



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Izoneide Leite dos Santos

SISTEMA MECATRÔNICO PARA DIDÁTICA DE TÉCNICAS DE CONTROLE

Manaus
2015

Izoneide Leite dos Santos

SISTEMA MECATRÔNICO PARA DIDÁTICA DE TÉCNICAS DE CONTROLE

Trabalho de Conclusão de Curso submetida à Coordenação do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade do Estado do Amazonas como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro, em conformidade com as normas ABNT.

Orientador Dr. Israel Mazaira Morales

Manaus
2015

Izoneide Leite dos Santos

SISTEMA MECATRÔNICO PARA DIDÁTICA DE TÉCNICAS DE CONTROLE

Trabalho de Conclusão de Curso submetida à Coordenação do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade do Estado do Amazonas como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro. em conformidade com as normas ABNT.

Trabalho aprovado. Manaus, 19 de junho de 2015:

Dr. Israel Mazaira Morales
Orientador

**Dr. Walter Andres Vermehren
Valenzuela**
Presidente da banca

Me. Almir Kimura Junior
Convidado 1

Me. Moisés Pereira Bastos
Convidado 2

Manaus
2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente dirijo-me a Deus reconhecendo que veio dele toda força, luz e confiança, com a qual consegui superar todas as barreiras e dificuldades durante minha vida acadêmica.

À esta renomada instituição, Universidade do Estado do Amazonas, seu corpo docente, direção e administração, por todo esforço em nos proporcionar meios para a aquisição de conhecimentos, nos preparando para novos desafios.

Agradeço a todos os professores, por me proporcionarem o conhecimento não apenas racional e sistemático, mas sobretudo focando na manifestação do caráter ético de um verdadeiro profissional. Pela dedicação de cada um e cada uma, e em nome de todo saber adquirido, a vocês, meus eternos agradecimentos.

À minha mãe Rosimar Leite dos Santos, sou profundamente grata pela sua garra e esforço empreendidos na minha educação. Por ser essa pessoa que sempre esteve ao meu lado me dando apoio, coragem e me animando nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

À toda minha família, tios, tias, primos e primas, à minha irmã Iza Leny Leite dos Santos, meus sinceros agradecimentos a cada um de vocês. Todo apoio, incentivo e ajuda recebidos estão contidos nessa conquista que não é só minha, mas também se estende a todos vocês.

Agradeço a Filipe de Oliveira Máximo, namorado e melhor amigo, que sempre esteve comigo tanto em caráter pessoal quanto acadêmico, obrigada pelo amor, respeito e consideração a mim dedicados, tenha certeza da reciprocidade de tais sentimentos.

Agradeço aos prezados professores Dr. Israel Mazaira Morales e MSc. Gustavo Cunha da Silva Neto, pelos ensinamentos, sem os quais não seria possível a conclusão deste trabalho.

Meus agradecimentos se estendem aos meus amigos, companheiros de trabalhos os quais considero irmãos que a vida me deu de presente. Obrigada por fazerem parte dos melhores momentos da minha vida, e de tudo que fez com que esses anos passassem com mais leveza e alegria. Vocês continuarão em minha vida pra sempre.

Aos amigos Rodrigo Santa Rita, Lucas Bonetti, Isabelle Stoco, Rafael Goulart, Talita Vilela, Dianny Pontes, Dilermando da Costa, Eiji Maeda, Guilherme Linardi e Nilteomar Nascimento.

Que todos os aqui citados e aqueles que contribuíram com a realização desse sonho, o meu muito obrigado. Que o retorno de todo esses gestos de carinho, amor e amizade sejam recompensados em forma de felicidade, saúde e conquistas na vida de cada um de vocês.

RESUMO

Este trabalho apresenta, no contexto didático do curso de Engenharia de Controle e Automação uma abordagem utilizando técnicas de controle em sistemas termodinâmicos, em uma plataforma Arduino como interface entre o controlador que encontra-se no computador e o protótipo didático. Tal dispositivo pode ser utilizado tanto para testes de técnicas de controle clássico quanto controle moderno, de forma que o estudante possa observar o comportamento de sistemas reais.

O projeto consiste em um sistema de controle em que a temperatura é a variável controlada e a tensão é variável manipulada, e uma lâmpada incandescente representa a resistência elétrica aquecendo o ar que é circulado por uma câmara. Para desenvolver o projeto foi feito uma revisão de literatura para definir a técnica de controle a ser implementada, bem como a construção da parte física do mesmo, a fim de obter dados válidos para a montagem de uma planta didática para estudos de técnicas de controle em sistemas reais. Sendo implementada a técnica de controle PID e realizados dois testes com a mesma para setpoints de 40 °C e 41 °C, e inserindo-se um distúrbio externo, onde o controlador obteve êxito no controle da temperatura retornado ao valor de referência.

Palavras-chaves: Planta didática. Controlador PID. Método de sintonia. Identificação de sistemas. Controle de temperatura.

ABSTRACT

This paper presents, in the context of didactic in Engineering of Control and Automation course, an approach with control techniques in thermodynamic systems, using a Arduino platform as an interface between controller on the computer and the didactic prototype. Such device can be used for both in tests of classic control techniques as modern techniques, so the student can view the behavior of real systems.

The project consists in a control system having the temperature as controlled variable and the voltage as manipulated variable, where a lamp represents an electric al resistance heating the air that is circulated through a chamber. To develop the Project, a research was made regarding the control technique to be used and physical part thereof, in order to obtain valid data to assemble a teaching plan to study control techniques in real systems. PID control technique was implemented and carried out two tests, with setpoints to 40 ° C and 41 ° C , and inserting an external disturbance , where the controller was successful in controlling the temperature returned to the baseline .

Key-words: Didactic plant. PID Controller. Tuning method. System identification. Temperature control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama básico de um cluster Beowulf.	15
Figura 2 – Comparação de processamento em série e paralelo.	16
Figura 3 – Esquema de ligação dos equipamentos.	17
Figura 4 – Bloco PID no diagrama Ladder.	18
Figura 5 – Esquema em blocos do sistema de nível de líquidos.	19
Figura 6 – Gráfico de ensaio real do Sistema de Nível de Líquidos.	20
Figura 7 – Transferência de calor por convecção	22
Figura 8 – Sistema de controle de temperatura.	23
Figura 9 – Sistema de controle coordenado para um termogerador.	24
Figura 10 – Diagrama de blocos de um sistema estável, linear e invariante no tempo.	24
Figura 11 – Sinais senoidais de entrada e saída.	26
Figura 12 – Diagrama de bode para $(1 + j\omega t)^{-1}$	27
Figura 13 – Margens de ganho e de fase nos diagramas de Bode.	28
Figura 14 – Malha de controle PID SISO.	29
Figura 15 – Diagrama de blocos de um controlador PID.	33
Figura 16 – Diagrama em blocos do Arduino.	35
Figura 17 – Diagrama de blocos do sensor de temperatura DS18B20.	37
Figura 18 – Diagrama de conexão do módulo sensor DS18B20.	38
Figura 19 – Circuito da Ponte H.	38
Figura 20 – Circuito Ponte H L298N	39
Figura 21 – Vista superior do CI L298N com os especificações de funcionamento.	40
Figura 22 – Ventoinha e dissipador modelo E29477.	41
Figura 23 – Diagrama de blocos da planta didática de controle de temperatura.	42
Figura 24 – Modelo da planta no software Simulink®.	43
Figura 25 – Gráfico da resposta do sistema sem a utilização de técnicas de controle.	44
Figura 26 – Esboço da parte A da planta didática no SolidWorks®	45
Figura 27 – Esboço segunda parte da planta didática no software Fritzing®.	46
Figura 28 – Estrutura física da parte A da planta didática.	47
Figura 29 – Estrutura física da parte B da planta didática.	48
Figura 30 – Algoritmo de teste carregado na placa Arduino.	49
Figura 31 – Janela de comando do MATLAB®.	49
Figura 32 – Princípios para construção de um modelo matemático.	50
Figura 33 – Esquemático da realização de testes com entradas degrau.	51
Figura 34 – Resposta do sistema a uma entrada degrau de 8 volts.	52
Figura 35 – Resposta do sistema a uma entrada degrau de 10 volts.	52
Figura 36 – Resposta do sistema a uma entrada degrau de 12 volts.	53

Figura 37 – Resposta do sistema a uma entrada degrau de 14 volts.	53
Figura 38 – Resposta da função $G(s)$ mediante entrada de tensão 8 V.	55
Figura 39 – Resposta da função $G(s)$ mediante entrada de tensão 10 V.	55
Figura 40 – Resposta da função $G(s)$ mediante entrada de tensão 12 V.	55
Figura 41 – Resposta da função $G(s)$ mediante entrada de tensão 14 V.	55
Figura 42 – Implementação do controle PID no software Simulink®.	56
Figura 43 – Inserção dos dados de K_p , K_i e K_d no bloco do controlador PID.	57
Figura 44 – Sistema em funcionamento com o controlador PID implementado.	58
Figura 45 – Gráfico para valor de $\gamma_m = 4dB$ e <i>setpoint</i> 40 °C.	59
Figura 46 – Gráfico para valor de $\gamma_m = 6dB$ e <i>setpoint</i> 40 °C.	60
Figura 47 – Gráfico para valor de $\gamma_m = 4dB$ e <i>setpoint</i> 41 °C.	61
Figura 48 – Gráfico para valor de $\gamma_m = 6dB$ e <i>setpoint</i> 41 °C.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de margem de fase sugerida por alguns autores.	28
Tabela 2 – Sistemas de controle de temperatura disponíveis no mercado.	34
Tabela 3 – Custos da construção do protótipo utilizado no trabalho.	34
Tabela 4 – Características Arduino UNO	36
Tabela 5 – Especificações Circuito Ponte H L298N	39
Tabela 6 – Ordem de ativação do motor A.	40
Tabela 7 – Características da ventoinha modelo E29477	41
Tabela 8 – Parâmetros da simulação em Simulink®	42
Tabela 9 – Valores dos ganhos K_p para as quatro entradas de tensão	54
Tabela 10 – Valores da constante de tempo τ para os valores de entrada degrau. . .	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Problema de pesquisa	11
1.2	Justificativa	12
1.3	Motivação	12
1.4	Objetivo geral	12
1.5	Objetivos específicos	12
1.6	Metodologia	13
1.7	Estrutura do documento	13
2	ESTADO DA ARTE	15
2.1	Simulação de modelos matemáticos de uma planta didática para controle de nível em um <i>cluster</i> Beowulf	15
2.2	Sistema didático para controle de nível e temperatura	17
2.3	Construção e utilização de protótipo didático de controle de nível de líquidos não-linear multivariável	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1	Sistemas térmicos ou termodinâmicos	21
3.1.1	Propagação de calor por convecção térmica	22
3.1.2	Calor específico à pressão constante	22
3.2	Sistemas de controle de temperatura	23
3.3	Análise de sistemas de controle pelo método de resposta em frequência	24
3.3.1	Diagrama de Bode ou diagrama logarítmico	27
3.4	Método de sintonia baseado na otimização de um único parâmetro	29
3.5	Controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo)	31
3.5.0.1	Ação de controle proporcional	31
3.5.0.2	Ação de controle integral	31
3.5.0.3	Ação de controle derivativo	32
3.5.0.4	Controlador PID	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	Pesquisa de mercado	34
4.2	Especificações físicas do projeto	35
4.2.1	Microcontroladores	35

4.2.2	Sensor digital de temperatura	36
4.2.3	Circuito Ponte H	38
4.2.3.1	Circuito Integrado L298N	39
4.2.4	Ventoinhas	41
4.3	Diagrama de blocos do sistema	42
4.4	Características construtivas da bancada	44
4.4.1	Construção da bancada	45
4.4.2	Sequência de montagem	46
4.5	Comunicação Arduino-MATLAB®	48
4.6	Método de identificação da planta	50
4.6.1	Identificação do processo mediante teste de resposta ao degrau	51
4.7	Controle da temperatura da planta	56
5	RESULTADOS OBTIDOS	59
5.1	Resultados do teste 1	59
5.2	Resultados do teste 2	60
6	CONCLUSÕES	62
6.1	Trabalhos futuros	62
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A – ALGORITMO NA IDE DO SOFTWARE MA- TLAB PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA E TENSÃO	65

1 INTRODUÇÃO

A busca do conhecimento, aliado ao desejo de que este seja adquirido não só de forma teórica, resulta no surgimento de novas didáticas que melhor viabilizam a aprendizagem daquele que o busca. Nesse sentido, pode-se afirmar que, por melhor que pareçam as teorias e técnicas defendidas ou aplicadas no campo da engenharia, nem sempre as mesmas serão a ideal ou a que melhor se adequam às diferentes realidades se não for possível de alguma forma testá-las, como por exemplo: em laboratório, mediante simulações ou utilizando de plantas didáticas, e assim finalmente aplicá-las- ou descartá-las.

