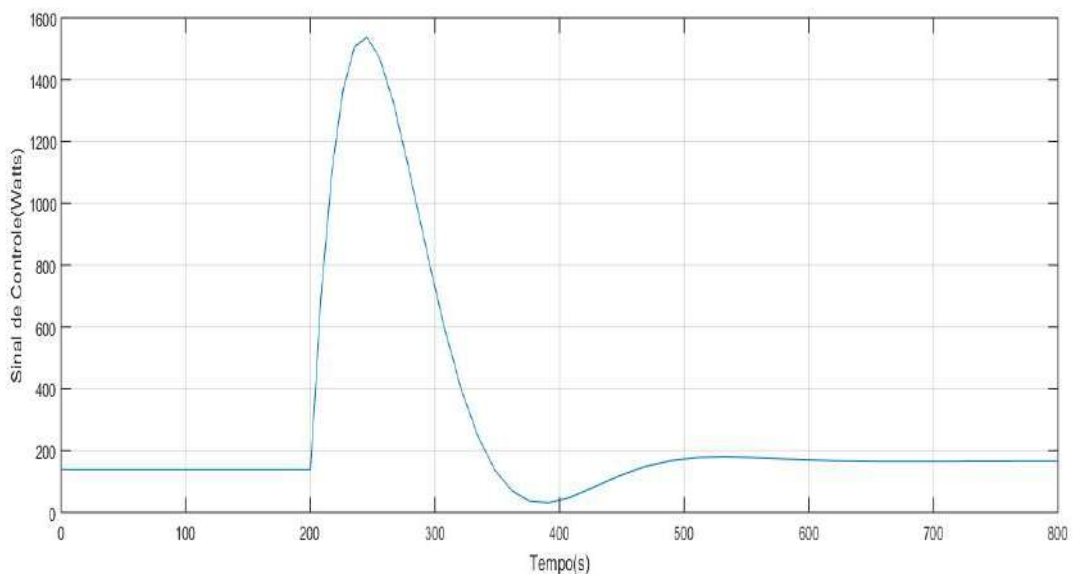


Figura 3.9: Sinal de controle necessário para atender aos critérios de desempenho

Como a entrada da Função de Transferência do primeiro tanque é a potência fornecida pela resistência (em Watts), faz-se necessário que o atuador possa fornecer, no mínimo, 1600 Joules por segundo para que os critérios de desempenho sejam atendidos.

Nesse contexto, definiu-se a resistência elétrica Lorenzetti, conforme Figura 3.10



Figura 3.10: Resistência Elétrica Fonte: MERCADOLIVRE<sup>1</sup>

O atuador possui potência de 4000 W e tensão nominal de 220 V.

### Acionamento da resistência elétrica: Relé de Estado Sólido

De acordo com a *NovusAutomation*, relés de estado sólidos não possuem componentes mecânicos, apresentando diversas vantagens sobre os relés eletromecânicos convencionais: não dispõe de ruído elétrico, faíscas ou desgaste mecânico, além de possuir isolamento óptico entre comando e potência.

Com o relé de estado sólido, busca-se fazer o chaveamento da tensão advinda da rede, de modo que, de acordo com a frequência de chaveamento, consiga-se variar a diferença de potencial entre os terminais da resistência, seguindo o mesmo princípio do PWM.

Dentre as características que devem ser levadas em consideração no momento de definir qual relé utilizar, destacam-se: qual a corrente máxima que o mesmo consegue suportar, bem como qual a máxima frequência que o mesmo consegue chavear. Nesse contexto, o relé dimensionado para o projeto foi o SSR-25, conforme Figura 3.11.



Figura 3.11: Relé de Estado Sólido ALEXNLD<sup>2</sup>

De acordo com o *datasheet* do produto, o mesmo possui corrente nominal de 25A, podendo chavear de 24 a 380 V AC, sendo acionado por apenas 3 V DC. Como a resistência de chuveiro apresenta-se como uma carga puramente resistiva, pode-se calcular a corrente que fluirá pela mesma de acordo com a Equação 3.15.

<sup>1</sup>Disponível em <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-665385131-resistncia-chuveiro-tipo-lorenzetti> Acesso em abril de 2017

<sup>2</sup>Disponível em <http://alexnlld.com/product/ssr-25da-ssr-solid-state-relay-25a-output-ac24-380v/> Acesso em abril de 2017

$$P_r = U_r \cdot I_r \quad (3.15)$$

Onde:

- $P_r$  = Potência nominal da resistência elétrica ( $W$ );
- $U_r$  = Tensão a que a resistência será submetida ( $V$ );
- $I_r$  = Corrente que fluirá pela resistência ( $A$ ).

Como os valores de potência e tensão são 4000W e 220 V, a corrente que flui pela resistência é de aproximadamente 18,2 A. Ainda de acordo com o *datasheet*, para acionar o SSR-25 DA é necessário, no mínimo, 3 V e 7,5 mA.

Porém, o documento não apresenta qual a frequência máxima que o relé consegue chavear. Logo, fez-se necessário realizar um experimento: com a auxílio de um Arduino, variou-se o *Duty Cycle* de um PWM e mediu-se a tensão na carga, Tabela 3.2. O relé foi alimentado com uma tensão de 127,8 V AC.

Tabela 3.2: Variação de PWM e tensão da rede

Duty Cycle %	Tensão na carga (V)
1	1,4
2	38
5	43
10	53
20	68
30	79
40	89
50	98
60	106
70	113
80	119
90	127,1
98	127,8
100	127,8

Com os dados coletados, é possível inferir que o relé dimensionado consegue chavear na frequência do PWM em questão (500 Hz), visto que, à medida em que se aumenta o *duty cycle* do sinal (de 0 a 100%), a tensão sobre a carga também aumenta, tendo seu valor máximo apenas quando se chega em 98% de *duty cycle*. A ausência de componentes mecânicos para comutar aumenta consideravelmente a vida útil do relé.

### 3.5.2 Bombas de Água

Para que o tanque 2 possua a dinâmica apresentada na Figura 3.8, é necessário que os atuadores possam fornecer um sinal de controle de 170 Watts, conforme Figura 3.12.

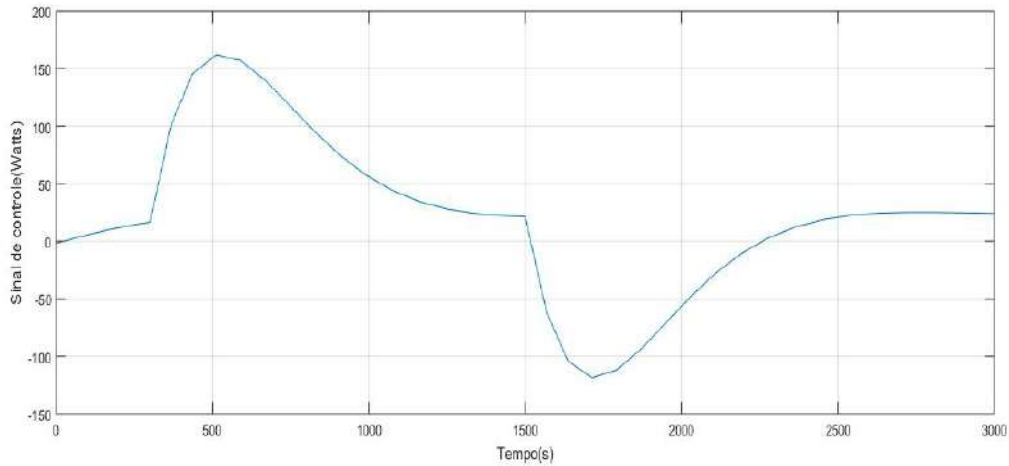


Figura 3.12: Sinal de controle necessário para atender aos critérios de desempenho

A Função de Transferência do segundo tanque apresenta como entrada a quantidade de calor fornecida pela água quente. Como o valor mínimo necessário é de 170 Watts, dimensionou-se as bombas necessárias para o projeto por meio de sua vazão mássica, conforme as Equações 3.16, 3.17 e 3.18

$$P_{bomba} = \dot{m}_q \cdot C_{gua} \cdot (T_q - T_{fr}) \quad (3.16)$$

Onde:

- $T_q$  = temperatura da água quente =  $35^\circ\text{C}$ ;
- $T_{fr}$  = temperatura da água no tanque 2 =  $28^\circ\text{C}$ ;
- $C_{gua} = 4200 \left( \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$ .
- $P_{bomba}$  = Potência da bomba = 170 Watts.

Logo:

$$\dot{m}_q \cdot 4200 \cdot (35 - 28) = 170 \quad (3.17)$$

$$\dot{m}_q = 5,78 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (3.18)$$

Como a densidade de água é de  $1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ , a bomba necessita de uma vazão de, no mínimo,  $5,78 \frac{\text{mL}}{\text{s}}$ . Com esse valor, definiu-se que as bombas utilizadas seriam do modelo *Brushless DC Pump*, conforme Figura 3.13



Figura 3.13: Modelo de bomba Fonte:MERCADOLIVRE<sup>3</sup>

De acordo com o fabricante, a tensão de trabalho da bomba é de 12 V, com uma corrente nominal máxima de 0,35 A e vazão máxima de 60 ml/s. Porém, o mesmo não fornece os valores de vazão quando insere-se menor tensão em tal equipamento. Por conseguinte, fez-se necessário realizar ensaios para adquirir esses valores. O teste seguiu a seguinte metodologia: variou-se o PWM de saída do microcontrolador, cronometrando o tempo em que determinado volume era preenchido com água. Foi necessário inserir uma restrição no canal de saída das bombas, visto que a vazão mínima das mesmas era em torno de 10 ml/s, valor acima do sinal de controle demandado para manter a planta em seu ponto de operação. O resultados são apresentados na Tabela 3.3

Tabela 3.3: Variação da saída analógica e vazão da bomba de água

Saída analógica	VAZÃO ( <i>mL/s</i> )
64	2,9
85	4,4
106	5,2
128	5,8
149	6,5
170	7,3
191	7,8
220	8,8
255	9,2

### Acionamento das bombas: Módulo Ponte H-L298N

Para acionar as bombas, definiu-se o módulo de ponte H-L298N, visto que o mesmo consegue alimentá-las com valores de 0V a 12V, de acordo com tensão aplicada em uma de suas entradas, mais especificamente o pino *ENABLE*. O princípio usado para acionar as bombas é o PWM, onde a entrada da ponte H recebe 0V ou 5V com determinada largura de pulso, possibilitando que em sua saída tenha-se o valor correspondente com a mesma largura de pulso, porém com sinais de 0V ou 12V, Figura 3.14.

<sup>3</sup>Disponível em [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-707583402-bomba-de-agua-submersa-12v-dc-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-707583402-bomba-de-agua-submersa-12v-dc-_JM) Acesso em outubro de 2017



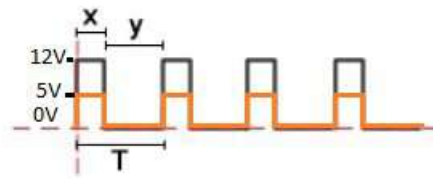


Figura 3.14: Alimentação e tensão de saída da ponte H VIDADESILICIO<sup>4</sup>

Variando o período em que o sinal de saída do microcontrolador está em nível lógico alto, tem-se uma faixa de tensão na saída da ponte H (entre 0V e 12 V), a partir de um sinal digital. Tem-se, na Figura 3.15, o modelo selecionado.

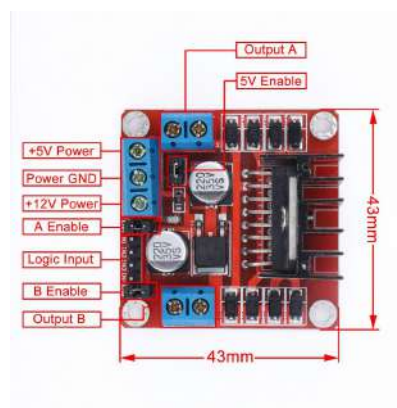


Figura 3.15: Ponte H-L298N Fonte:ALIBABA<sup>5</sup>

A Tabela 3.4 apresenta os dados de tal circuito, de acordo com seu *datasheet*.

Tabela 3.4: Dados referentes à Ponte H-L298N

GRANDEZA	Ponte H-L298N
Alimentação	até 46 V
Limite de temperatura	-20°C a 135°C
Frequência de comutação	até 40 KHz

A partir desses valores, é possível constatar que o dispositivo consegue alimentar as bombas (12 V), bem como possuem frequência de chaveamento bem mais alta do que a frequência do sinal gerado a partir do microcontrolador, cerca de 1KHz, o que será tratado mais à frente.