Segundo Lunetta (1991), "as aulas práticas podem ajudar no desenvolvimento de conceitos científicos, além de permitir que os estudantes aprendam como abordar objetivamente o seu mundo e como desenvolver soluções para problemas complexos", abordagem essa que se contextualizadas de forma adequada vão além do "testar e medir", auxiliando de forma substancial na construção do conhecimento tanto do discente quanto do docente.

As plantas didáticas são recursos complementar que auxiliam na consolidação do conhecimento, demonstrando didaticamente o funcionamento de processos complexos e que usualmente somente poderiam ser vistos em ambientes industriais. Tais plataformas abordam temáticas como o controle de processos, que tem como principal finalidade manter variáveis como temperatura, pressão, fluxo em algum ponto de operação desejado (SMITH; CORRIPIO, 1997).

O presente projeto tem o intuito de construir um modelo físico que tem a temperatura como variável controlada, e que será ferramenta complementar no estudo de técnicas de controle clássico e moderno, uma vez que os sistemas atuais que visam a aplicação das mesmas são produzidos com suas possibilidades predefinidas e tal constatação minimiza a curiosidade do aluno em utilizar outras técnicas que não as predeterminadas pelos fabricantes.

No entanto para realizar o controle do processo é necessário primeiramente conhecer suas características representativas, realizar a identificação do mesmo bem como analisar quais técnicas se encaixam nos pré-requisitos requeridos por quem o manipula, logo, o escopo do projeto é a implementação de diferentes técnicas de controle e do mesmo modo os meios para realizá-lo engrandecem igualmente seus benefícios.

1.1 Problema de pesquisa

A relação entre o ensino e aprendizagem de técnicas de controle é feita atualmente mediante a utilização de plantas didáticas, que tem como variáveis temperatura, vazão, pressão e muitas outras. No entanto nas mesmas somente podem ser implementadas as técnicas sugeridas pelo fabricante, situação essa que dificulta a utilização e o aprendizado

de outras técnicas que não as que o fabricante sugere, criando um obstáculo entre o que se aprende em sala de aula e o que se aplica na prática.

1.2 Justificativa

A relação teoria-prática das técnicas de controle de sistemas é um passo de importância ímpar na construção do conhecimento de engenheiros de controle e automação, relação essa que é feita hoje por intermédio de plataformas didáticas disponíveis no mercado, no entanto as mesmas são sistemas que tem suas características predefinidas pelo fabricante além de demandarem de um alto custo de aquisição, situação essa que tem como consequências comum o surgimento de dificuldades em conseguir proporcionar aos estudantes conhecimentos práticos, e por conseguinte a defasagem na relação teoria-prática.

1.3 Motivação

Nas disciplinas onde o foco é o estudo de técnicas de controle clássico e moderno faz-se necessária a utilização de *softwares*, simuladores de processos, bem como protótipos de sistemas reais auxiliando tanto o docente na transmissão do conhecimento quanto o discente no entendimento de conceitos importantes para a construção de um profissional capacitado.

Motivado por esta necessidade o presente projeto visa a construção de uma plataforma didática onde técnicas de controle possam ser entendidas desde conceitos básico como variáveis de entrada e saída até a tomada de decisão de qual modelo utilizar para obter parâmetros satisfatórios para as necessidades requeridas pelo acadêmico, afim de proporcionar uma opção de aquisição de conhecimento no âmbito do estudo das técnicas de controle.

1.4 Objetivo geral

Construir um dispositivo didático para técnicas de controle, utilizando uma caixa de acrílico com uma lâmpada incandescente fixada em seu interior, sensor de temperatura, ventilador e ponte H e posteriormente fazer o controle da temperatura do sistema mediante a utilização de técnicas de controle clássico e moderno utilizando este dispositivo, visando validar a teoria de controle abordada neste trabalho, no Laboratório de Robótica Fixa da Escola Superior de Tecnologia.

1.5 Objetivos específicos

- Realizar o levantamento bibliográfico dos assuntos a serem abordados no trabalho.

- Projetar e construir um modelo físico com a temperatura como variável controlada.
- Elaborar o algoritmo de aquisição de dados, afim de utilizá-lo na identificação do sistema.
- Identificar o sistema afim de obter seu modelo matemático.
- Estudar técnicas de controle e definir qual será implementada no sistema para teste inicial.
- Definir um *software* para em sua interface executar as técnicas de controle.
- Analisar as peculiaridades da técnica de controle a ser implementada no sistema.

1.6 Metodologia

Inicialmente foram realizadas pesquisas bibliográficas nas áreas de controle de processos, sensores de temperatura, identificação de sistemas, microcontroladores, circuitos integrados, atuadores e interfaces computacionais.

Em seguida foi definido a forma de funcionamento do sistema, sendo efetuada uma estimativa orçamentária dos materiais e equipamentos a serem utilizados nas estruturas física e não-física afim de confirmar sua possibilidade de implantação no projeto.

A identificação do sistema foi feita sucessivamente ao item anterior, sendo realizada pelo método de identificação de processos por teste de resposta ao degrau objetivando o estudo da resposta do sistema mediante uma excitação na entrada.

Em seguida à identificação foi utilizado o software Matlab/Simulink® para implementar a técnica de controle escolhida pela autora sob a diretriz de seu orientador.

Por fim foi aplicado ao processo a técnica de controle PID mediante o métodos de sintonia adotado, utilizando temperatura como variável controlada e um ventilador como atuador do processo desempenhando a função de entrada ou referência do sistema.

1.7 Estrutura do documento

O presente projeto tem sua estrutura constituída em 6 capítulos, a serem elucidados a seguir:

1. Capítulo 1: é feita uma abordagem introdutória do trabalho, ressaltando características originárias do mesmo, bem como seu escopo e a forma com que foi realizado, fazendo-se um apanhado geral sobre sua finalidade e importância tanto no meio social quanto acadêmico.

2. Capítulo 2: tem o objetivo de fazer a revisão da literatura, onde serão apresentados assuntos pertinentes ao trabalho e com os quais é facilitada a compreensão do mesmo na íntegra.
3. Capítulo 3: corresponde à pesquisa bibliográfica com o propósito de mapear e discutir três produções acadêmicas no campo do conhecimento referente ao escopo do presente projeto, objetivando responder quais aspectos então em destaque em diferentes pesquisas e de que forma as mesmas estão sendo concebidas.
4. Capítulo 4: são enumeradas especificações de *hardware* enfatizando a motivação em utilizá-las, bem como a forma com que as mesmas foram implementadas no projeto. Por outro lado são demonstrados as etapas de montagem, comunicação serial bem como implementação de técnicas de controle no projeto.
5. Capítulo 5: nesta etapa podem ser visualizados os quocientes das etapa anteriores.
6. Capítulo 6: conclusão do trabalho.

2 ESTADO DA ARTE

Afim de enfatizar a importância do estudo e da elaboração de plantas didáticas bem como fazer um levantamento bibliográfico e crítico do tema abordado, estão listados nas seções 2.1, 2.2 e 2.3: duas monografias e um artigo submetido ao Congresso Brasileiro em Educação e Engenharia (COBENGE) no ano de 2014, onde os mesmos abrangem diversas áreas do conhecimento todavia com o mesmo escopo do aprendizado por intermédio de ferramentas didáticas.

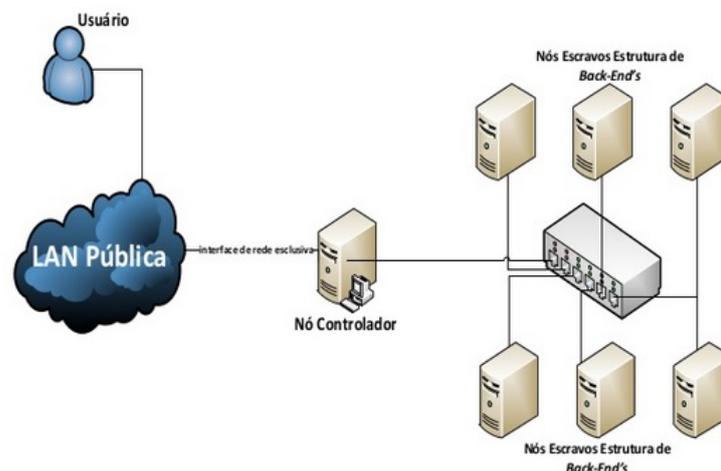
2.1 Simulação de modelos matemáticos de uma planta didática para controle de nível em um cluster Beowulf

Nesta monografia, é proposta a montagem e configuração de um *cluster* ou aglomerado de computadores como o sistema operacional *Linux Ubuntu* instalado e tendo a configuração do tipo *Beowulf*, conectados por meio de cabos de rede *Ethernet* por intermédio de um equipamento denominado *switch* (SILVA, 2012).

Sendo posteriormente realizada a modelagem da planta didática para fins de simulações comportamentais da planta no MATLAB® com o propósito de comparação com o comportamento da planta real.

O tipo de *cluster* escolhido pelo autor foi o tipo *Beowulf* que tem como uma das principais características a presença de pelo menos um sistema que atua como mestre em um nó, diferente dos *clusters* comuns que são aglomerados que possuem em sua maioria somente um computador atuando como mestre.

Figura 1 – Diagrama básico de um cluster Beowulf.



Fonte: (RODRIGUES, 2011)

Apesar da popularidade e larga utilização dos *clusters* é necessário a observância de pontos tais como a maioria do hardware de rede não foi criada para o processamento em paralelo, situação essa que diminui a gama de softwares que atendem às especificações de suporte dos *clusters* não entendendo-os como sistemas únicos, havendo necessidade também de um conhecimento de administração de sistemas Linux visto que a configuração dos nós pode não ser tão trivial.