<sup>4</sup>Disponível em <http://blog.vidadesilicio.com.br/arduino/ponte-h-l298n-controle-velocidade-motor/> Acesso em maio de 2017

<sup>5</sup>Disponível em <https://portuguese.alibaba.com/wholesale/Atacado-l298n-motor-driver-datasheet.html> Acesso em maio de 2017

## 3.6 Definição dos Sensores

### 3.6.1 Sensor de Temperatura

Inicialmente, propôs-se três sensores: LM35, Termistor e DS18B20, sendo que utilizar-se-ia aquele que apresentasse melhores características na medição. Dentre os critérios de avaliação, é possível citar o desvio padrão e o coeficiente de variação apresentado pelos sensores. O experimento comparativo dos três medidores, consistiu em analisar 40 medidas coletadas pelos sensores à temperatura de 25°C, conforme Tabela 3.5 (MARTINAZZO, 2016, P.101).

Tabela 3.5: Comparação entre sensores de temperatura

SENSOR	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
Termistor	24,68	0,04	0,16
LM35	24,41	0,14	0,57
DS18B20	25,06	0,00	0,00

No contexto apresentado pela Tabela 3.5, é possível constatar que, dentre os três sensores, o que apresenta maior precisão e confiabilidade é o DS18B20, Figura 3.16 .



Figura 3.16: DS18B20 Fonte:FILIFELOP<sup>6</sup>

De acordo com o seu *datasheet*, é possível observar os parâmetros característicos do DS18B20, apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Dados referentes ao DS18B20

GRANDEZA	DS18B20
Faixa de trabalho	-55°C a 125°C
Resolução/Precisão	9bits/0,5°C – 10bits/0,25°C 11bits/0,125°C – 12bits/0,0625°C
Tempo de conversão de Temperatura	9bits=93,75ms – 10bits=187,5ms 11bits=375ms – 12bits=750ms

<sup>6</sup>Disponível em <http://blog.filipeflop.com/sensores/sensor-de-temperatura-ds18b20-arduino.html> Acesso em maio de 2017

A partir desses números, infere-se que o sensor consegue trabalhar na faixa de temperatura proposta, em torno de 28°C. Além disso, é possível observar que o tempo de conversão da temperatura se adequa ao projeto, visto que a constante de tempo das Funções de Transferência são da ordem de minutos.

### 3.6.2 Sensor de pH

Para a medição do pH, definiu-se o módulo 1 pc PH V1.1, onde suas características podem ser verificadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Dados referentes ao sensor de pH

GRANDEZA	MÓDULO SENSOR DE pH V1.1
Alimentação	5 V
Faixa de medição	0 a 14 pH
Tempo de resposta	Menor/igual a 1 minuto
Precisão	0,1 pH (25°C)
Corrente	5 a 10 mA
Faixa de temperatura	-10°C a 50°C

Como o pH será apenas monitorado, esses parâmetros são considerados satisfatórios para a medição da presente grandeza, visto que o sensor consegue trabalhar com boa precisão em torno da temperatura do tanque em que se deseja coletar tal dado, 28°C.

O sensor pode ser verificado na Figura 3.17 .



Figura 3.17: Sensor de pH Fonte: BIDORBUY<sup>7</sup>

### 3.6.3 Microcontrolador

O microcontrolador do sistema foi escolhido de acordo com os seguintes parâmetros: resolução das entradas analógicas, velocidade de leitura de dados, tensão e corrente de saída e custo. De acordo com esses critérios, definiu-se o Arduino UNO para o desenvolvimento do trabalho, Figura 3.18 .

<sup>7</sup>Disponível em [http://www.bidorbuy.co.za/item/226193359/pH\\_Sensor\\_Module\\_Probe\\_test\\_code\\_sensor\\_Arduino.html](http://www.bidorbuy.co.za/item/226193359/pH_Sensor_Module_Probe_test_code_sensor_Arduino.html) Acesso em maio de 2017



Figura 3.18: Arduino Uno Fonte:WIKIPEDIA<sup>8</sup>

Com resolução de 10 bits no conversor D/A, consegue-se uma resolução de  $0,25^{\circ}\text{C}$  a partir do sensor DS18B20. Como a planta possui constante de tempo da ordem de minutos, a frequência de leitura das portas analógicas do Arduino, cerca de 10 KHz, é suficiente. Em se tratando do circuito de acionamento, é necessário uma tensão de 3V (no mínimo) para atuar o relé de estado sólido, bem como uma corrente de 7,5mA e as saídas digitais do microcontrolador em questão conseguem fornecer 5V e 40 mA, de acordo com seu *datasheet*.

### 3.6.4 *Display* LCD

Para permitir a visualização das grandezas monitoradas, definiu-se o *display* LCD 16x2, conforme Figura 3.19



Figura 3.19: *Display* LCD 16x2 Fonte:MERCADOLIVRE<sup>9</sup>

De acordo com seu *datasheet*, é possível constatar que o Display consegue operar dentro dos níveis de alimentação que o Arduino pode oferecer, bem como suportar a temperatura de  $35^{\circ}\text{C}$ , a qual a planta será submetida, Tabela 3.8.

## 3.7 Orçamento

Com todos os componentes listados acima, é possível calcular o custo total do projeto, apresentado na Tabela 3.9

<sup>8</sup>Disponível em <https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino>

<sup>9</sup>Disponível em <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-808278758-display-lcd-16x2-backlight-azul-e>  
JM Acesso em maio de 2017

Tabela 3.8: Dados referentes ao *Display* LCD 16x2

GRANDEZA	<i>Display</i> LCD 16x2
Tensão de operação	4,5V a 5,5V
Corrente de operação	1mA a 1.5mA
Temperatura de trabalho	-20°C a 70°C

Tabela 3.9: Orçamento

COMPONENTE	PREÇO (reais)
Display LCD 16x2	17,50
Ponte H L298N	15,50
DS18B20 (3 unidades)	30,00
Sensor de pH	81,33
Bombas de água (4 unidades)	44,00
Relé de Estado Sólido	12,00
Resistência elétrica	8,00
Arduino	23,00
Tanques de vidro	120,00
TOTAL	351,33

### 3.8 Considerações finais

No Capítulo 3, encontra-se todo o projeto da planta. Nele, definiu-se a dimensão dos tanques e seus modelos matemáticos. Houve ainda a definição dos sensores e atuadores utilizados. A partir da modelagem de todo o processo, os controladores foram projetados de acordo com critérios previamente estabelecidos.

## Execução do Projeto

O presente capítulo apresenta a calibração dos sensores e atuadores, validação dos modelos matemáticos levantados anteriormente e o teste dos controladores projetados para cada um dos tanques. Há ainda a discretização dos controladores, a fim de poder usá-los apenas com o microcontrolador, ou seja, sem o auxílio de computadores.

### 4.1 Calibração dos sensores e atuadores

#### 4.1.1 Calibração do sensor de temperatura DS18B20

Conforme dito anteriormente, a planta possui dois sensores de temperatura DS18B20, que fazem parte de sistemas em malha fechada. As duas malhas de controle trabalham em torno de 28 °C (tanque 2) e 35 °C (tanque 1); logo, os medidores devem apresentar exatidão e precisão em torno dessa faixa de trabalho.

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade dos dados coletados através do sensor DS18B20, realizou-se um experimento comparativo, onde o padrão adotado advinha do *Thermocouple Thermometer Fluke*, que possui exatidão de ordem de 0,05 % e resolução de 0,1°C, de acordo com o *datasheet* de seu fabricante. Tem-se, na Tabela 4.1, os dados coletados. O experimento contempla as curvas de subida e descida dos sensores, observadas na Figura 4.1, sendo possível verificar comportamento linear ao longo de toda região em que o experimento foi realizado.

Com os dados amostrados, é possível verificar histerese máxima de 0,3 °C, além de o sensor DS18B20 apresentar *offset* de 0,2 °C em relação ao padrão na curva crescente; já quando a temperatura foi tornando-se menor, algumas medidas apresentaram desvio de 0,1 °C quando comparadas ao *Fluke Thermometer*.

Tabela 4.1: Dados comparativos entre DS18B20 e sensor padrão

Fluke Thermometer °C	DS18B20 (curva de subida)	DS18B20 (curva de descida)
28	27,8	28
28,5	28,3	28,5
29	28,8	28,9
29,5	29,3	29,5
30	29,8	29,9
30,5	30,3	30,5
31	30,8	31
31,5	31,3	31,6
32	31,8	32,1
32,5	32,3	32,5
33	32,8	33
33,5	33,3	33,6
34	33,8	34
34,5	34,3	34,5
35	34,8	35
35,5	35,3	35,5
36	35,8	36
36,5	36,3	36,5
37	36,8	37
38	38,3	38
39	39,3	39

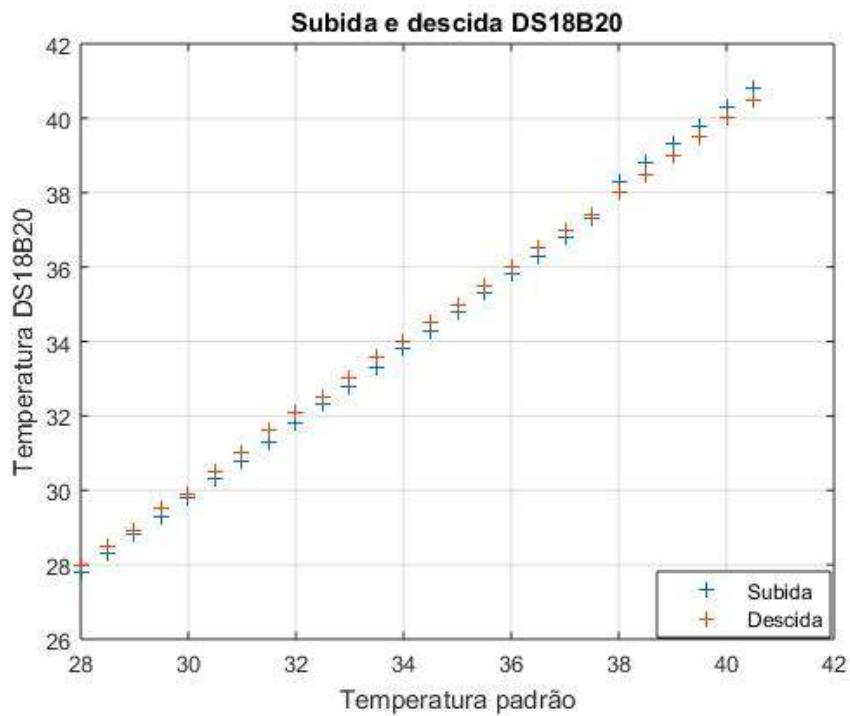


Figura 4.1: Histerese apresentada pelo DS18B20

### 4.1.2 Calibração da resistência elétrica

A resistência elétrica determinada para o processo dissipa uma potência máxima de 4400 Watts, e possui  $11 \Omega$ . A maior corrente que flui pela mesma é de 20 A, quando submetida a uma diferença de potencial de 220V. Entretanto, o sinal de controle máximo usado é de aproximadamente 1000 Watts; nesse contexto, o atuador foi submetido a uma diferença de potencial de 110 V, dissipando 1100 Watts (valor máximo), circulando 10 A pelo circuito.

Conforme mostrado na Equação 3.4, a Função de Transferência do Tanque 1 apresenta como sinal de entrada a potência cedida pela resistência elétrica. Entretanto, a saída analógica do microcontrolador utilizado (Arduino) atua em uma faixa de 0 a 5 volts, distribuídos em uma faixa de 256 inteiros; nesse contexto, fez-se necessário converter o sinal de saída do controlador projetado (watts), para uma faixa de 0 a 255.

Para que fosse possível realizar essa conversão, foi necessário realizar medições que relacionassem as duas grandezas envolvidas no processo. Variando a saída analógica do Arduino, coletou-se os valores de potência dissipada pela resistência, o que pode ser verificado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Calibração da resistência elétrica

Potência (Watts)	Inteiro	Potência (Watts)	Inteiro
0	0	390	130
16	1	415	140
33	10	441	150
64	20	484	160
86	30	529	170
110	40	576	180
138	50	625	190
163	60	676	200
182	70	729	210
210	80	784	220
232	90	841	230
268	100	900	240
298	110	961	250
333	120	1020	255

Através dos dados vistos acima, foi possível obter a curva de calibração do atuador, Figura 4.2 e Equação 4.1, onde  $y$  representa a quantidade de bits e  $x$  a potência dissipada.

$$y = -0,0001791.x^2 + 0,4285.x + 4,913 \quad (4.1)$$



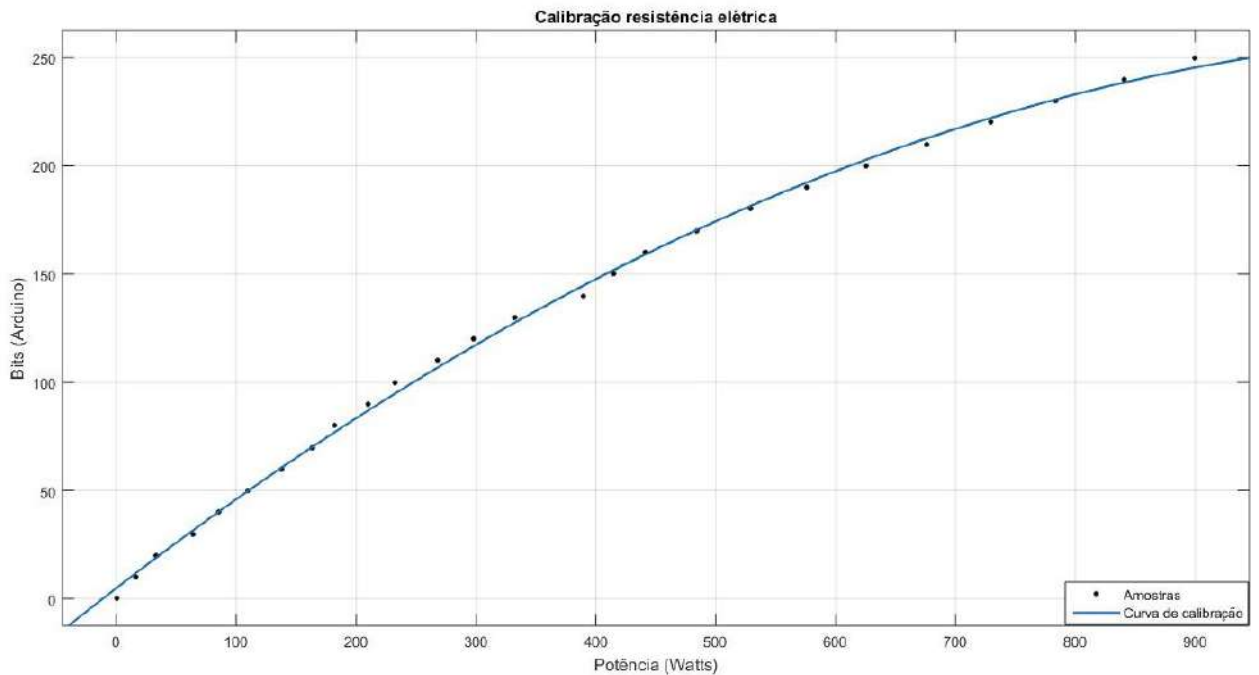


Figura 4.2: Curva de calibração

### 4.1.3 Calibração das bombas de água

As 4 bombas de água selecionadas para o projeto são de rotor magnético permanente, possuindo vida útil superior a 30.000 horas. Elas conseguem trabalhar em temperaturas próximas a 75 °C e apresentam vazão máxima de 240 L/h. Conforme dito no Capítulo 3, caso o recipiente que contém os peixes necessite receber calor, as bombas que permitem a troca de calor entre esse e o Tanque 1 são acionadas. Caso contrário, as bombas que realizam a troca de calor entre os reservatórios 2 e 3 são acionadas.

A Função de Transferência do Tanque 2 possui como entrada a quantidade de calor por unidade de tempo (potência) que a bomba consegue transmitir do Tanque 1 para o 2. Nesse contexto, fez-se necessário realizar a conversão de unidades de forma similar ao que foi feito com a resistência elétrica. Para efetuar a mudança de variáveis, foi preciso medir a vazão da bomba variando a saída digital do Arduino. Dessa maneira, tornou-se possível calcular a potência cedida ao reservatório através da Equação 3.16. Os dados são apresentados na Tabela 4.3.

Com as amostras, foi possível realizar a troca de variáveis, de forma que a saída do controlador, que se encontra em Watts, fosse convertida para um sinal entre 0 e 255, conforme pode ser verificado na Figura 4.3. A função que descreve tal conversão pode ser observada na Equação 4.3, onde  $y$  representa quantidade de bits e  $x$  a potência fornecida pela bomba.

Tabela 4.3: Calibração das bombas de água

Vazão (g/s)	Potência (Watts)	inteiro
2,9	86	64
4,4	129	85
5,2	153	106
5,8	171	128
6,5	191	149
7,3	215	170
7,8	229	191
8,8	259	213
9,0	265	234
9,2	270	255

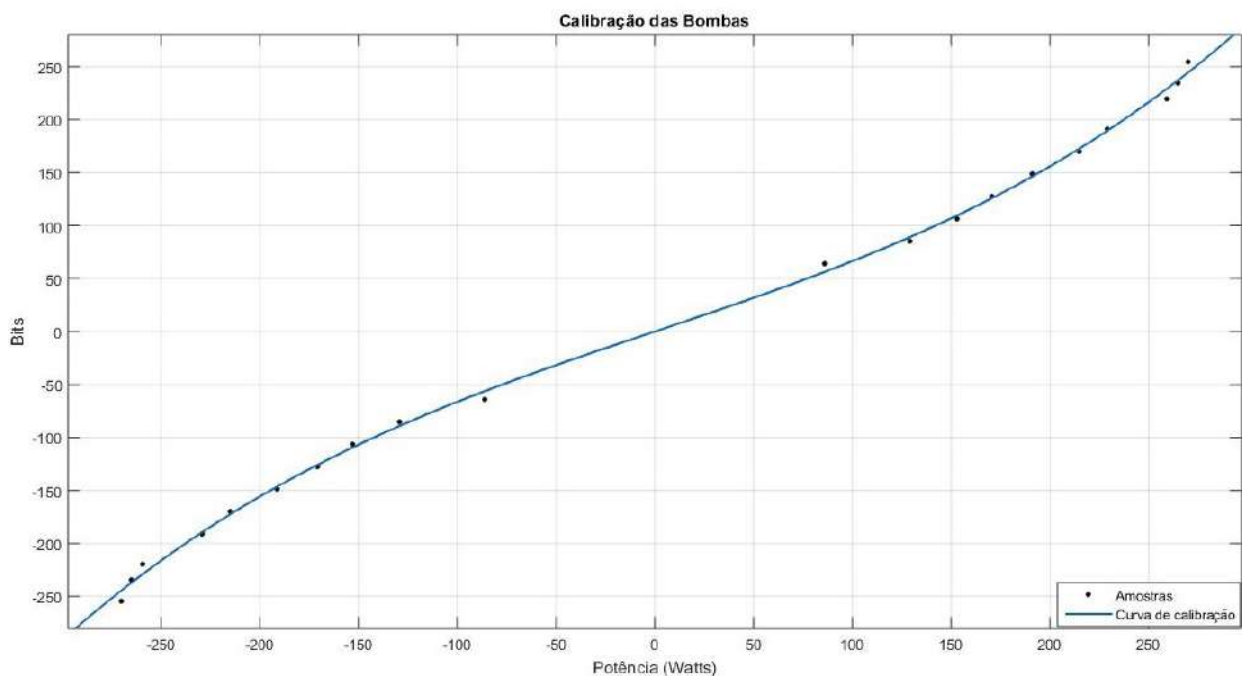


Figura 4.3: Curva de calibração

$$y = 3,838 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 5,697 \cdot 10^{-19} \cdot x^2 + 0,6258 \cdot x - 3,423 \cdot 10^{-14} \quad (4.2)$$

Embora não se tenha valores de potência negativos, os mesmos representam que o Tanque 2 necessita ceder calor para o meio, acionando as bombas que realizam a troca de calor entre esse e o Tanque 3, que contém água fria.

## 4.2 Tanque 1

### 4.2.1 Validação do modelo

A partir da planta montada, instrumentada e os sensores e atuadores calibrados, foi possível aplicar várias entradas no sistema e no modelo, a fim de verificar se esse descrevia a dinâmica daquele. Então, aplicou-se dois degraus na planta (o primeiro logo no início da simulação e o segundo com cerca de 6200 segundos); após decorridos 185 minutos, retirou-se os degraus aplicados. O mesmo procedimento foi realizado no modelo matemático, sendo possível verificar o comportamento de ambos na Figura 4.4. Nela, constata-se resultado satisfatório, visto que as constantes de tempo das duas curvas possuem valores muito próximos, além de tenderem para os mesmos valores finais, podendo-se dizer que o modelo foi validado.

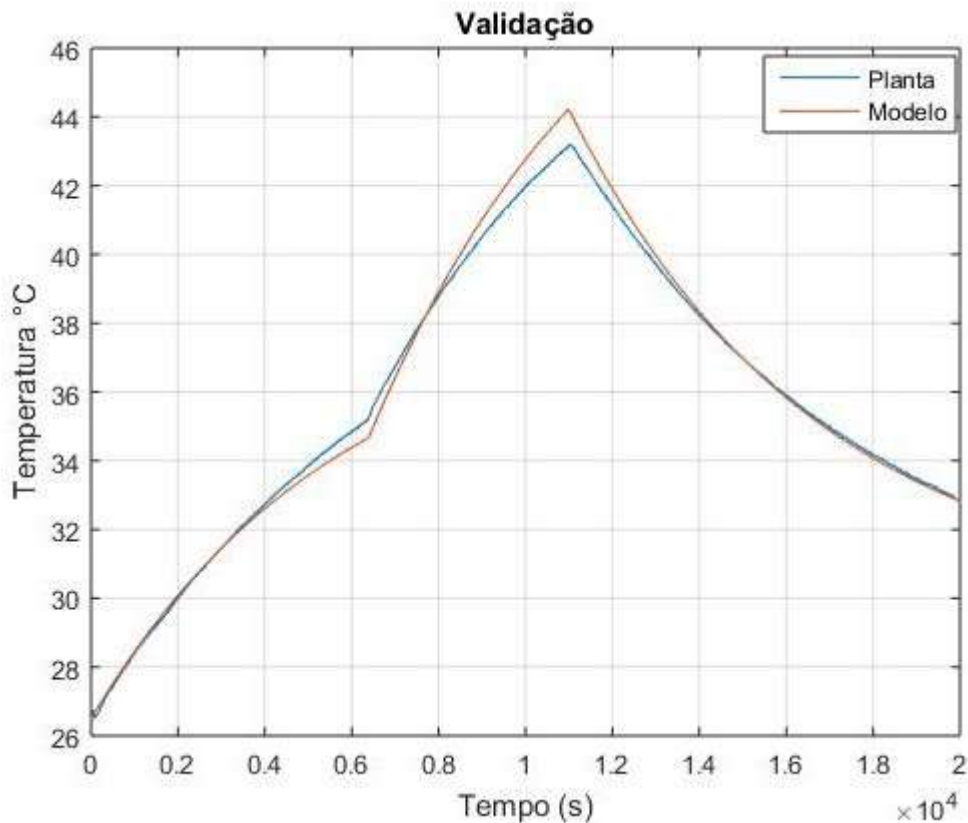


Figura 4.4: Validação do modelo

Entretanto, para atingir o resultado eficaz acima, foi necessário realizar um ajuste fino no ganho do modelo calculado, Figura 4.5. Multiplicou-se a função por 1,05, calculado dividindo-se o maior valor da curva em vermelho pelo maior valor da curva em azul.