Após a construção do *cluster Beowulf* em laboratório constituído de 4 gabinetes com 10 núcleos, o autor estabeleceu o modo de comunicação entre os nós por intermédio de um *switch*.

A rede adotada foi a *Ethernet* e a topologia estrela, configurações essas utilizadas em larga escala no que tange às redes de computadores.

A comunicação do *cluster* com o software MATLAB® foi feita por intermédio de um *toolbox* denominado *Parallel Computing* que tem a função de fazer cálculos complexos no utilizando os núcleos do *cluster* em paralelo.

Feitos os testes de conexão para firmar a velocidade de processamento do clusters o autor deu início à modelagem do sistema de nível bem como a linearização do mesmo.

A simulação do sistema foi feita no MATLAB®, utilizando dados analíticos e numéricos descritos em equações que descrevem o comportamento dos fluidos, observando-se os 5 tanques que compunham o sistema de nível e por meio da simulação iniciou-se o processo de modelagem.

Figura 2 – Comparação de processamento em série e paralelo.

```
< In Modelagem_Simulacao_SistemaNivelTemperatura at 174
Starting matlabpool using the 'labsister01' profile ... connected to 3 labs.
Warning: Imaginary parts of complex X and/or Y arguments ignored
> In Modelagem_simulacao_SistemaNivelTemperatura at 372
Computador principal:
Tempo gasto em serie= 8.896598 segundos.
Matlab rodando no Cluster Beowulf:
Tempo gasto em paralelo= 5.114586 segundos.
O cluster gasta apenas 57.489234% do tempo de processamento do matlab comum.
;>> |
```

Fonte: (SILVA, 2012)

O autor obteve o modelo matemático de cada tanque separadamente por intermédio das variáveis de simulação e somente assim pôde ser feito o controle do nível e temperatura dos tanques.

Realizando um comparativo entre sistemas que trabalham em série e sistemas que trabalham em paralelo (*clusters*), o sistema em série utilizou 8.89 segundos com computação, por outro lado o sistema em paralelo utilizou 5.11 segundos, concluindo que com cluster o processo de simulação chegou a gastar apenas 57,5% do tempo total em processamento da computação em série (SILVA, 2012), como pode ser visto na Figura 2.

2.2 Sistema didático para controle de nível e temperatura

Segundo Barcelos (2005), “este trabalho implementa um sistema para o controle de nível e temperatura em uma bancada didática utilizando um controlador programável com módulos analógicos e digitais de entrada e saída”.

Primeiramente o autor faz uma abordagem sobre os principais elementos de um sistema de automação industrial, incluindo itens como atuadores, sensores, CLP's (controladores lógicos programáveis) e sistemas supervisórios.

Posteriormente faz uma descrição detalhada do sistema montado, sendo composto por dois reservatórios de água, uma válvula manual, uma bomba centrífuga, uma resistência de aquecimento, sensores de nível e temperatura e um CLP.

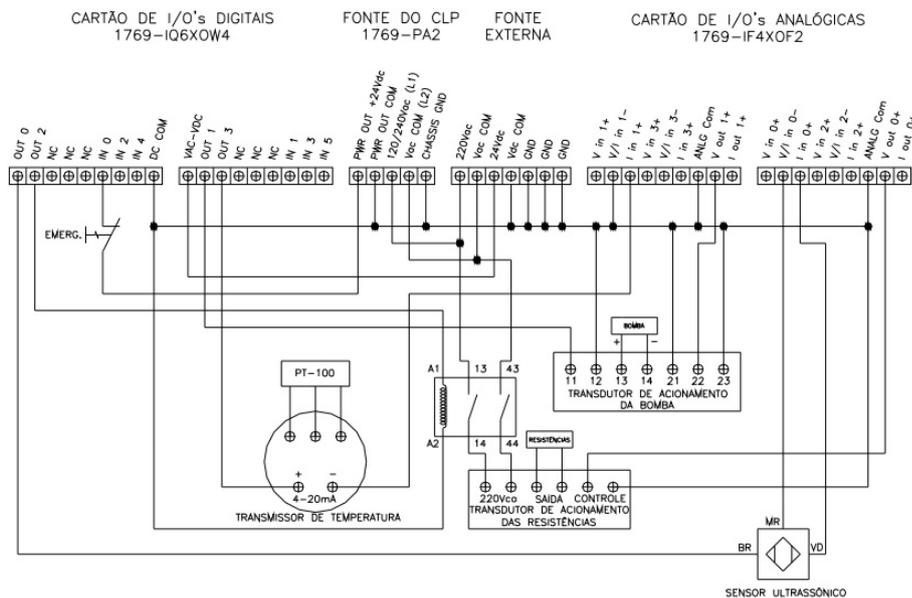
Vale ressaltar que a planta foi anteriormente adquirida pelo autor, sendo somente implementada a estrutura para o controle de temperatura, a qual não é adicionada neste módulo didático da *Rockwell Automation*.

O sistema funciona da seguinte maneira: o nível do reservatório superior é medido por um sensor ultrassônico e o acionamento da bomba é regulado por um amplificador. Sendo a temperatura da água do reservatório inferior medida por uma termorresistência sendo necessária a inserção de um transmissor de temperatura para enviar sinais padronizados (4 a 20mA) para o CLP.

A água é aquecida por uma resistência de aquecimento, sendo seu acionamento feito em tensão variável por uma placa de controle de potência, recebendo os sinais de controle do CLP.

Na Figura 3 está ilustrada o esquema de ligação da planta didática do referido trabalho.

Figura 3 – Esquema de ligação dos equipamentos.



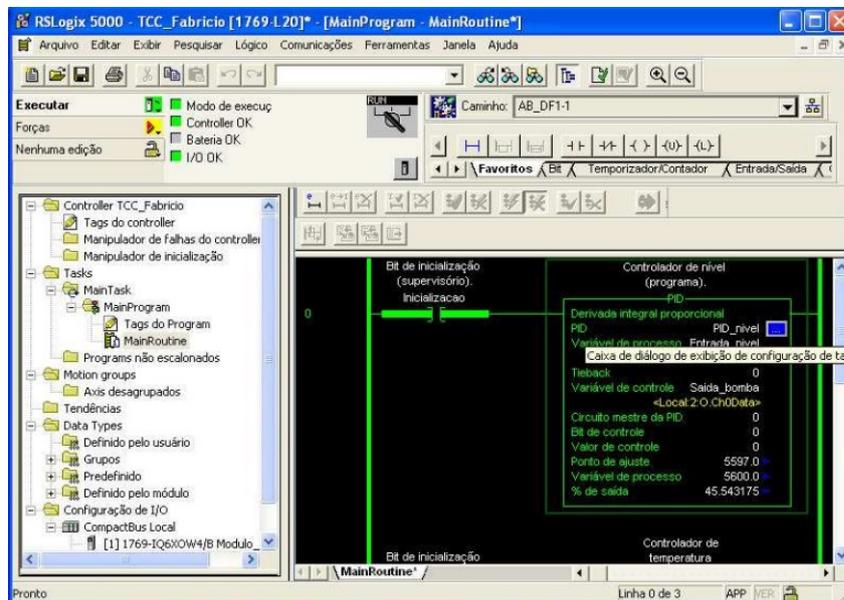
Fonte: (BARCELOS, 2005)

Na sequência é feita a programação do controlador programável, sendo utilizado o modelo *Compact Logix 5320* da empresa *Rockwell Automation*. Sendo feitas especificações técnicas que podem ser encontradas nos anexos do referido trabalho.

No entanto antes de fazer a programação é necessário fazer a configuração do CLP com o computador, e para obter um resultado positivo foi utilizado a seguinte sequência na interface do controlador: criação do projeto, seleção de módulos de entrada e saída, *tags* analógicas e digitais associadas aos módulos, ajuste do caminho de comunicação pela interface e envio do programa ao controlador.

A Figura 4 ilustra a interface empregada pelo autor, utilizando linguagem *ladder* e com o bloco do controlador PID implementado.

Figura 4 – Bloco PID no diagrama Ladder.



Fonte: (BARCELOS, 2005)

Por fim, foi implementado controladores PID tanto para controle de nível quanto de temperatura, sendo que as medições em malha fechada comprovaram a estabilidade do sistema, porém com oscilações em regime permanente.

Para os valores dos ganhos do controlador PID na malha de temperatura foram calculados mediante utilização do método de Smith, e os valores de ganhos do controlador na malha de nível devido à não-linearidade do sistema foram utilizadas os valores médios das respostas em malha aberta.

Segundo Barcelos (2005), “no sistema de controle de nível, conseguiu-se eliminar o problema das oscilações em regime permanente com a atenuação do ganho integral e a adição do ganho derivativo”, sendo que os ganhos foram obtidos mediante testes em malha fechada.

2.3 Construção e utilização de protótipo didático de controle de nível de líquidos não-linear multivariável

Este artigo aborda a utilização didática do Sistema de Controle de Níveis de Líquidos em Tanques – SICONILI como ferramenta de aprimoramento técnico tendo como foco os acadêmicos de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Resaltando que esta planta didática foi construída por (JUNIOR, 2008) e posteriormente utilizada por (BARREIROS; ANDRADE, 2014) também discente da Universidade Federal do Pará.

A decisão do estudo e montagem dessa planta são seus aspectos não-lineares bem como seu caráter multivariável.

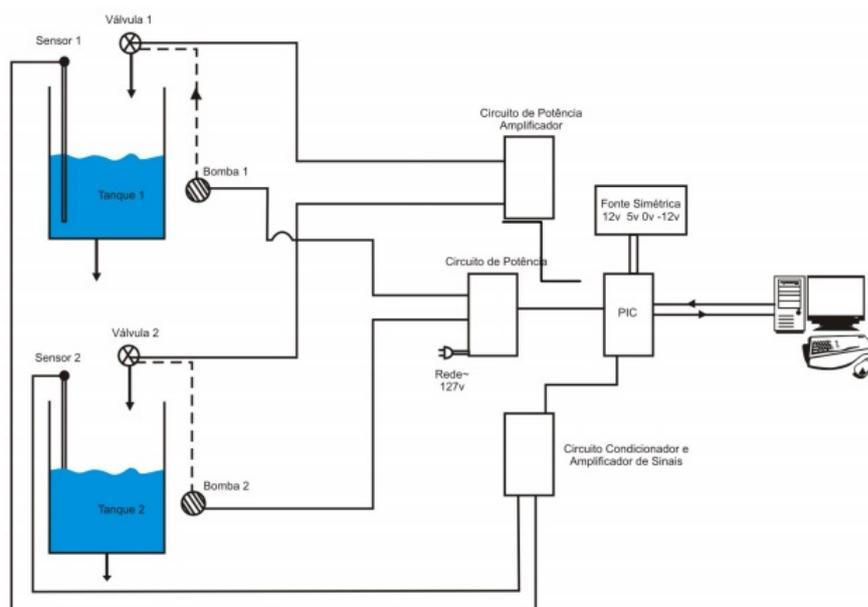
Sendo um sistema que teve o estudo teórico sobre suas equações matemáticas previamente demonstrado em (AGUIRRE, 2007), (ANDRADE, 2009) e (JUNIOR, 2008), o autor demonstrou sua modelagem de forma breve e resumida.

Dessa forma o autor aborda neste um exemplo de utilização da planta bem como a implementação de uma técnica de controle para a mesma.

Segundo Barreiros e Andrade (2014), “o controlador adquire um valor de referência na entrada e realiza uma comparação do valor da referência com o valor adquirido pelo sensor de nível”, onde a tensão das válvulas é calculada conforme o erro medido.

A Figura 5 ilustra o esquemático do sistema em diagrama de blocos.

Figura 5 – Esquema em blocos do sistema de nível de líquidos.



Fonte: (BARREIROS; ANDRADE, 2014)

No exemplo abordado pelo autor é implementado o controle por alocação de pólos com

integradores na saída, sendo baseado na teoria de (PARASKEVOPOULOS, 1996), que generaliza a técnica para sistemas multivariáveis.

Segundo Barreiros e Andrade (2014), “a técnica de alocação de pólos consiste em ajustar os pólos de malha fechada do sistema apenas ajustando os ganhos de realimentação dos estados do sistema”. Enfatizando características como estabilidade em malha aberta, controlabilidade e observabilidade, visto que são informações necessárias ao uso de controladores no sistema.

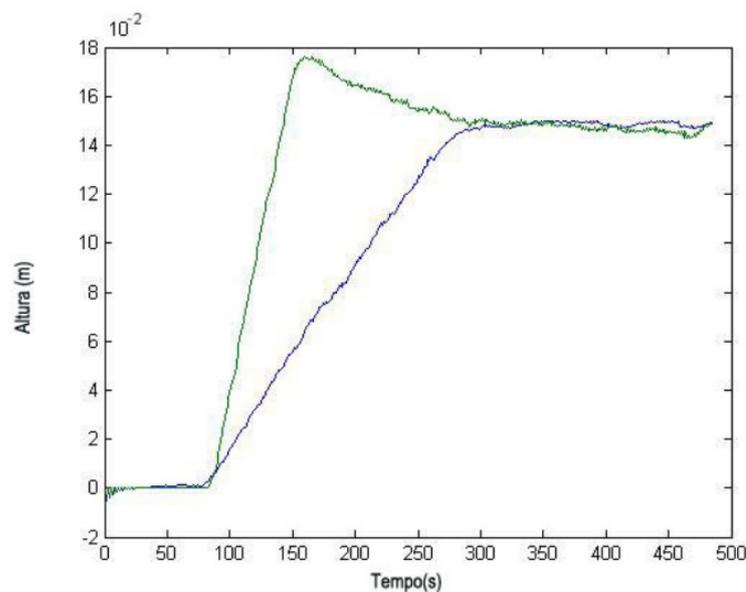
Posteriormente é feita a representação do sistema por espaço de estados afim de de realizar uma análise da estabilidade do sistema e concluir que o sistema é estável dentro do seu ponto de operação.

Empregando da técnica de alocação de pólos o autor obteve um sistema de 4^a ordem devido aos 4 pólos apresentados pelo sistema, obtendo os valores da matriz de realimentação de estados K, sendo que o discente pode escolher quatro valores para os pólos de malha fechada de acordo com as características desejadas pelo sistema.

Para os quatro valores encontrados, os dois primeiros referem-se à dinâmica do sistema e os dois últimos ao integrador de saída. Esse pólos podem ser escolhidos de forma heurística ou conforme as peculiaridades requeridas pelo sistema.

A saída do sistema foi simulada no software Labview®, para o tanque 1 o nível de referência foi 0,15 m de altura alterando-se posteriormente para 0,10 m de altura, por outro lado o tanque 2 com nível de referência 0,10 m de altura decresceu para 0,05 m.

Figura 6 – Gráfico de ensaio real do Sistema de Nível de Líquidos.



Fonte: (BARREIROS; ANDRADE, 2014)

Para realizar o ensaio em tempo real (BARREIROS; ANDRADE, 2014) utilizou os valores de K previamente calculados, e obteve a saída do sistema ilustrada na Figura 6, concluindo que a técnica utilizada realiza o controle satisfatório do sistema.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Os passos dados afim de desenvolver o presente projeto iniciaram-se na pesquisa de material bibliográfico sobre assuntos pertinentes ao trabalho abrangendo as características físicas da modelo didático abordado, bem como as especificações conceituais das técnicas de controle clássico e moderno a serem implementadas.

3.1 Sistemas térmicos ou termodinâmicos

Segundo Ogata (2013), “sistemas térmicos são aqueles que envolvem transferência de calor de uma substância para outra”. Podendo ser analisados de suas maneiras: resistência e capacitância, onde a primeira se dá por condução, convexão ou radiação e a segunda caracteriza-se a componentes que apresentam características capacitivas ou de armazenamento de energia.

Na indústria assim como em nosso dia-a-dia podemos citar múltiplos exemplos de sistemas térmicos tais como: caldeiras a vapor, centrais geradoras de energia elétrica, condicionadores de ar, motores a combustão, evidenciando a tanto a presença quanto a importância dos sistemas térmicos.

Considerando que a maioria dos processos térmicos nos sistemas de controle não envolve transferência de calor por radiação (OGATA, 2013), tem-se somente para a condução e convexão:

$$q = K * \Delta\theta \quad (3.1)$$

onde:

q = taxa de fluxo de calor (kcal/s)

$\Delta\theta$ = diferença de temperatura (°C)

K = coeficiente (kcal/s)

O coeficiente K tem equações diferenciadas para condução e convexão:

Condução:

$$K = \frac{kA}{\Delta x} \quad (3.2)$$

Convexão:

$$K = HA \quad (3.3)$$

onde:

k = condutividade térmica (kcal/m s °C)

A = área normal ao fluxo de ar (m²)

Δx = espessura do condutor (m)

H = coeficiente de convexão

3.1.1 Propagação de calor por convecção térmica

É a transferência de energia térmica pelo movimento de moléculas de uma parte do material para outra. A convecção térmica acontece à medida que aumenta o movimento das moléculas e por conseguinte a transferência de calor.

Sendo regida pela Lei do Resfriamento de Newton, e sua representação matemática pode ser observada na Equação 3.4 :

$$q = hA(T_s - T_e) \quad (3.4)$$

onde:

h = coeficiente de transferência de calor por convecção (m/t^3T)

A = área de troca de calor (m^2)

T_s = temperatura externa ($^{\circ}C$)

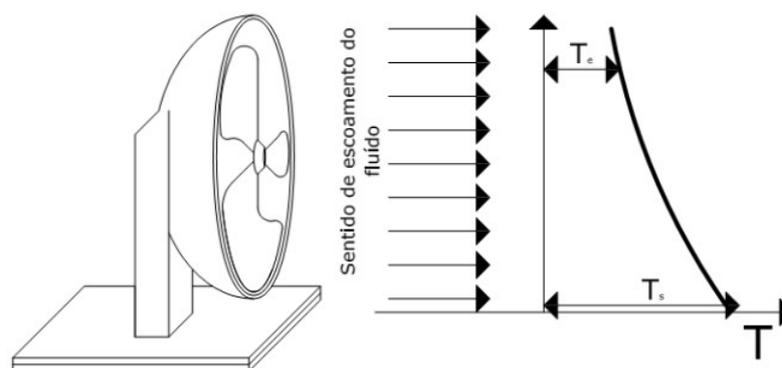
T_e = temperatura do fluido ($^{\circ}C$)

A convecção térmica pode acontecer de duas maneiras:

- Convecção natural: é causada pelas variações de densidade e temperatura, onde essas diferenças juntamente com o empuxo causam o movimento dos fluidos.
- Convecção forçada: atua de forma a induzir o movimento das moléculas mediante a utilização de fontes externas.

Na Figura 7 pode ser visto um exemplo de convecção forçada, onde a mesma acontece mediante a atuação de um ventilador o qual representa a fonte externa atuante.

Figura 7 – Transferência de calor por convecção



Fonte: (JUNIOR, 2012)

3.1.2 Calor específico à pressão constante

- Calor específico à pressão atmosférica constante (C_p): é o coeficiente da quantidade de energia (Q) fornecida por calor a um corpo pelo correspondente acréscimo de temperatura (Δt), caracterizando não o corpo mas a substância que o constitui é definido pela unidade de massa (m) do corpo:

$$C_p = \frac{Q}{m * \Delta t} \quad (3.5)$$

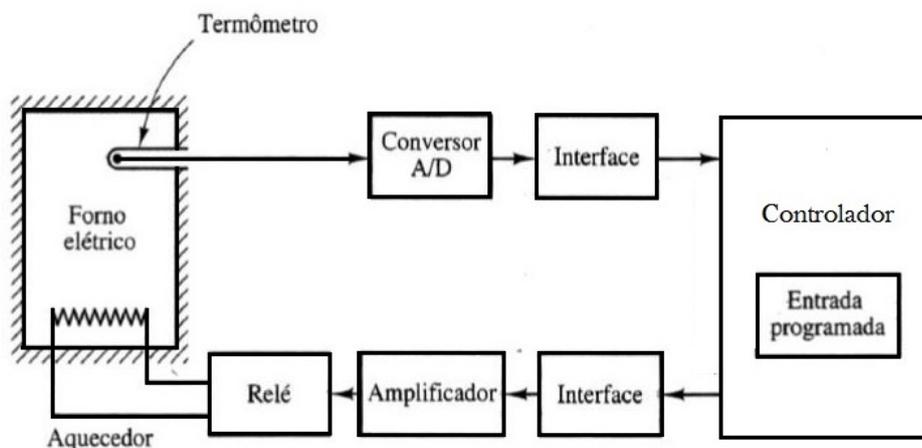
Em outras palavras, representa a quantidade de energia necessária para elevar de 1°C a temperatura de 1 grama da substância a ser considerada.

3.2 Sistemas de controle de temperatura

Segundo Ogata (2013), “um sistema a controlar é uma parte de um equipamento, eventualmente um conjunto de itens de uma máquina que funcionam juntos e cuja finalidade é desempenhar uma determinada operação”, ou seja, tem como objetivo controlar uma grandeza n na saída mediante um estímulo gerado na entrada.

Na Figura 8, pode ser visto o esquemático do controle da temperatura de um forno elétrico, onde a temperatura do mesmo é medida por um termômetro sendo necessária a conversão A/D (Analogico/Digital), afim de enviar os dados à uma interface conectada ao computador, onde será feita a relação entrada-saída do sistema afim de calcular os valores desejados da variável manipulada com base nos dados retornados pelo sistema.

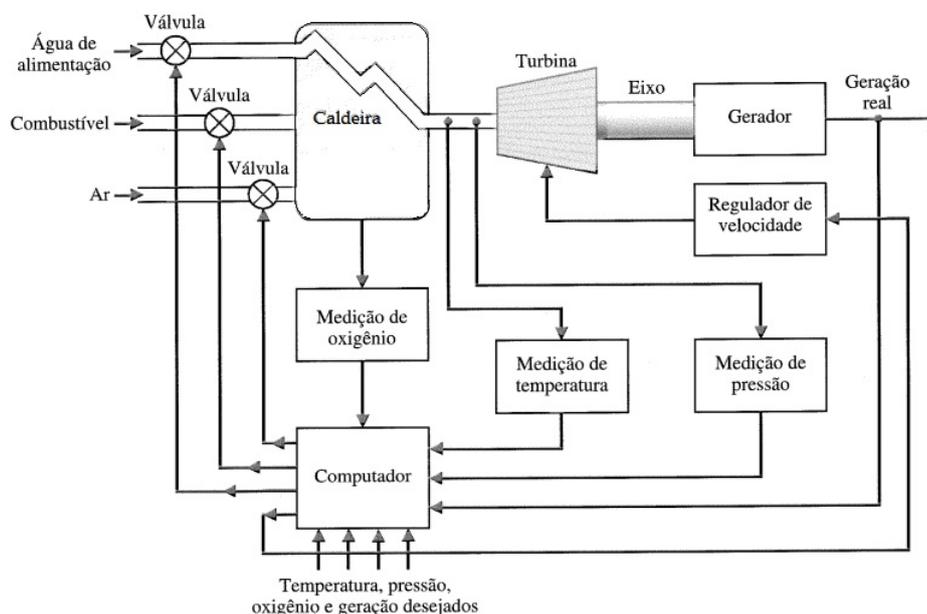
Figura 8 – Sistema de controle de temperatura.