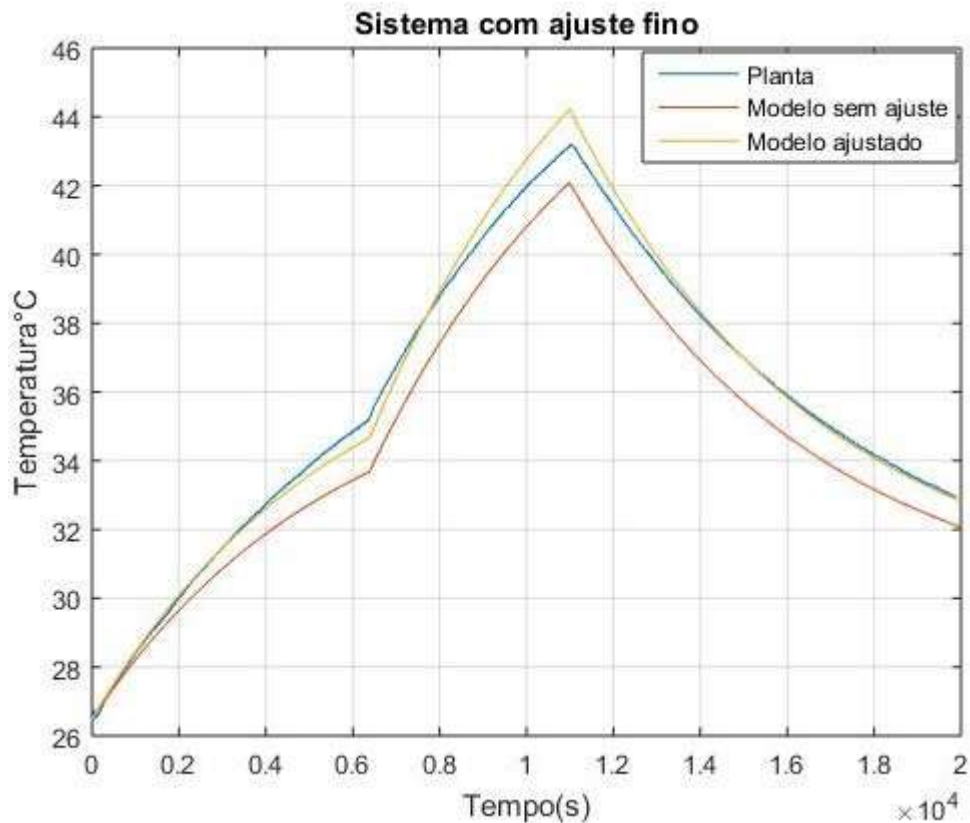


Figura 4.5: Ajuste fino realizado no modelo

### 4.2.2 Controlador

Embora o controlador projetado no Capítulo 3 tenha apresentado resultados satisfatórios nas simulações, foi necessário o projeto de outro compensador devido à falta de um atuador que resfriasse a água presente no reservatório; esse fato fez com que o sistema com 10 % de *overshoot*- conforme projetado anteriormente- demorasse muito a acomodar. O novo compensador foi projetado pelo método Lugar das Raízes, sendo que os polos do sistema em malha fechada não possuem componentes imaginárias, ou seja, não apresenta *overshoot*. O tempo de acomodação da planta é de 96 segundos. A Função de Transferência do novo compensador pode ser verificada na Equação 4.3.

$$G_c(s) = \frac{312.(s + 5,3.10^{-3})}{s} \quad (4.3)$$

Com o sistema em malha fechada, observou-se sua capacidade de ir para referência, bem como de rejeitar distúrbios. A resposta pode ser observada na Figura 4.6. Nela, constata-se que o controlador projetado apresenta resultados satisfatórios, visto que conseguiu levar o sistema para a referência (35°C). Nos pontos assinalados no gráfico, houve a inserção de perturbações (água a 25°C foi bombeada para o tanque), que foram rapidamente atenuadas.

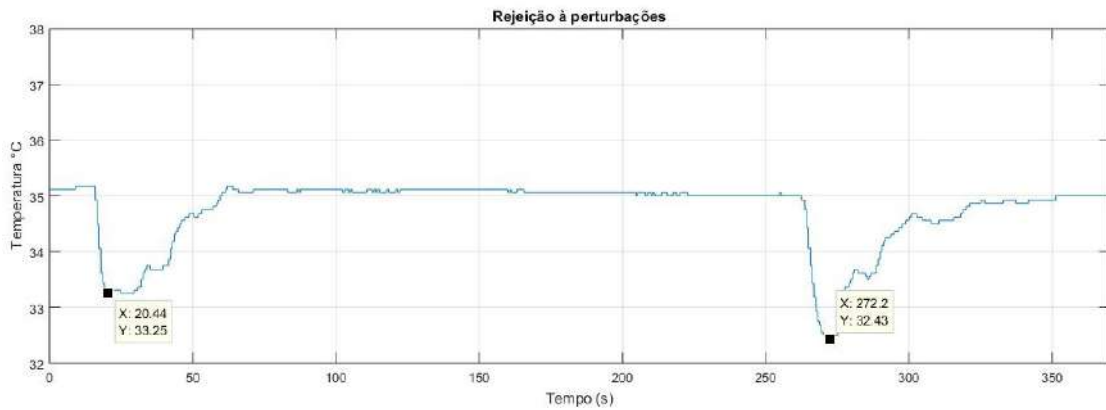


Figura 4.6: Sistema em malha fechada

Já na Figura 4.7, tem-se o sinal de controle, que encontrava-se em valores elevados quando os distúrbios foram aplicados, visto que a temperatura da água caiu consideravelmente. À medida em que a planta aproximava-se da referência, tal valor gradativamente diminuía.

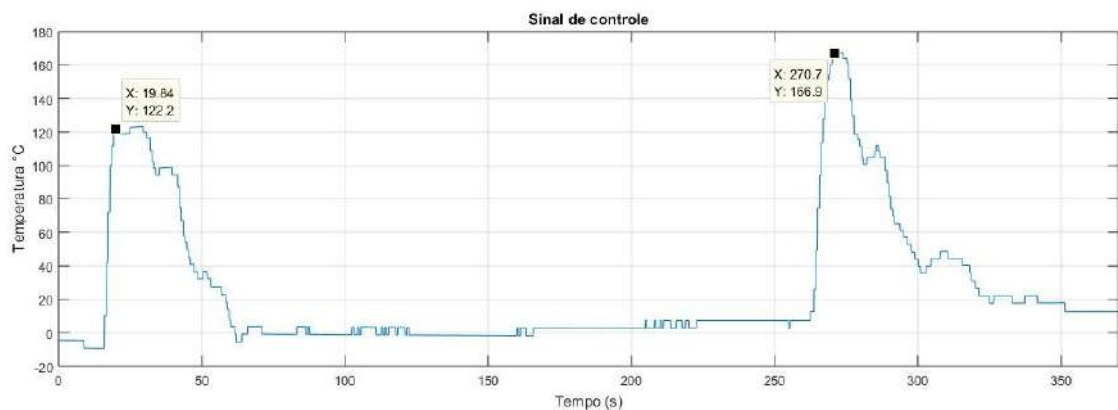


Figura 4.7: Sinal de controle

### 4.2.3 Controlador discreto

Após testar o compensador acima e verificar que o mesmo apresenta-se dentro dos parâmetros desejados, aplicou-se as teorias de Controle Digital. Tais métodos possibilitam ao sistema o ganho de processamento, além de torná-lo independente, ou seja, para seu funcionamento não há a necessidade de softwares e, conseqüentemente, computadores.

O primeiro passo foi determinar o período de amostragem do sistema; para tal, fez-se uso do Critério de Nyquist. Essa teoria afirma que a frequência de amostragem deve ser maior que, no mínimo, o dobro daquela apresentada pelo sinal que se deseja amostrar. Por conseguinte, através do diagrama de Bode, determinou-se a frequência de corte da planta em malha fechada, conforme Figura 4.8.

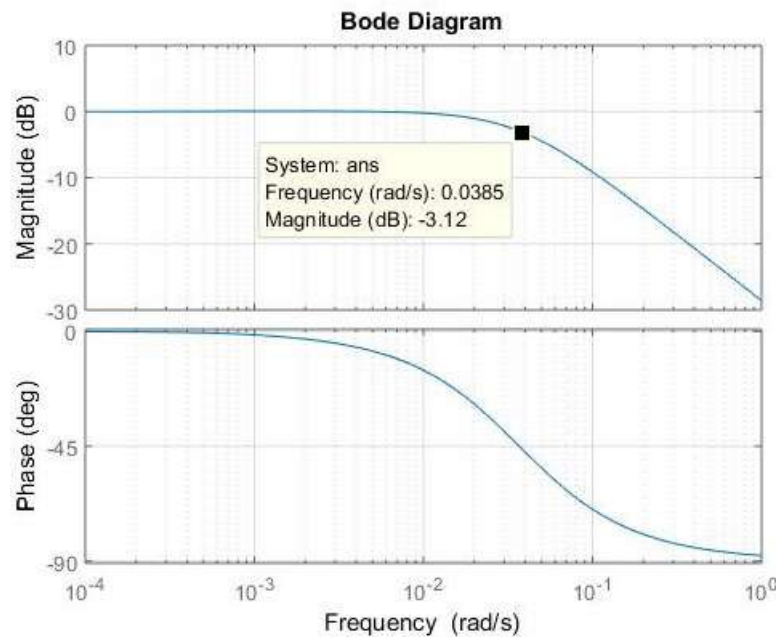


Figura 4.8: Frequência de corte do sistema em malha fechada

Como a frequência de corte do sistema está em torno de 0,0385 rad/s, o mesmo deveria ser amostrado com uma frequência mínima de 0,077 rad/s. Por conseguinte, o período de amostragem selecionado foi de 1,7 segundos.

O método de integração numérica utilizado para a discretização do controlador foi o Tustin, também conhecido como Regra Trapezoidal ou Transformação Bilinear. Com o período de amostragem e o método de integração definidos, foi possível calcular a Função de Transferência discreta no tempo do controlador contínuo, Equação 4.4.

$$G_c(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{312,21 \cdot (z - 0,9989)}{z - 1} \quad (4.4)$$

Para inserir a função de Transferência do compensador no microcontrolador, faz-se necessário o cálculo de sua Equação a Diferenças, mostrada nas Equações 4.5 e 4.6

$$U(z) = 312,21 \cdot E(z) - 311,866 \cdot z^{-1} E(z) + U(z) \cdot z^{-1} \quad (4.5)$$

$$u(k) = 312,21 \cdot e(k) - 311,866 \cdot e(k - 1) + u(k - 1) \quad (4.6)$$

Onde  $k$  representa amostras coletadas pelo microcontrolador,  $u$  o sinal de controle e  $e$  a função de erro do sistema em malha fechada.

Para verificar se a Equação 4.6 representa a função de transferência da Equação 4.4, comparou-se as duas funções em malha fechada com o modelo; como as respostas dos dois sistemas apresentaram exatamente a mesma dinâmica, Figura 4.9, é possível afirmar que os cálculos estão corretos.

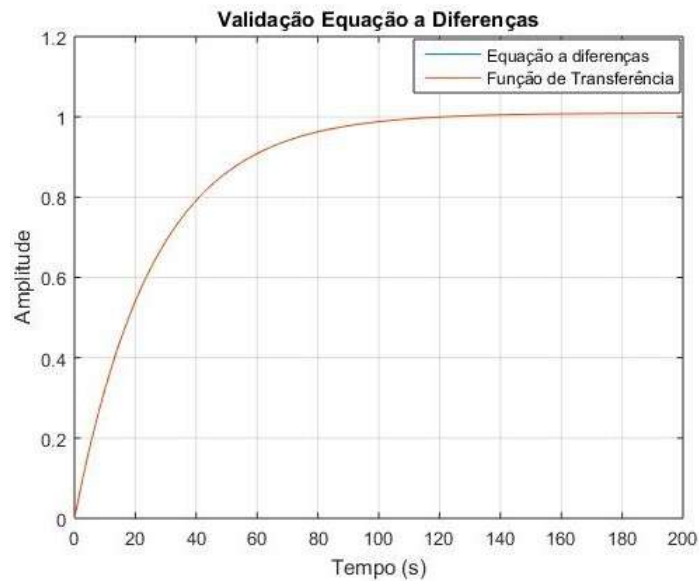


Figura 4.9: Malha fechada com Equação a diferenças e Função de Transferência

Com o controlador discreto em forma de uma equação a diferença, foi possível colocá-lo em malha fechada com a planta, Figura 4.10. Nela, é possível verificar a presença de 1.05 % de *overshoot* e um tempo de acomodação em torno de 90 segundos, para o critério de 2 %, considerados resultados satisfatórios. O teste consistiu em inserir diversas perturbações na planta. Como pode-se verificar na imagem, no início da simulação, a água encontrava-se em torno do ponto de operação ( $35^{\circ}\text{C}$ ), quando, de forma drástica, um líquido com temperatura mais baixa foi inserida no sistema.

Já na Figura 4.11, o sinal de controle demandado para rejeitar as perturbações inseridas na planta pode ser observado. Como se pode verificar, no instante em que a temperatura da água começou a diminuir, sinal de controle aumentou rapidamente, tornando-se menor na proporção em que o sistema aproximava-se de sua temperatura de referência,  $35^{\circ}\text{C}$ .

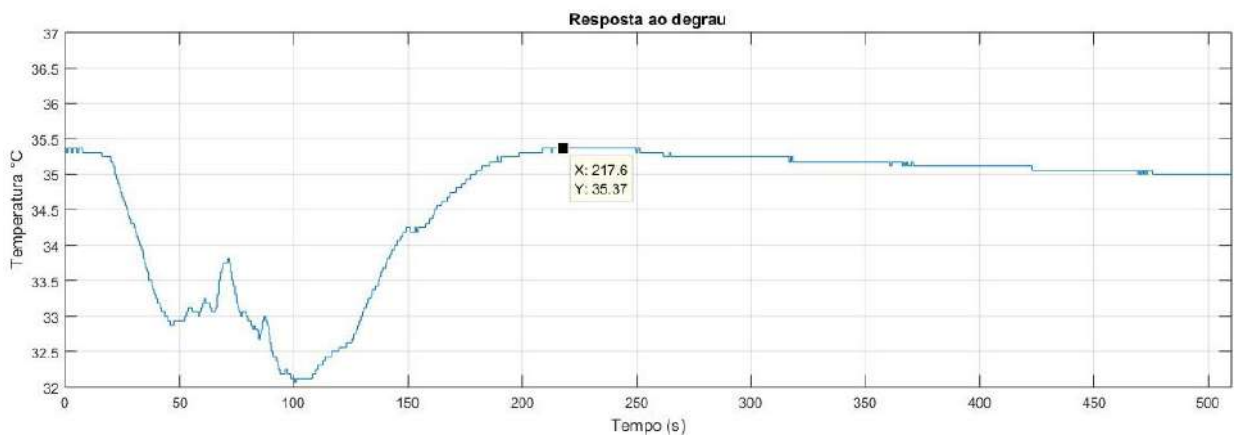


Figura 4.10: Planta em malha fechada com Equação a diferenças

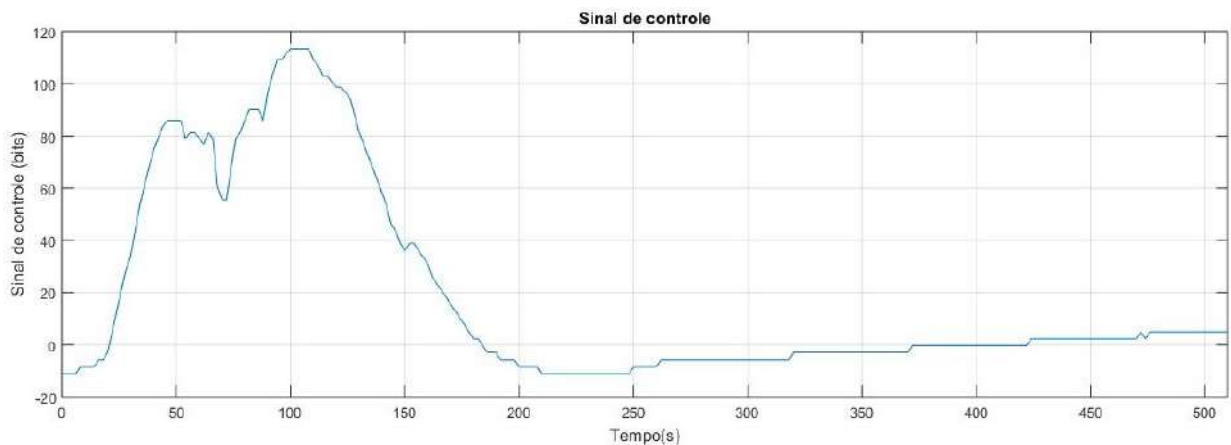


Figura 4.11: Sinal de controle

## 4.3 Tanque 2

### 4.3.1 Validação do modelo

Diversas entradas foram aplicadas no sistema com a finalidade de validar o modelo obtido no Capítulo 3. Os mesmos degraus aplicados na planta foram aplicados no modelo; a resposta obtida pode ser verificada na Figura 4.12.

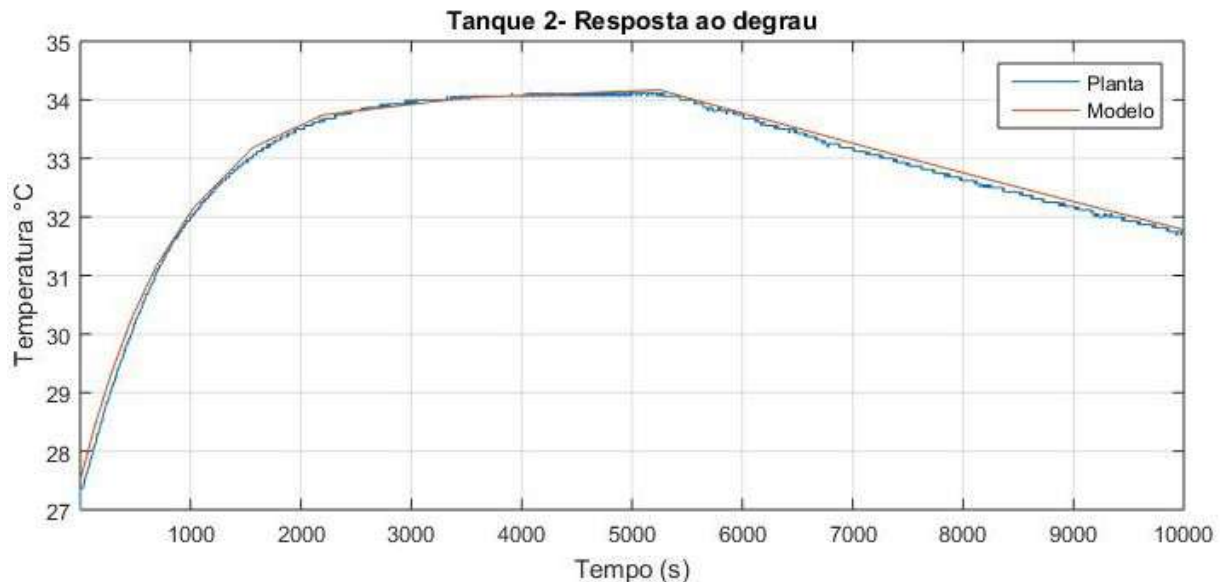


Figura 4.12: Validação da modelagem- Tanque 2

Através das curvas, é possível identificar que o modelo apresenta constante de tempo compatível com o sistema, bem como tende para valores finais muito próximos ao que ocorre com a planta. Outro fator importante a se destacar é a constante de tempo de descida, quando o degrau foi retirado; nesse momento (cerca de 5.200 segundos), percebe-se comportamento satisfatório do modelo, sendo possível constatar sua validação. Entretanto, foi necessário realizar ajuste fino de ganho para o mesmo, multiplicando-o por 1,2.



Tem-se, na Figura 4.13, o modelo após ajuste comparado ao inicialmente calculado.

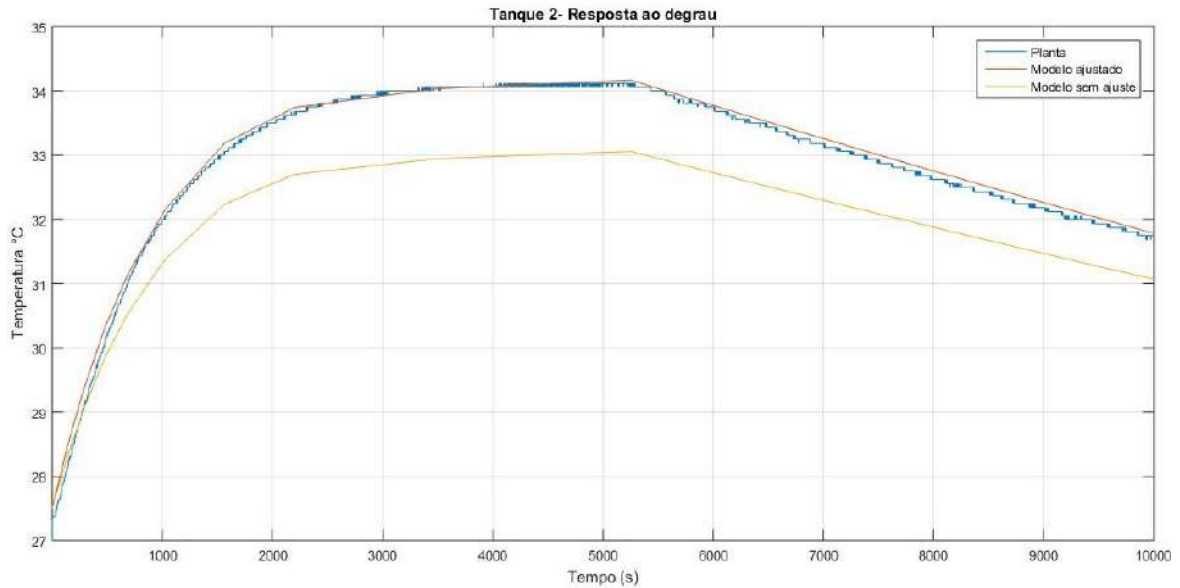


Figura 4.13: Comparativo entre modelos com e sem ajuste fino

### 4.3.2 Controlador

Embora o controlador projetado no Capítulo 3 tenha apresentado resultados satisfatórios em relação aos critérios de desempenho relacionados a ele, 2% de *overshoot* e 1000 segundos de tempo de acomodação, com a planta montada visualizou-se outro cenário. O atuador para tal compensador é capaz de acomodar o sistema em um tempo cerca de 12 vezes menor; por conseguinte, um novo compensador foi projetado, de acordo com a mesma metodologia daquele do Capítulo 3, com os seguintes critérios de desempenho: 2% de *overshoot* e tempo de acomodação de 100 segundos. Sua Função de Transferência pode ser vista na Equação 4.7 e seu desenvolvimento no Apêndice A.

$$G_c(s) = \frac{89,67s + 0,002134}{s(s + 0,08)} \quad (4.7)$$

Que pode ser escrita em formato PID, Equação 4.8

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \frac{s}{Tf s + 1} = 1120 + \frac{0,0267}{s} - 1,4 \cdot 10^{-4} \frac{s}{12,5s + 1} \quad (4.8)$$

Com o controlador projetado, diversos testes foram realizados, por meio dos quais objetivou-se verificar a capacidade que o mesmo possui de levar o sistema para a referência, bem como de atender aos critérios de desempenho. O resultado pode ser verificado na Figura 4.14; já na Figura 4.15, tem-se o sinal de controle demandado.

Nos tempos assinalados no gráfico (167,7 e 479,5 segundos), perturbações foram inseridas no sistema. No primeiro momento, água com temperatura abaixo de 28 °C foi adicio-

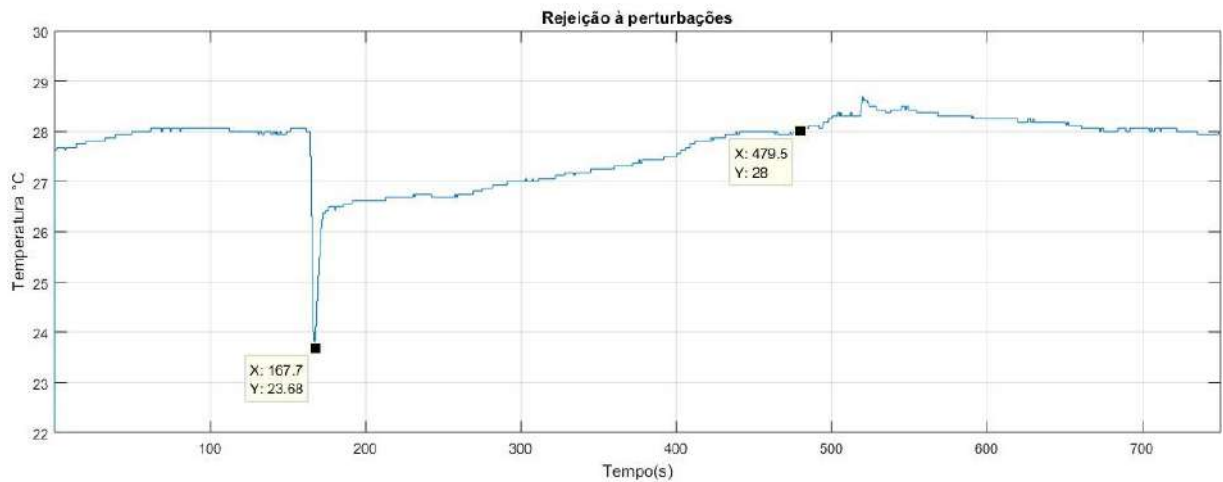


Figura 4.14: Sistema em malha fechada com o compensador

nada ao reservatório, sendo possível observar que o sistema rapidamente agiu, retornando para a temperatura de referência, 28°C. Posteriormente, água a aproximadamente 30°C foi inserida no tanque; novamente o sistema agiu dentro do esperado, retornando para seu ponto ótimo. Nas duas perturbações, obteve-se *overshoot* dentro da margem calculada, 0,21 %.