Fonte: (OGATA, 2013)

A Figura 9 ilustra segundo Bishop (2013), “o esquemático de um modelo simplificado mostrando algumas das variáveis de controle importantes de um grande sistema com gerador térmico de caldeira”, onde variáveis de processo são medidas e controladas afim de realizar a otimização do referido processo, demonstrando o interesse da inserção do conhecimento prático do controle de variáveis essenciais como vazão, nível e temperatura, dentre outras.

Figura 9 – Sistema de controle coordenado para um termogerador.



Fonte: (BISHOP, 2013)

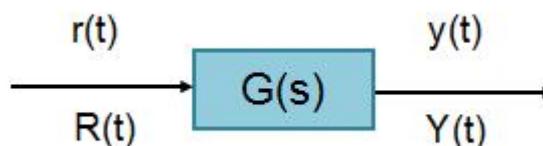
3.3 Análise de sistemas de controle pelo método de resposta em frequência

Segundo Ogata (2013), “o termo resposta em frequência significa a resposta em regime permanente de um sistema a uma entrada senoidal”, cuja frequência é variada dentro de uma faixa pré-estabelecida afim fazermos o estudos da resposta.

Uma das vantagens da utilização do método de resposta em frequência, reside no fato de que a mesma pode ser obtida experimentalmente, sem a necessidade do conhecimento antecipado da função de transferência.

Considerando o sistema linear, estável e invariante no tempo, como o ilustrado na Figura 10, possuindo $G(s)$ como função de transferência, e entrada $r(t)$ e saída $y(t)$ no domínio do tempo.

Figura 10 – Diagrama de blocos de um sistema estável, linear e invariante no tempo.



Fonte: Adaptado (OGATA, 2013)

Sendo a função de transferência $G(s)$ representada pela Equação 3.6:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} \quad (3.6)$$

E o sinal de entrada $r(t)$ representado pela Equação 3.7:

$$r(t) = R \operatorname{sen} \omega t \rightarrow R(s) = R \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (3.7)$$

Logo

$$Y(s) = G(s) R \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} = \frac{a}{s + j\omega} + \frac{a'}{s - j\omega} + \frac{b_1}{s + p_1} + \dots + \frac{b_n}{s + p_n} \quad (3.8)$$

Sendo a e b_i , $i = 1, \dots, n$ constantes e a' o conjugado complexo de a

Logo aplicando-se a transformada inversa de Laplace, obtem-se a resposta $y(t)$ temporal, para $t > 0$:

$$y(t) = a e^{-j\omega t} + a' e^{j\omega t} + b_1 e^{-p_1 t} + \dots + b_n e^{-p_n t} \quad (3.9)$$

Se $Y(s)$ envolve múltiplos pólos de multiplicidade, $y(t)$ terá a forma:

$$t^{hj} e^{-p_j t} \quad (3.10)$$

No entanto como o sistema foi inicialmente considerado estável:

$$t^{hj} e^{-p_j t} \rightarrow 0, t \rightarrow 0 \quad (3.11)$$

Sendo a resposta no regime estacionário dado na Equação 3.12:

$$y_{ss}(t) = a e^{-j\omega t} + a' e^{j\omega t} \quad (3.12)$$

Avaliando-se a e a' da Equação 3.12:

$$a = G(s) \frac{\omega R}{s^2 + \omega^2} (s + j\omega) \Big|_{s=-j\omega} = -\frac{RG(-j\omega)}{2j} \quad (3.13)$$

$$a' = G(s) \frac{\omega R}{s^2 + \omega^2} (s - j\omega) \Big|_{s=j\omega} = \frac{RG(-j\omega)}{2j} \quad (3.14)$$

Sendo $G(j\omega)$ uma função de variável complexa, sendo demonstrada na Equação:

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| e^{j\phi} \quad (3.15)$$

Onde ϕ é representado na Equação 3.16:

$$\phi = \angle G(j\omega) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\operatorname{Im}(G(j\omega))}{\operatorname{Re}(G(j\omega))} \right\} \quad (3.16)$$

Obtendo-se $G(-j\omega)$ na Equação:

$$G(-j\omega) = |G(-j\omega)|e^{-j\phi} = |G(j\omega)|e^{-j\phi} \quad (3.17)$$

Portanto, substituindo-se os valores de a e a' na Equação 3.12:

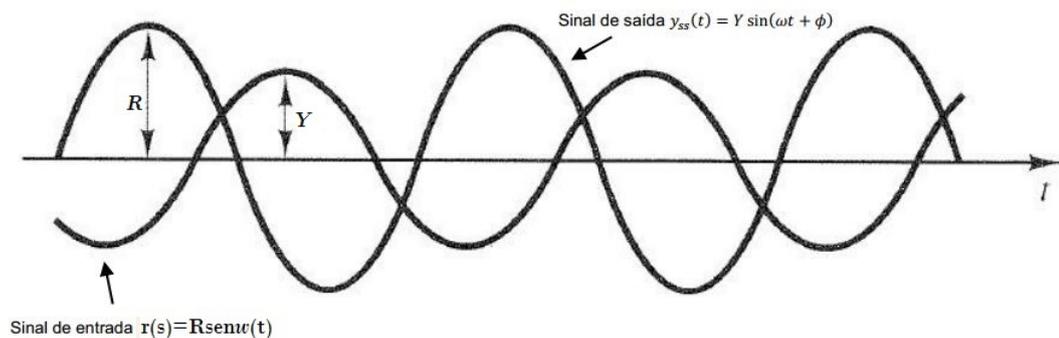
$$y_{ss}(t) = -\frac{RG(-j\omega)e^{-j\phi}}{2j}e^{-j\omega t} + \frac{RG(-j\omega)e^{j\phi}}{2j}e^{j\omega t} = R|G(j\omega)|\text{sen}(\omega t + \phi) \quad (3.18)$$

Sendo:

$$Y = R|G(j\omega)| \quad (3.19)$$

Na Figura 11 é ilustrada a entrada senoidal em estado estacionário, sendo também a saída senoidal, tendo a mesma frequência de entrada no entanto com amplitudes diferentes.

Figura 11 – Sinais senoidais de entrada e saída.



Fonte: Adaptado (OGATA, 2013)

Funções de transferência senoidais tem como principais características seu módulo e ângulo de fase, sendo a frequência utilizada como parâmetro, haja vista, existem três representações das funções de transferência senoidal comumente utilizadas:

1. Diagrama de Bode ou gráfico logarítmico.
2. Diagrama de Nyquist ou diagrama polar.
3. Diagrama do logaritmo do módulo *versus* ângulo de fase ou carta de Nichols

Sendo o primeiro método de representação de função de transferência senoidal a ser utilizado no presente projeto, na subseção 3.3.1 serão aprofundados os conhecimentos sobre o mesmo, dispondo de vantagens tais como: a multiplicação e o produto dos módulos pode ser convertida em soma, fornece boas aproximações mediante seguimentos de reta, maior abrangência de variáveis envolvidas em especial a frequência, dentre outras.

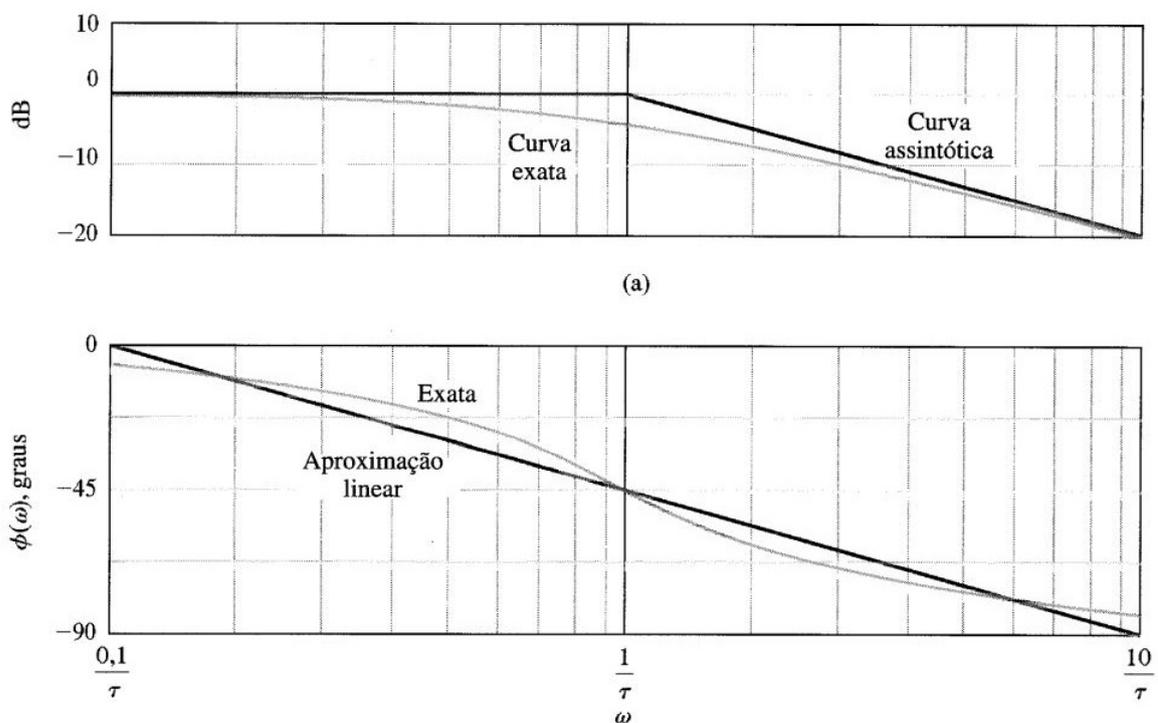
3.3.1 Diagrama de Bode ou diagrama logarítmico

Dois gráfico gráficos representam os diagramas de Bode, são eles:

- Gráfico logarítmico do módulo de uma função senoidal $G(j\omega)$ versus frequência ω . (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011)
- Gráfico logarítmico do ângulo de fase de uma função senoidal $G(j\omega)$ versus frequência ω . (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011)

O logaritmo do módulo de $G(j\omega)$ tem como representação $20\log|G(j\omega)|$, sendo o logaritmo de base 10 e tendo como unidade utilizada o decibel (dB)

Figura 12 – Diagrama de bode para $(1 + j\omega\tau)^{-1}$



Fonte: (BISHOP, 2013)

A Figura 12 ilustra as curvas real e aproximada no diagrama de Bode.