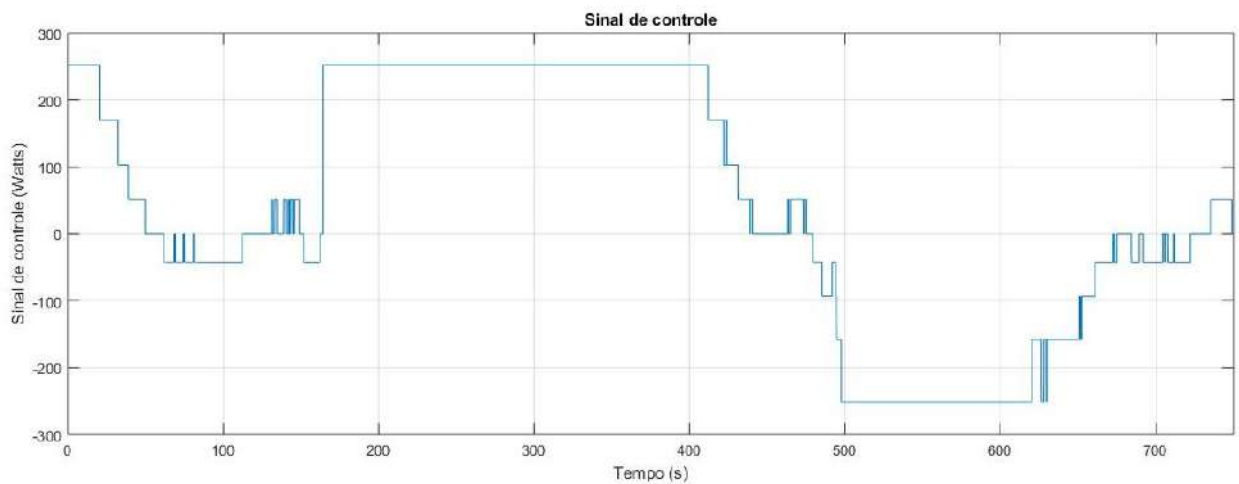


Figura 4.15: Sinal de controle demandado

No gráfico 4.15, percebe-se o sistema respondendo às perturbações inseridas nos tempos já citados. Nesses dois momentos, o controlador envia seu sinal máximo, procurando atenuar os distúrbios. À proporção em que a água aproxima-se de sua temperatura de referência, o sinal de controle gradativamente diminui. Quando os valores enviados para o sistema são positivos, esse necessita receber calor; caso contrário, necessita ceder.

### 4.3.3 Controlador Discreto

Buscando vantagens computacionais e tornar o sistema embarcado, realizou-se a discretização do controlador para o Tanque 2. Inicialmente, foi preciso determinar a frequência de amostragem para o sistema, Figura 4.16. Para tanto, fez-se uso do Critério de Nyquist e amostrou-se o sistema com uma frequência cerca dez vezes maior. O período de amostragem definido foi de 2 segundos.

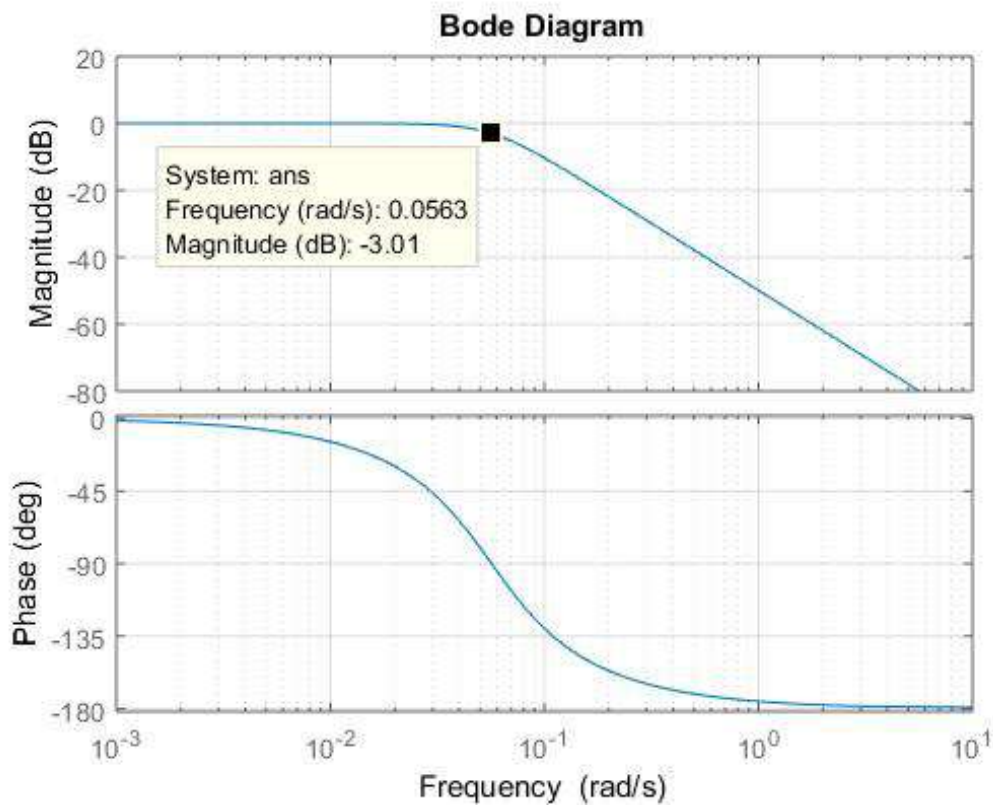


Figura 4.16: Diagrama de Bode

O método de integração numérica utilizado foi o de *Tustin*, conforme já citado, é o que melhor aproxima os sistemas contínuos dos discretos. Com o auxílio do Matlab, obteve-se a Equação 4.9, controlador discreto.

$$C_d(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{83,03 \cdot z^{-2} + 0,002134 \cdot z^{-1} - 83,03}{z^{-2} - 1,852 \cdot z + 0,8519} \quad (4.9)$$

A Equação a diferenças para esse compensador foi calculada, podendo ser verificada nas Equações 4.10 e 4.11.

$$U(z) = 83,03 \cdot E(z) + 0,003952 \cdot z^{-1} E(z) - 83,03 \cdot z^{-2} E(z) + 1,852 \cdot z^{-1} U(z) - 0,8519 \cdot z^{-2} U(z) \quad (4.10)$$

$$u(k) = 83,03.e(k) + 0,003952.e(k - 1) - 83,03.e(k - 2) + 1,852.u(k - 1) - 0,8519.u(k - 2) \quad (4.11)$$

Foi necessário, então, validar a Equação a Diferenças acima. Para tanto, a Função de Transferência do Tanque 2 foi colocada em malha fechada com o compensador da Equação 4.9 e com a Função 4.11. Para que a validação fosse concretizada, seria necessário que as respostas obtidas através desse teste fossem exatamente as mesmas, o que ocorreu. Conforme pode ser observado na Figura 4.17, as constantes de tempo e o valor final das duas curvas são rigorosamente os mesmos, fazendo com que as respostas estejam sobrepostas.

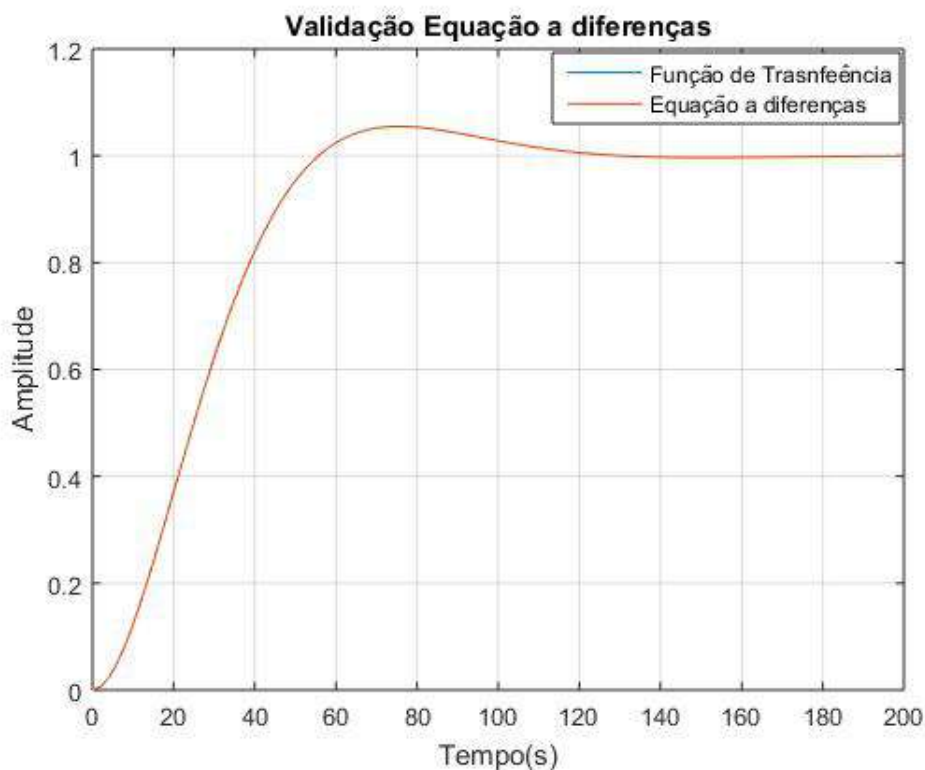


Figura 4.17: Sistema em malha fechada com Equação a diferenças e com a Função de Transferência

Com a validação concluída, foi possível colocar a planta em malha fechada com a equação calculada. Tem-se, na Figura 4.18, a resposta do sistema. Nela, é possível observar a presença de um *overshoot* de 1,32 %, dentro da margem calculada, acomodando-se em cerca de 150 segundos, para o critério de 2%. O teste foi realizado de acordo com a seguinte metodologia: quando o sistema estava em sua referência (28°C), uma perturbação foi inserida no mesmo.

Já na Figura 4.19, tem-se o sinal de controle demandado para tal. Nela, é possível verificar a ação do controlador, apresentando seu valor máximo quando a planta encontrava-se

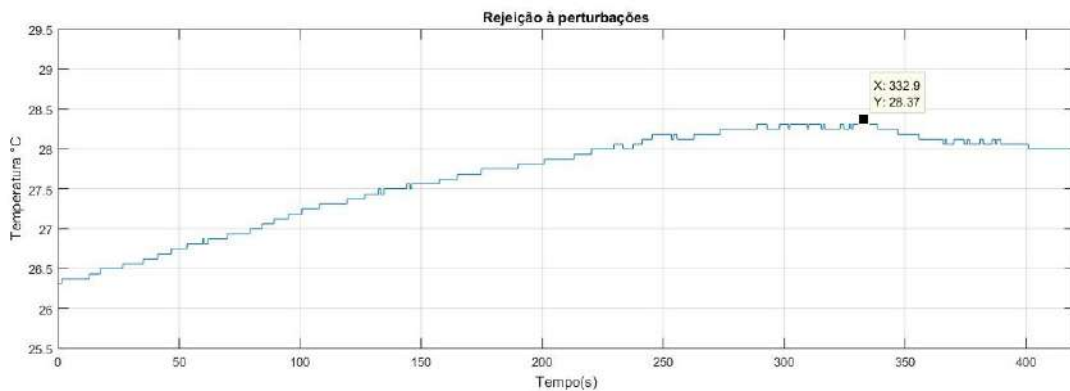


Figura 4.18: Sistema em malha fechada com Equação a diferenças

distante do ponto de operação. Com a aproximação, o sinal de controle gradativamente diminuiu.

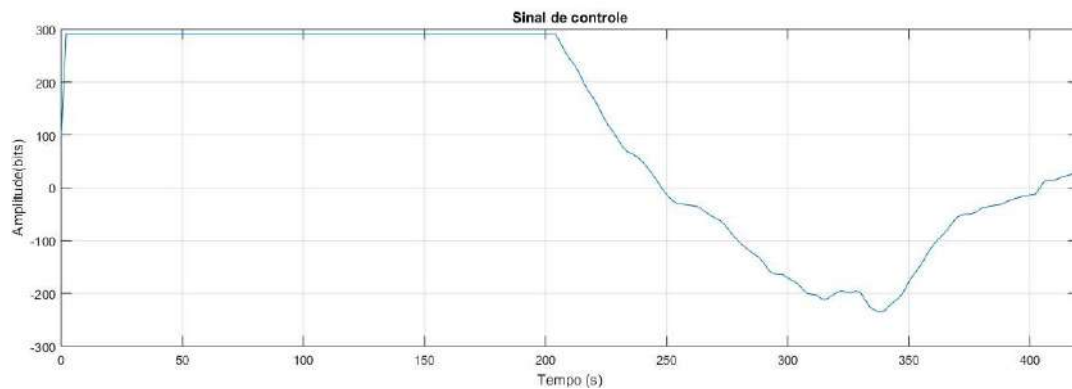


Figura 4.19: Sinal de controle

Houve duas adversidades encontradas no projeto. A primeira é em relação ao sensor de pH, visto que o equipamento (importado) ainda não se encontra em mãos, impossibilitando o monitoramento de tal variável. A segunda é o alto custo para adquirir instrumentos que quantifiquem a quantidade de oxigênio presente na água, o que também impossibilitou o monitoramento dessa grandeza.

Os códigos escritos para o controle dos dois reservatórios podem ser verificados no Apêndice B. Neles, é possível verificar o emprego das Equações a Diferença, conforme deduzidas para cada um dos respectivos tanques.

## 4.4 Considerações finais

No Capítulo 4, apresentou-se a calibração dos sensores e atuadores, a validação dos modelos matemáticos obtidos no Capítulo 3 e o teste dos compensadores previamente calculados. Após essas etapas, ocorreu a discretização dos controladores e, então, desenvolveu-se códigos para tornar o sistema embarcado.

## Considerações Finais

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões e a proposta de trabalhos futuros acerca do projeto desenvolvido.

### 5.1 Conclusões

O Trabalho de Conclusão de Curso apresenta a definição do problema, sendo possível verificar que existe uma crescente econômica na área da piscicultura. Nesse contexto, propôs-se o desenvolvimento de um tanque que controle a temperatura do fluido em 28°C, ideal para esse tipo de peixe. Conforme será abordado abaixo, os objetivos gerais e específicos foram atendidos de forma satisfatória.

No Capítulo 2, encontra-se a Revisão de Literatura, onde é apresentado o desenvolvimento tecnológico nas várias áreas relacionadas com a Piscicultura, apresentando projetos e técnicas que advém desde a Idade Antiga. Ainda no Capítulo 2, a metodologia adotada durante o desenvolvimento do trabalho é apresentada, descrevendo as etapas necessárias para que o mesmo fosse concluído com sucesso. Terminando essa parte, há a fundamentação teórica envolvida durante todo o desenvolvimento do projeto, que foi dividida em: Piscicultura, onde as condições ótimas do ambiente aquático foram citadas; Teoria de Controle, abordando metodologias para projeto de controladores e a características específicas de cada um desses e Termodinâmica, equacionando e explicando os métodos de transferência de calor.

Diante do que foi dito, até essa parte de projeto, cumpriu-se os seguintes objetivos específicos: estudar sobre as condições aquáticas ideais e revisar sobre a Teoria de Controle envolvida no processo, bem com sua Termodinâmica.

No Capítulo 3, foi apresentada a parte de projeto. Nele, os tanques foram dimensionados e modelados. Com as Funções de Transferência dos reservatórios, os critérios de desempenho desejados para cada um deles foram definidos. Com tais valores, algumas simulações com controladores (calculados via Lugar das Raízes) que atendem aos

critérios estabelecidos foram realizadas via Matlab, possibilitando o dimensionamento dos atuadores presentes no processo. Posteriormente, o sensor de temperatura DS18B20 foi selecionado para a planta, devido aos valores de precisão e exatidão que apresenta.

Em consequência do exposto, mais três objetivos específicos foram atendidos: estudar o melhor sensor para o processo, bem como o posicionamento dos atuadores, além de projetar controladores PID visando atender critérios de desempenho previamente estabelecidos.

Já no Capítulo 4, houve a execução do projeto. Nessa etapa, a planta foi construída, sendo possível calibrar os sensores e atuadores, visando obter suas curvas. Posteriormente, os controladores calculados foram testados diretamente nos tanques, sintonizando-os de forma a fazer com que os critérios de desempenho previamente estabelecidos fossem cumpridos.

Após lograr êxito nessas atividades, os controladores foram discretizados segundo aproximação de Tustin. Para tanto, foi necessário definir o período de amostragem para cada um dos Tanques; para obter tal dado, usou-se o Diagrama de Bode dos processos. Posteriormente, a Equação a Diferenças dos controladores foi calculada. Por fim, visando ganho computacional e tornar o sistema embarcado, códigos foram desenvolvidos e carregados no microcontrolador.

Conseqüentemente, construiu-se um protótipo que controla a temperatura da água, deixando-a em um ponto ótimo para as tilápias.

## 5.2 Propostas de continuidade

A primeira sugestão de trabalhos futuros é substituição do atuador elétrico. Mesmo que a resistência consiga fornecer a potência demandada pelo sistema, há a ideia de sua troca por energia solar, via painéis solares. Dessa maneira, o custo para manter a planta em funcionamento seria drasticamente menor, além de torná-la sustentável.

Outra recomendação é a inserção de torres de resfriamento no sistema, objetivando o diminuir a temperatura da água presente no Tanque 3. É válido lembrar que o fluido em nesse recipiente encontra-se à temperatura ambiente; caso o atuador seja integrado, seria possível implementar uma malha de controle no Tanque 3, deixando sua temperatura abaixo da ambiente e acelerando as trocas de calor entre os reservatórios.

Por fim, devido ao alto custo, não foi possível adquirir sensores para monitorar a quantidade de oxigênio presente na água. Nesse contexto, para trabalhos futuros, poder-se-ia desenvolver instrumentos capazes de detectar a quantidade dessa variável.

## Projeto dos Controladores

### A.1 Tanque 1

Para o tanque 1, os critérios de desempenho são 10% de *overshoot* e 250 segundos de tempo de acomodação. Como o sistema é do tipo 0, inseriu-se um integrador puro no mesmo, afim de não haver erro de estado estacionário.

A partir da Equação 2.1, cálculo do coeficiente de amortecimento  $\zeta$  do sistema.

$$10 = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \cdot 100 \quad (\text{A.1})$$

$$\ln(0,1) = \ln(e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}) \quad (\text{A.2})$$

$$(-2,3)^2 = \left(\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)^2 \quad (\text{A.3})$$

Donde  $\zeta = 0,59$ .

A partir da Equação 2.2, cálculo da frequência natural não amortecida  $\omega_n$  do sistema.

$$250 = \frac{4}{0,59\omega_n} \quad (\text{A.4})$$

Donde  $\omega_n = 2,71 \cdot 10^{-2}$ .

Com tais constantes calculadas, é possível determinar os polos de malha fechada do sistema com o auxílio da Equação 2.3.

$$Polo1 = -0,59 \cdot 2,71 \cdot 10^{-2} + j2,71 \cdot 10^{-2} \sqrt{1 - 0,59^2} = \quad (\text{A.5})$$

$$- 1,5989 \cdot 10^{-2} + j2,188 \cdot 10^{-2} \quad (\text{A.6})$$

$$Polo2 = -0,59 \cdot 2,71 \cdot 10^{-2} - j2,71 \cdot 10^{-2} \sqrt{1 - 0,59^2} = \quad (\text{A.7})$$



$$-1,5989 \cdot 10^{-2} - j2,188 \cdot 10^{-2} \quad (\text{A.8})$$

Através de uma análise gráfica da Figura 2.6, é possível determinar o ângulo  $\phi$  e, pela leis dos senos, a posição do polo do compensador  $P(c)$ .

$$\phi = \cos^{-1}\zeta = 53,84^\circ \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{\text{sen}(53,84)}{2,71 \cdot 10^{-2}} = \frac{\text{sen}(72,32)}{P(c)} \quad (\text{A.10})$$

Donde  $P(c) = -0,03198$ . Como o zero do compensador  $Z(c)$  deve estar situado sobre o polo da Função de Transferência do sistema, tem-se o cálculo de tal constante a seguir.

$$3675s + 1 = 0 \quad (\text{A.11})$$

$$Z(c) = -2,7211 \cdot 10^{-4} \quad (\text{A.12})$$

O ganho  $K_c$  do compensador é obtido através do critério de módulo, apresentado na Equação 2.5, quando  $s$  é igual ao polo de malha fechada.

$$\left| K_c \cdot \frac{0,25}{3675s + 1} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{s + 2,72 \cdot 10^{-4}}{s + 0,03198} \right| = 1 \quad (\text{A.13})$$

Donde  $K_c = 10,75$ .

Com tais valores calculados, tem-se a Função de Transferência do compensador.

$$G_c(s) = \frac{10,75s + 0,002925}{s^2 + 0,03198s} \quad (\text{A.14})$$

## A.2 Tanque 2

Para o tanque 2, os critérios de desempenho são 2% de *overshoot* e 1000 segundos de tempo de acomodação. Como o sistema é do tipo 0, inseriu-se um integrador puro no mesmo, afim de não haver erro de estado estacionário.

A partir da Equação 2.1, cálculo do coeficiente de amortecimento  $\zeta$  do sistema.

$$2 = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \cdot 100 \quad (\text{A.15})$$

$$\ln(0,02) = \ln\left(e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}\right) \quad (\text{A.16})$$

$$(-3,91)^2 = \left(\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)^2 \quad (\text{A.17})$$

Donde  $\zeta = 0,78$ .

A partir da Equação 2.2, cálculo da frequência natural não amortecida  $\omega_n$  do sistema.

$$1000 = \frac{4}{0,78\omega_n} \quad (\text{A.18})$$

Donde  $\omega_n = 5,13 \cdot 10^{-3}$ .

Com tais constantes calculadas, é possível determinar os polos de malha fechada do sistema com o auxílio da Equação 2.3.

$$Polo1 = -0,78 \cdot 5,13 \cdot 10^{-3} + j5,13 \cdot 10^{-3} \sqrt{1 - 0,78^2} = \quad (\text{A.19})$$

$$- 4 \cdot 10^{-3} + j3,21 \cdot 10^{-3} \quad (\text{A.20})$$

$$Polo1 = -0,78 \cdot 5,13 \cdot 10^{-3} - j5,13 \cdot 10^{-3} \sqrt{1 - 0,78^2} = \quad (\text{A.21})$$

$$- 4 \cdot 10^{-3} + j3,21 \cdot 10^{-3} \quad (\text{A.22})$$

Através de uma análise gráfica da Figura 2.6, é possível determinar o ângulo  $\phi$  e, pela leis dos senos, a posição do polo do compensador  $P(c)$ .

$$\phi = \cos^{-1}\zeta = 38,74^\circ \quad (\text{A.23})$$

$$\frac{\text{sen}(38,74)}{5,13 \cdot 10^{-3}} = \frac{\text{sen}(102,52)}{P(c)} \quad (\text{A.24})$$

Donde  $P(c) = -0,00757$ . Como o zero do compensador  $Z(c)$  deve estar situado sobre o polo da Função de Transferência do sistema, tem-se o cálculo de tal constante a seguir.

$$42000s + 1 = 0 \quad (\text{A.25})$$

$$Z(c) = -2,38 \cdot 10^{-5} \quad (\text{A.26})$$

O ganho  $K_c$  do compensador é obtido através do critério de módulo, apresentado na Equação 2.5, quando  $s$  é igual ao polo de malha fechada.

$$\left| K_c \cdot \frac{1,25}{42.000s + 1} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{s + 2,38 \cdot 10^{-5}}{s + 0,00757} \right| = 1 \quad (\text{A.27})$$

Donde  $K_c = 0,79$ .

Com tais valores calculados, tem-se a Função de Transferência do compensador.

$$G_c(s) = \frac{0,79s + 1,88099 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 7,57 \cdot 10^{-3}s} \quad (\text{A.28})$$

Conforme explicado no Capítulo 4, foi necessário alterar o tempo de acomodação da planta para 100 segundos. O *overshoot* foi mantido em 2%, conservando o coeficiente de amortecimento igual a 0,78.

Como o sistema é do tipo 0, inseriu-se um integrador puro no mesmo, afim de não haver erro de estado estacionário.

A partir da Equação 2.2, cálculo da frequência natural não amortecida  $\omega_n$  do sistema.

$$100 = \frac{4}{0,78\omega_n} \quad (\text{A.29})$$

Donde  $\omega_n = 5,13 \cdot 10^{-2}$ .