Portanto, mediante o conhecimento da representação da função de transferência senoidal por intermédio do diagrama de Bode, é necessário a inserção de dois parâmetros estritamente necessários para o controle de sistemas:

- Margem de ganho (γ_m): é obtida usando o gráfico de fase para encontrar a frequência, sendo o ângulo de fase de 180° para que o sistema em malha fechada se torne instável (NISE; SILVA, 2009). Sendo representada matematicamente pela Equação 3.20:

$$\gamma_m = \frac{1}{|G(j\omega_{cp})|} \quad (3.20)$$

Em decibéis:

$$\gamma_m dB = 20 \log(\gamma_m) = -20 \log|G(j\omega_{cp})| \quad (3.21)$$

Configurando-se de forma que expressa em dB será positiva para $\gamma_m > 1$ caracterizando um sistema estável, e negativa para $\gamma_m < 1$ caracterizando um sistema instável, no entanto esse princípio não se aplica a um sistema de fase não-mínima, o qual possui comportamento contrário ao estudado neste projeto.

Sendo a faixa recomendada de margem de ganho, estão inserido na Tabela 1 valores sugeridos por alguns autores:

Tabela 1 – Valores de margem de fase sugerida por alguns autores.

Autor	Margem de fase sugerida
(OGATA, 2013)	$\gamma_m > 6dB$
(ASTRÖM; HÄGGLUND, 1995)	$6dB \leq \gamma_m \leq 14dB$
(KETZER, 2013)	$\gamma_m > 4.6dB$
(JOHSON, 2005)	$6dB \leq \gamma_m \leq dB$

Fonte: A autora

- Margem de fase(ϕ_m): segundo (NISE; SILVA, 2009), “a margem de fase é obtida usando a curva de magnitude para encontrar a frequência, onde o ganho é 0 dB”, por outro lado pode ser calculada de maneira a somar 180° e $argG(j\omega_{cg})$:

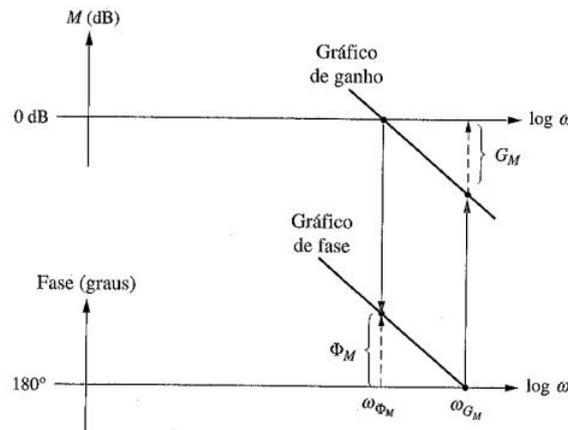
$$\phi_m = 180^\circ + argG(j\omega_{cg}) \quad (3.22)$$

A margem de fase possui características de estabilidade e instabilidade semelhantes às da margem de ganho.

Os valores sugeridos para margem de fase estão em um intervalo de $30^\circ \leq \phi_m \leq 160^\circ$ (ASTRÖM; HÄGGLUND, 1995), (JOHSON, 2005), (KETZER, 2013), (OGATA, 2013))

A Figura 13 ilustra a margem de ganho e de fase no diagrama de Bode, onde $GM = \gamma_m$.

Figura 13 – Margens de ganho e de fase nos diagramas de Bode.



Fonte: (NISE; SILVA, 2009)

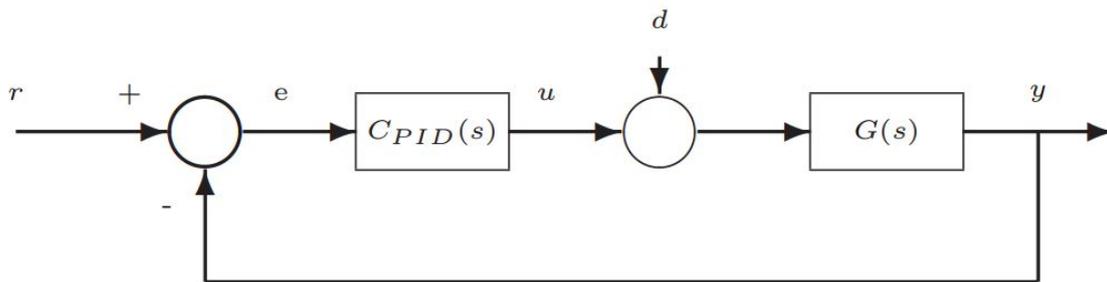
3.4 Método de sintonia baseado na otimização de um único parâmetro

Um método que objetiva a concepção de controladores PID no domínio da frequência baseado em uma otimização simplificada (SANCHIS; ROMERO; BALAGUER, 2010). Baseando na utilização de um único parâmetro de ajuste, sendo o processo de sintonização baseado no aumento do ganho do controlador sujeito a uma restrição de igualdade na margem de fase e uma desigualdade na margem de ganho.

Tem como principal vantagem a simplicidade na maximização do ganho do controlador, haja vista a que existe somente um parâmetro a ser sintonizado, além disso o método pode ser aplicado à qualquer modelo linear ou linearizado.

Sendo o modelo considerado para esse método como linear e invariante no tempo, tendo características intrínsecas à Figura 14, onde r representa o sinal de entrada do sistema, u representa a ação de controle, y a saída do sistema e d representa o distúrbio.

Figura 14 – Malha de controle PID SISO.



Fonte: (SANCHIS; ROMERO; BALAGUER, 2010)

Mediante cálculos matemáticos o autor obteve a função de transferência do controlador PID, sendo representado pela Equação 3.23, na qual é considerado um filtro de alta frequência no termo derivativo, em um controlador PID com estrutura não-interativa:

$$C(s) = Kp \left(1 + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d s}{N'}} + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.23)$$

No entanto este método tem as seguintes restrições:

- Margem de fase requerida ($\phi_{m,r}$): a margem de fase do sistema (ϕ_m) deverá ser igual à este parâmetro, ou seja, $(\phi_m) = (\phi_{m,r})$.
- Margem de ganho requerida ($\gamma_{m,r}$): a margem de ganho do sistema (γ_m) deverá ser maior ou igual à margem de ganho requerida, ou seja, $(\gamma_m \geq \gamma_{m,r})$.
- Boa rejeição ao distúrbio

Com as hipóteses iniciais sobre o modelo já definidas, pode-se então iniciar os procedimentos afim de alcançarmos os objetivos supracitados.

Inicialmente é necessária a redução do IE (erro integral), mediante a utilização da Equação 3.24:

$$IE = \frac{1}{K_i G(0)} \quad (3.24)$$

Podemos observar que na Equação 3.24 o IE é inversamente proporcional ao ganho K_i , sendo necessário encontrar o valor mínimo do IE afim de maximizar o ganho K_i .

Fazendo considerações na Equação 3.23, sendo a primeira delas a igualdade dos zeros do controlador, situação essa de acordo com o autor causa uma pequena perda de performance tanto em processos industriais quando comparado a métodos que não utilizam essa hipótese, no entanto (SANCHIS; ROMERO; BALAGUER, 2010) considera que essa perda não é importante.

Considerando-se também que a função de transferência encontra-se no domínio da frequência basta substituir os termos s por $j\omega$, igualando-se os zeros do controlador, obtêve-se a Equação 3.25:

$$C(j\omega) = K_p \frac{(1 + \frac{j\omega}{Z_c}) + (1 + \frac{j\omega}{Z_c})}{j\omega(1 + \frac{j\omega}{Z_c N})} \quad (3.25)$$

Com isso, o argumento do controlador pode ser calculado, mediante a utilização da Equação 3.16.

Mediante observação das equações encontradas em (SANCHIS; ROMERO; BALAGUER, 2010), há a inserção de um novo parâmetro considerado pelo autor como a variável chave para o problema de minimização do erro integral, sendo a mesma representada na Equação 3.26 e é definida como a razão entre a frequência de cruzamento de ganho e o zero do controlador:

$$a = \frac{\omega_{cg}}{Z_c} \quad (3.26)$$

Faz-se necessário o conhecimento da margem de fase do processo, representada pela Equação , onde para um dado valor de a , pode-se encontrar o valor do argumento da função de transferência $G(j\omega)$ que cumprirá o requisito da margem de fase.

Sendo também necessário o conhecimento dos parâmetros K_i e γ_m , sendo o primeiro caracterizado pela Equação:

$$K_i = \frac{\omega_{cg}(\sqrt{1 + (\frac{a}{N})^2})}{|G(j\omega_{cg})|(1 + a^2)} \quad (3.27)$$

Onde para o ganho integral K_i é necessária a utilização da frequência de cruzamento de ganho, definida com o valor 1.

Por outro lado o cálculo da margem de ganho γ_m inicialmente encontra-se o valor de ω_{cp} denominada frequência de cruzamento de fase, na resposta em frequência da planta controlada.

$$\gamma_m = \frac{1}{|H(j\omega_{cp})|} \quad (3.28)$$

Tendo o parâmetro de margem de ganho igual ou superior à margem de ganho requerida, e de posse de todos os parâmetros do controlador, considera-se o processo de sintonia encerrado.

3.5 Controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo)

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo ou somente controlador PID consiste em um algoritmo matemático representado na Equação 3.32, e tem como objetivo o controle de variáveis de um sistema, permitindo que o mesmo atue de forma que o erro seja minimizado, aumentando assim a estabilidade do sistema.

Segundo Bishop (2013), “a popularidade dos controladores PID pode ser atribuída parcialmente ao seu desempenho robusto sobre uma grande faixa de condições operacionais e em parte à sua simplicidade funcional, que permite aos engenheiros operá-los de forma simples e correta”.

Nas subseções 3.5.0.1, 3.5.0.2 e 3.5.0.3 são descritos cada um dos termos do controlador PID, mostrando suas particularidades.

3.5.0.1 Ação de controle proporcional

A parcela proporcional do controlador PID pode ser representada pela Equação 3.29: onde:

$u(t)$ = sinal de saída do controlador

$e(t)$ = sinal de erro atuante

Kp = ganho proporcional:

$$u(t) = Kp * e(t) \quad (3.29)$$

A ação proporcional, como o próprio nome diz, age proporcionalmente à relação do erro entrada-saída do sistema. A resposta proporcional pode ser ajustada mediante o ganho Kp , e quanto maior o ganho proporcional maior o ganho do erro e mais instável o sistema, por outro lado quanto menor o ganho proporcional menor será o seu tempo de resposta.

3.5.0.2 Ação de controle integral

A relação entre o sinal de saída do controlador $u(t)$ é variado segundo uma taxa proporcional ao sinal de erro atuante $e(t)$, onde Ki é uma constante ajustável:

$$u(t) = Ki \int e(t) \quad (3.30)$$

A ação integral age proporcionalmente à integral do erro do sistema, sendo responsável por garantir um erro em regime permanente, acelerando o movimento do processo até o ponto desejado eliminando o erro ocorrido na função anterior. No entanto há soma de valores instantâneos o resultado pode ultrapassar o valor desejado, característica essa denominada *overshoot*.