Com tais constantes calculadas, é possível determinar os polos de malha fechada do sistema com o auxílio da Equação 2.3.

$$Polo1 = -0,78 \cdot 5,13 \cdot 10^{-2} + j5,13 \cdot 10^{-2} \sqrt{1 - 0,78^2} = \quad (\text{A.30})$$

$$- 4 \cdot 10^{-2} + j3,21 \cdot 10^{-2} \quad (\text{A.31})$$

$$Polo1 = -0,78 \cdot 5,13 \cdot 10^{-2} - j5,13 \cdot 10^{-2} \sqrt{1 - 0,78^2} = \quad (\text{A.32})$$

$$- 4 \cdot 10^{-2} + j3,21 \cdot 10^{-2} \quad (\text{A.33})$$

Através de uma análise gráfica da Figura 2.6, é possível determinar o ângulo  $\phi$  e, pela lei dos senos, a posição do polo do compensador  $P(c)$ .

$$\phi = \cos^{-1}\zeta = 38,74^\circ \quad (\text{A.34})$$

$$\frac{\text{sen}(38,74)}{5,13 \cdot 10^{-2}} = \frac{\text{sen}(102,52)}{P(c)} \quad (\text{A.35})$$

Donde  $P(c) = -0,08$ . Como o zero do compensador  $Z(c)$  deve estar situado sobre o polo da Função de Transferência do sistema, tem-se o cálculo de tal constante a seguir.

$$42000s + 1 = 0 \quad (\text{A.36})$$

$$Z(c) = -2,38 \cdot 10^{-5} \quad (\text{A.37})$$

O ganho  $K_c$  do compensador é obtido através do critério de módulo, apresentado na Equação 2.5, quando  $s$  é igual ao polo de malha fechada.

$$\left| K_c \cdot \frac{1,25}{42.000s + 1} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{s + 2,38 \cdot 10^{-5}}{s + 0,08} \right| = 1 \quad (\text{A.38})$$

Donde  $K_c = 89,67$ .

Com tais valores calculados, tem-se a Função de Transferência do compensador.

$$G_c(s) = \frac{89,67s + 0,00214}{s^2 + 0,08s} \quad (\text{A.39})$$

# Apêndice **B**

## Códigos implementados

### B.1 Tanque 1

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
5 LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);

// Porta do pino de sinal do DS18B20
#define ONE_WIRE_BUS 3

10 // Define uma instancia do oneWire para comunicacao com o sensor
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor1;

15 float u = 0;
float u1 = 0;
float sinal_controle = 0;
float e = 0;
float e1 = 0;
20 int saida = 5;
int referencia = 35;
int ts = 2;
unsigned long tempo1 = 0;
unsigned long tempo2 = 0;

25 void setup(void)
{
    pinMode(saida,OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
30 sensors.begin();
// Localiza e mostra enderecos dos sensores
Serial.println("Localizando sensores DS18B20...");
Serial.print("Foram encontrados ");
Serial.print(sensors.getDeviceCount(), DEC);
35 Serial.println(" sensores.");
if (!sensors.getAddress(sensor1, 0))
Serial.println("Sensores nao encontrados !");
// Mostra o endereco do sensor encontrado no barramento
Serial.print("Endereco sensor: ");
```

```

40     mostra_endereco_sensor(sensor1);
        Serial.println();
        Serial.println();
        lcd.begin(16,2);
    }
45
void mostra_endereco_sensor(DeviceAddress deviceAddress)
{
    for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
50     {
        // Adiciona zeros se necessário
        if (deviceAddress[i] < 16) Serial.print("0");
        Serial.print(deviceAddress[i], HEX);
    }
55 }

void controlador()
{
    ds18b20();
60     tempo1 = millis();
    if (tempo1 - tempo2 >= 2000)
    {
        u = 312.21*e - 311.866*e1 + u1;
65
        //CONVERTENDO DE WATTS PARA PWM

        sinal_controle = -0.0001791 * u * u + 0.4285 * u + 4.913;
        if (sinal_controle > 255)
70     sinal_controle = 255;

        //VERIFICAÇÃO DE SATURAÇÃO

        if (sinal_controle >= 0 && sinal_controle <= 255)
75     {
            analogWrite(saida, sinal_controle);
        }
        if (sinal_controle < 0 && sinal_controle >= -255)
        {
80     sinal_controle = 0;
            analogWrite(saida, sinal_controle);
        }
        tempo2 = tempo1;
        e1 = e;
85     u1 = u;
    }
}

90 void ds18b20()
{
    // Le a informacao do sensor
    sensors.requestTemperatures();
    float tempC = sensors.getTempC(sensor1);
95 // Mostra dados no serial monitor
    e = referencia - tempC;
    Serial.print("Temp C: ");

```

---

```

        Serial.println(tempC);
        Serial.print("Sinal de controle ");
100     Serial.println(sinal_controle);
    }

    void displa()
    {
105         float tempC = sensors.getTempC(sensor1);
        lcd.setBacklight(HIGH);
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Temperatura:");
        lcd.setCursor(0,1);
110     lcd.print(tempC);
        lcd.setCursor(7,1);
        lcd.print("pwm:");
        lcd.print(sinal_controle);
        lcd.setCursor(10,1);
115 }

    void loop()
    {
120         controlador();
        displa();
    }
    %

```

---

## B.2 Tanque 2

---

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
5  LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);

// Porta do pino de sinal do DS18B20
#define ONE_WIRE_BUS 3

10 // Define uma instancia do oneWire para comunicacao com o sensor
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor1;

15 float tempC = 0;
float u = 0;
float u1 = 0;
float u2 = 0;
float cont = 0;
20 double sinal_controle = 0;
float e = 0;
float e1 = 0;
float e2 = 0;
int saida1 = 5;
25 int saida2 = 6;
int referencia = 28;
int ts = 2;

```

```

unsigned long tempo1 = 0;
unsigned long tempo2 = 0;
30 float x = 0;

void setup(void)
{
    pinMode(saida1,OUTPUT);
35    pinMode(saida2,OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
    sensors.begin();
    // Localiza e mostra enderecos dos sensores
    Serial.println("Localizando sensores DS18B20...");
40    Serial.print("Foram encontrados ");
    Serial.print(sensors.getDeviceCount(), DEC);
    Serial.println(" sensores.");
    if (!sensors.getAddress(sensor1, 0))
    Serial.println("Sensores nao encontrados !");
45    // Mostra o endereco do sensor encontrado no barramento
    Serial.print("Endereco sensor: ");
    mostra_endereco_sensor(sensor1);
    Serial.println();
    Serial.println();
50    lcd.begin (16,2);
}

void mostra_endereco_sensor(DeviceAddress deviceAddress)
55 {
    for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
    {
        // Adiciona zeros se necessário
        if (deviceAddress[i] < 16) Serial.print("0");
60        Serial.print(deviceAddress[i], HEX);
    }
}

void controlador()
65 {
    tempo1 = millis();
    if (tempo1 - tempo2 >= 2000)
    {
70        ds18b20();
        u = 83.0298*e + 0.0040*e1 - 83.0298*e2 + 1.8519*u1 -
            0.8519*u2;

        //CONVERTIENDO DE WATTS PARA PWM

75        sinal_controle = 0.000003838*u*u*u + 0.6258*u;

        if (sinal_controle >= 0 \&\& sinal_controle <= 255)
80        {
            analogWrite (saida1,sinal_controle);
            analogWrite (saida2,0);
        }
    }
}

```



```

85         if (sinal_controle > 255)
            {
                analogWrite (saida1,255);
                analogWrite (saida2,0);
            }

90

            if (sinal_controle < 0 && sinal_controle >= -255)
            {
                analogWrite (saida2,sinal_controle);
                analogWrite (saida1,0);
95            }

            if (sinal_controle < -255)
            {
100                analogWrite (saida1,0);
                analogWrite (saida2,255);
            }

            tempo2 = tempol;
105            e2 = e1;
            e1 = e;
            u2 = u1;
            u1 = u;
        }

110    }

void displa()
115 {
    float imprime = sinal_controle;
    if (sinal_controle > 255 || sinal_controle < -255 )
    imprime = 255;
    //float tempC = sensors.getTempC(sensor1);
120    lcd.setBacklight(HIGH);
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Temperatura:");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(tempC);
125    lcd.setCursor(7,1);
    lcd.print("pwm:");
    lcd.print(u);
    lcd.setCursor(10,1);
}

130 void ds18b20()
    {
        // Le a informacao do sensor
        sensors.requestTemperatures();
135        //float
        tempC = sensors.getTempC(sensor1);
        // Mostra dados no serial monitor
        e = referencia - tempC;
        Serial.print("Temp C: ");
140        Serial.println(tempC);
        Serial.print("Sinal de controle ");
        Serial.println(sinal_controle);
    }

```

```
    }  
145  
  
void loop()  
{  
150     controlador();  
        displa();  
}  
  
%
```

---

# Referências

A. OSTRENSKY, W. B. *Piscicultura fundamentos e técnicas de manejo*. [S.l.: s.n.], 1998.

ABRUNHOSA. *Piscicultura*. [S.l.]: e-Tec Brasil, 2011.

ALEXNLD. <http://alexnld.com/product/ssr-25da-ssr-solid-state-relay-25a-output-ac2>  
Acesso em abril de 2017.

ALIBABA. <https://portuguese.alibaba.com/wholesale/Atacado-1298n-motor-driver-datasheet.html> Acesso em maio de 2017.

APT. <http://www.aquaculture.co.il/> Acesso em março de 2017.

BIDORBUY. [http://www.bidorbuy.co.za/item/226193359/pH\\_Sensor\\_Module\\_Probe\\_test\\_code\\_sensor\\_Arduino.html](http://www.bidorbuy.co.za/item/226193359/pH_Sensor_Module_Probe_test_code_sensor_Arduino.html) Acesso em maio de 2017.

BOABAID, C. *Trasnferência de Calor TCL*. , [S.l.], 2010.

BORGNAKKE, S. *Fundamentos da Termodinâmica*. 7<sup>a</sup>.ed. [S.l.: s.n.], 2009.

FAO. <https://africa21digital.com/2016/07/07/relatorio-da-fao-mostra-aumento-do-cons>  
Acesso em março de 2017.

FILIFEFLOP. <http://blog.filipeflop.com/sensores/sensor-de-temperatura-ds18b20-arduino.html> Acesso em maio de 2017.

G1. <http://g1.globo.com/sao-paulo/sorocaba-jundiai/nosso-campo/noticia/2015/05/piscicultores-investem-em-tecnologia-para-modernizar-producao.html> Acesso em março de 2017.

GOMES. <http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node21.html> Acesso em abril de 2017.

H. D. YOUNG, F. W. S. *University physics*. 8<sup>a</sup>.ed. [S.l.]: Addison-Wesley Pub. Co, 1992.

- KUBITZA, 2007. <http://www.panoramadaaquicultura.com.br/paginas/Revistas/102/PeixesNativos.asp> Acesso em março de 2017.
- KUBITZA. *Tilápia: tecnologia e planejamento na produção comercial*. 2<sup>a</sup>.ed. [S.l.]: Acqua Supre, 2011.
- KUBITZA, E. A. F. *Revista Panorama da Aquicultura*. [S.l.: s.n.], 2000. v.10, n.59.
- M. BOLES, Y. e. *Termodinâmica*. 5<sup>a</sup>.ed. [S.l.]: McGraw-Hill Brasil, 2007.
- MERCADOLIVRE. [http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-665385131-resistencia-chuveiro-tipo-lorenzetti-4000-w-220v-5-un-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-665385131-resistencia-chuveiro-tipo-lorenzetti-4000-w-220v-5-un-_JM) Acesso em abril de 2017.
- MERCADOLIVRE. [http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-813260229-bomba-esguicho-vto-12v-bico-fino-bf12vto-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-813260229-bomba-esguicho-vto-12v-bico-fino-bf12vto-_JM) Acesso em abril de 2017.
- MERCADOLIVRE. [http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-808278758-display-lcd-16x2-backlight-azul-escrita-branca-rt162-7-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-808278758-display-lcd-16x2-backlight-azul-escrita-branca-rt162-7-_JM) Acesso em maio de 2017.
- Ministerio da Pesca e Aquicultura. [http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS\\_CHRONUS/bds/bds.nsf/4b14e85d5844cc99cb32040a4980779f/\\$File/5403.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/4b14e85d5844cc99cb32040a4980779f/$File/5403.pdf) Acesso em março de 2017.
- National Instruments. <http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/> Acesso em abril de 2017.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. [S.l.]: Prentice Hall, 2010.
- Omega Engineering. <http://br.omega.com/artigos-tecnicos/calibracao-dispositivos-medicao-de-temperatura.html> Acesso em março de 2017.
- PROJECT2R. <https://project2r.com/2015/02/25/pc-cooling-pt-3-estrategias-ativas-d> Acesso em abril de 2017.
- R7. <http://meioambiente.culturamix.com/noticias/aquicultura-no-brasil-evolucao-e-des> Acesso em março de 2017.
- SOARES, T. *Termodinâmica*. 5<sup>a</sup>.ed. [S.l.]: Soares, 2000.

TODA MATERIA. <https://www.todamateria.com.br/conducao-termica/> Acesso em abril de 2017.

VIDADESILICIO. <http://blog.vidadesilicio.com.br/arduino/ponte-h-1298n-controle-velocidade-motor/> Acesso em abril de 2017.

WEAST, R. C. *Handbook of Chemistry and Physics*. 64.ed. [S.l.]: CRC Press, 1984.

WIKIPEDIA. <https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino> Acesso em maio de 2017.