3.5.0.3 Ação de controle derivativo

A ação de controle derivativo Kd relaciona o sinal de saída do controlador $u(t)$ proporcionalmente à taxa de variação do erro atuante $e(t)$:

$$u(t) = Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (3.31)$$

A ação de controle derivativa retarda a taxa de variação de saída do controlador, diminuindo o overshoot da função anterior, melhorando assim a estabilidade do controlador. No entanto esta ação tem predisposição à ruídos, pois é amplificado o ruído e o ganho Kd se os mesmos forem muito grandes causarão instabilidade no controlador.

3.5.0.4 Controlador PID

O modelo mais usual encontrado na literatura para o controlador PID é apresentado na Equação 3.32:

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + \frac{Kp}{Ti} * \int e(t) dt + KpTd \frac{de(t)}{dt} \quad (3.32)$$

onde, tem-se que:

$u(t)$ = sinal de saída do controlador

$e(t)$ = erro do sistema

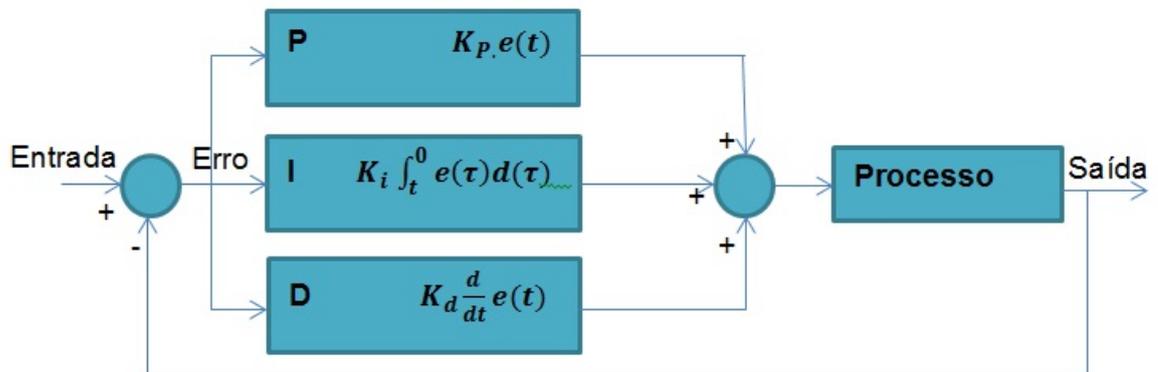
Kp = constante proporcional

Ti = tempo integrativo

Td = tempo derivativo

A Figura 15 representa o diagrama de blocos de um controlador PID atuando em uma planta ou processo.

Figura 15 – Diagrama de blocos de um controlador PID.



Fonte: Tradução da autora

O controlador PID combinando as ações supracitadas sendo que a ação integral está diretamente ligada à precisão do sistema, o efeito desestabilizador do controlador PI é contrabalançado pela ação de controle derivativa que tende a aumentar a estabilidade relativa do sistema ao mesmo tempo que torna a resposta do sistema mais rápida devido ao seu efeito antecipatório.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Pesquisa de mercado

Inicialmente foi realizada uma pesquisa de mercado com relação à sistemas de controle de temperatura disponíveis no mercado, onde as especificações de modelo, valores, características da planta e técnicas que podem ser implementadas na mesma encontram-se na Tabela 2:

Tabela 2 – Sistemas de controle de temperatura disponíveis no mercado.

Modelo	Característica	Técnicas de controle	Custo médio
CNi8C22	Controla o aquecimento	On-off e P, PID, PI, PD	R\$ 1.400,00
CN79000	Controla aquecimento ou refrigeração	On-off, P, PID	R\$ 1.500,00
CN4000	Controlador de temperatura microcontrolado	On-off ,PID, com alarme, Lógica Fuzzy	R\$ 1.700,00
CN950	Controlador de temperatura de bancada	Autoajuste PID, Onn-Off, Direto/Inversão	R\$ 2.300,00

Fonte: www.smar.com

Posteriormente foi feita aquisição dos componentes a serem utilizados no projeto e tendo como custo total apresentado na Tabela 3:

Tabela 3 – Custos da construção do protótipo utilizado no trabalho.

Componente	Modelo	Quantidade	Custo médio
Microcontrolador	Arduino UNO R3	1	R\$ 80,00
Ponte H	L298N	1	R\$ 20,00
Sensor temperatura	Módulo DS18B20	1	R\$ 23,00
Protoboard	mini protoboard	2	R\$ 20,00
Caixa acrílica	-	1	R\$ 50,00
Lâmpada 60 W	OSRAM	1	R\$ 5,00
Interruptor	-	1	R\$ 5,00
Ventoinha	E29477	2	R\$ 20,00
CUSTO TOTAL			R\$ 223,00

Fonte: A autora

Como pode ser observado comparando a Tabela 2 e o custo total da Tabela 3, a soma dos valores dos componentes a serem utilizados no protótipo apresenta uma boa relação custo benefício, iniciando-se então a construção do protótipo.

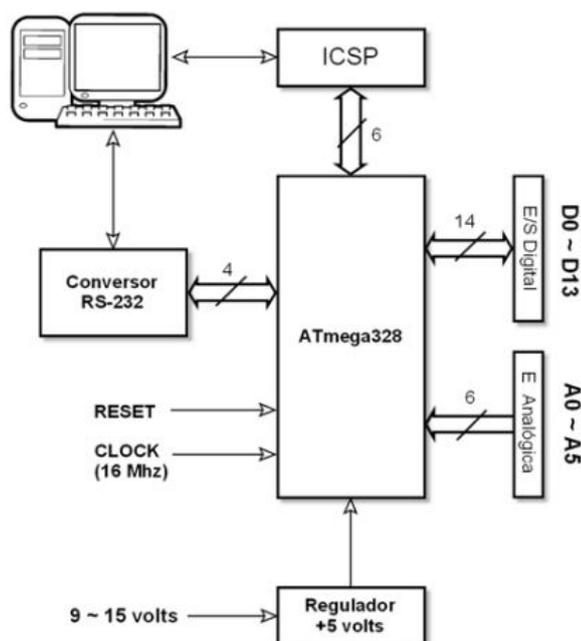
4.2 Especificações físicas do projeto

4.2.1 Microcontroladores

Um microcontrolador é um sistema computacional completo, ou seja, tem todas as características inerentes a um computador (processador, memória RAM, memória ROM). Sendo programados para exercerem funções específicas como controlar circuitos, podem ser encontrados dentro de outros dispositivos, onde são comumente denominados “controladores embutidos”.

A placa de prototipagem Arduino acompanha o microcontrolador ATmega328 com *bootloader* ou gerenciador de inicialização, conceituando-se como um aplicativo que escolhe o sistema operacional na memória para assumir o controle do equipamento, e tem seu diagrama de blocos ilustrado na Figura 16:

Figura 16 – Diagrama em blocos do Arduino.



Fonte: (SILVEIRA, 2011)

A utilização da placa Arduino depende da conexão USB com o computador, ou se houver algoritmo embarcado a mesma poderá ser ligada na alimentação DC ou uma bateria sem a necessidade de conexão com o computador.

Seu funcionamento baseia-se em obter dados do ambiente mediante a leitura de dispositivos conectados às entradas (sensores, potenciômetros, tacômetros) logo após processa os dados obtidos afim de controlar dispositivos periféricos ligados aos terminais de saída.

Na Tabela 4 estão relacionadas as principais características do Arduino UNO:

Tabela 4 – Características Arduino UNO

Item	Característica
Microcontrolador	ATmega328
Voltagem de operação	5V
Voltagem de entrada	7-12V
Entradas/Saídas Digitais	14 (6 possíveis PWM)
Entradas Analógicas	6
Memória Flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidade de <i>Clock</i>	16 MHz

Fonte: www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno

É possível notar no quarto item da Tabela 4 a característica de 6 entradas e saídas digitais tendo a possibilidade de utilização como PWM (*Pulse Width Modulation*), tal técnica consiste em manter a frequência de uma onda quadrada fixa e variar o tempo que o sinal fica em nível lógico alto. Sendo bastante utilizadas em controle de velocidade de motores, variação de luminosidade de *leds* e etc.

A programação da plataforma Arduino é feita em código aberto em uma IDE (*Integrated Development Environment*) disponibilizada no site pelo fabricante, IDE compatível com a maioria de sistemas operacionais existentes e tendo sua plataforma construída em linguagem Java.

No entanto é necessária a verificação da porta lógica a que o Arduino encontra-se conectado (ex: COM4), e logo após, poderá ser feito a compilação e *upload* dos algoritmos por intermédio da IDE.

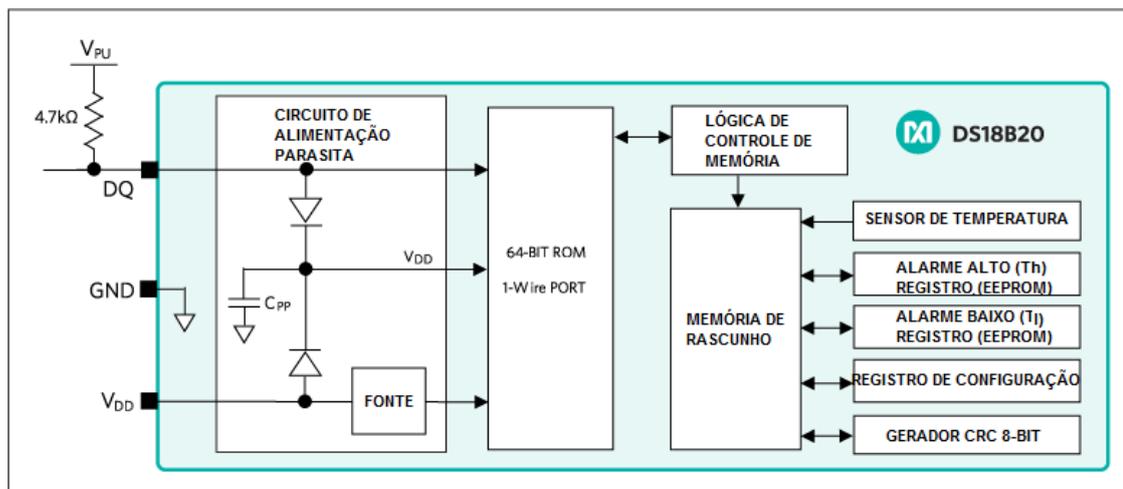
4.2.2 Sensor digital de temperatura

O sensor digital utilizado neste projeto foi o DS18B20, que encontra-se na categoria de sensores eletrônicos de temperatura, que configuram-se como CI's (Circuitos Integrados) inteligentes especialmente projetados para placas de circuito impresso, chegando a ter 3 possibilidade de encapsulamento.

Operando na faixa de -55°C à $+125^{\circ}\text{C}$, não necessitando de chips externos pois possuem conversão A/D interna e uma memória onde serão salvos os dados convertidos em um tempo máximo de 750 ms para cada conversão. Sua alimentação pode ser de na faixa de tensão de 3V à 5.5 V ou como circuito parasita, operando como um capacitor quando a corrente necessária está em nível alto.

O diagrama de blocos da estrutura interna do sensor DS18B20 é pode ser visualizado na Figura 17:

Figura 17 – Diagrama de blocos do sensor de temperatura DS18B20.

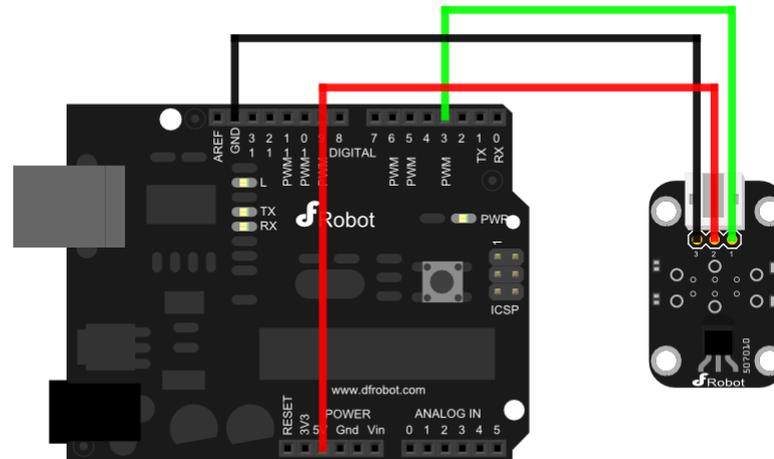


Fonte: Tradução da autora

Algumas características do sensor DS18B20:

- Circuito de alimentação parasita : consiste no circuito responsável pela alimentação interna do CI, podendo ela ser obtida diretamente através do pino VDD ou pelo carregamento do capacitor (C_{pp}) através do pino de dados DQ (alimentação parasita).
- ROM de 64 bits e porta 1-Wire: bloco responsável pelo armazenamento do código de ROM de 64 bits e pela porta 1-Wire onde haverá a transmissão de dados.
- Lógica de controle de memória: é o bloco responsável pelo gerenciamento e interpretação de dados recebidos e enviados pelo chip.
- Sensor de temperatura: elemento sensível à temperatura juntamente com o conversor A/D responsável pela conversão da temperatura.
- Registradores de acionamento de alarme (Th e Tl) : contém os dados de temperatura aos quais o acionamento torna-se ativo ou inativo, esses dados podem ser alterados, visto que a memória denomina-se EEPROM (não-volátil).
- Memória de rascunho: Consiste na memória de dados do sensor.
- Registrador de configuração: Contém a configuração da resolução 9 a 12 bits do DS18B20 e dependendo da resolução configurada o tempo de conversão máxima é alterado.
- Gerador de CRC: circuito que grava a memória CRC com base no que se encontra na memória de rascunho.

Figura 18 – Diagrama de conexão do módulo sensor DS18B20.



Fonte: www.dfrobot.com/index.php?title=18B20_Temperature_Sensor

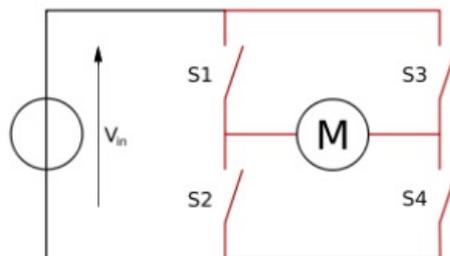
Na Figura 18 está representado o diagrama de ligação do módulo DS18B20 com a plataforma Arduino.

4.2.3 Circuito Ponte H

Sua principal característica é possuir dois terminais elétricos, um positivo e um negativo. Se a corrente elétrica percorre no sentido normal o eixo do motor gira para um lado. Se a corrente elétrica é invertida, o eixo gira no sentido inverso. O nome ponte H é dado pela forma que assume o circuito quando montado, como ilustra a Figura 19.

O circuito é construído com quatro "chaves" (S1-S4) que são acionadas de forma alternada (S1 e S4 ou S2 e S3). Para cada configuração das chaves o motor roda num sentido. As chaves S1 e S2 assim como as chaves S3 e S4 não podem ser ligadas ao mesmo tempo pois podem criar um curto circuito.

Figura 19 – Circuito da Ponte H.

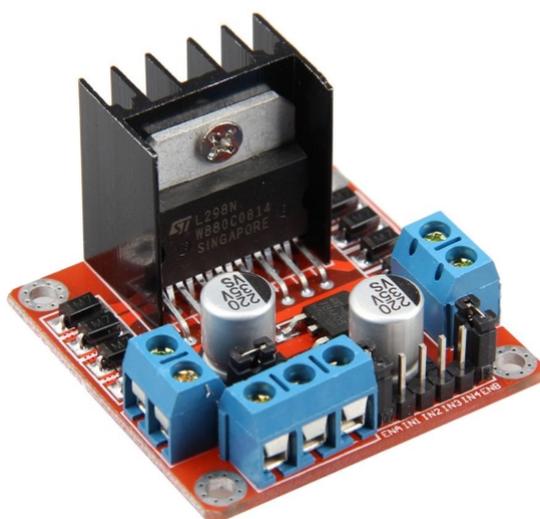


Fonte: lusorobotica.com/index.php?topic=262.0

4.2.3.1 Circuito Integrado L298N

Esse módulo é um circuito ponte h em um CI (circuito integrado), projetado para controlar cargas indutivas como relés, solenóides, motores DC e motores de passo, permitindo o controle não só do sentido de rotação do motor, como também da sua velocidade, utilizando os pinos PWM do Arduino.

Figura 20 – Circuito Ponte H L298N



Fonte: www.st.com/web/catalog/sense_power/product/63147

O módulo L298N é ilustrado na Figura 20, e tem como principais vantagens o pouco espaço que ocupa, baixa complexidade do circuito além de possuir duas pontes h, agregando assim a função de controlar dois motores DC ou um motor de passo, característica interessante para este trabalho visto que há necessidade da utilização de dois motores DC.

Na Tabela 5 são listados itens especificados do CI L298N.

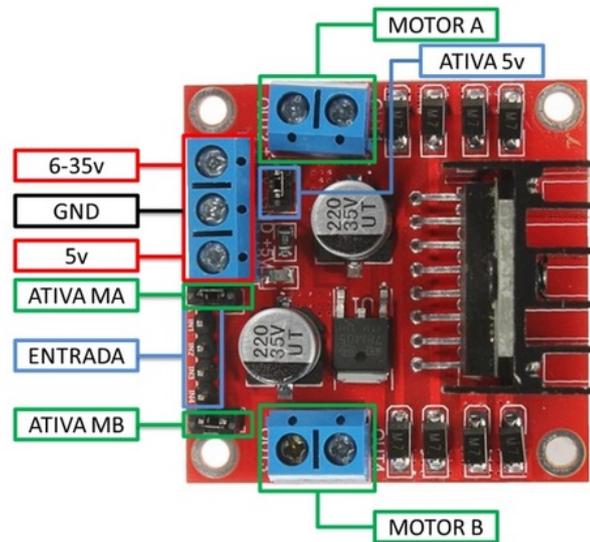
Tabela 5 – Especificações Circuito Ponte H L298N

Item	Especificação
Tensão de operação	4-35 V
Chip	ST L298N
Corrente de operação	2A por canal
Tensão lógica	5 V
Corrente Lógica	0-36 mA
Limites de temperatura	-20 a +135°C
Potência máxima	25 W

Fonte: Adaptado de www.st.com

A Figura 21 ilustra características de funcionamento do CI L298N, fazendo considerações sobre os itens destacados.

Figura 21 – Vista superior do CI L298N com os especificações de funcionamento.



Fonte: www.robocore.net/modules.php?LojaVirtual&prod=200

- Motor A e B: conectores para ligação de dois motores DC ou um motor de passo.
- Ativa MA e MB: pinos responsáveis pelo controle PWM dos motores A e B.
- Ativa 5 V e 5 V: ativa 5 V é o pino responsável pela decisão se a tensão será utilizada a partir do Arduino ou de uma fonte externa, e o conector 5 V é onde é inserida o pólo positivo quando conectado no Arduino.
- 6-35 V e GND: onde é conectada a fonte externa quando o CI estiver controlando um motor de 6-35 V, e o conector GND é ligado em uma das portas correspondentes no Arduino funcionando como aterramento.
- Entrada: barramento composto por IN1, IN2, IN3 e IN4, sendo responsáveis pela rotação do motor A (IN1 e IN2) e motor B (IN3 e IN4).

A Tabela 6 contém a ordem de ativação do motor A, mediante utilização dos pinos IN1 e IN2, o mesmo esquema pode ser utilizado para ativar o motor B porém utilizando os pinos IN3 e IN4.

Tabela 6 – Ordem de ativação do motor A.

Motor	IN1	IN2
Sentido Horário	5 V	GND
Sentido Anti-horário	GND	5 V
Ponto morto	GND	GND
Freio	5 V	5 V

Fonte: Adaptado de www.st.com

4.2.4 Ventoinhas

Os atuadores utilizados no sistema proposto foram duas ventoinhas modelo E29477 e configuraram-se como motores de corrente contínua, necessitando de tensão 12 V e aproximadamente 280 mA de corrente.

Onde a primeira foi fixada em uma das laterais da caixa acrílica tendo a função de ventilador e o outro foi fixado na tampa da caixa, tendo a função de exaustor de calor, fazendo com que o fluxo de calor tivesse a característica de levar o ar mais denso de baixo para cima, como o descrito por (CHIARELLO, 2006) sobre o efeito chaminé.

Seu acionamento foi feito mediante ligação nos conectores motor A e B do CI L298N, e o modelo pode ser visualizado na Figura 22 ilustrando o conjunto ventoinha e dissipador de calor, no entanto o mesmo não foi utilizado no projeto, somente a ventoinha.

Figura 22 – Ventoinha e dissipador modelo E29477.



Fonte: tecnoblog.net/intel-core-m-broadwell-y-lancamento

O modelo utilizado dispõe de quatro pinos de ligação, sendo as características dos mesmos abordadas na Tabela 7 :

Tabela 7 – Características da ventoinha modelo E29477

Pino	Função	Cor
1	GND	Preto
2	12 V	Amarelo
3	Tacômetro	Verde
4	Controle PWM	Azul

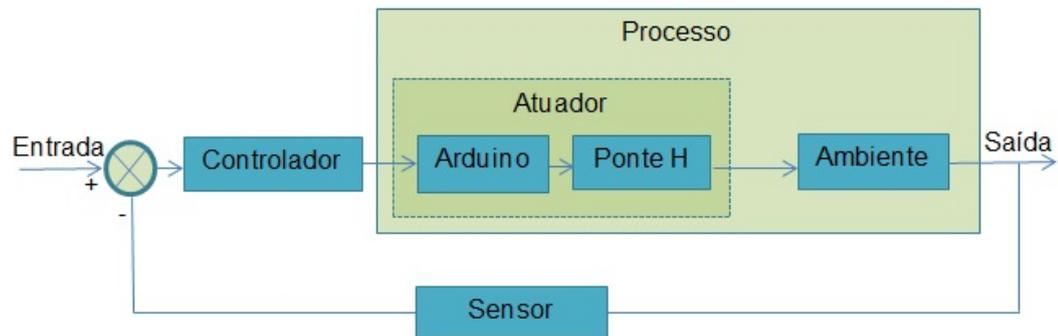
Fonte: Adaptado de www.intel.com.br

Uma das características interessantes desse modelo é a inserção do tacômetro ou sensor de giro, possibilitando assim a melhor verificação da relação tensão-velocidade no item identificação do sistema, bem como o nível de corrente superior a 230 mA, como encontrados nas ventoinhas testadas anteriormente.

4.3 Diagrama de blocos do sistema

Um diagrama de blocos do sistema montado pode ser visto na Figura 23 e representa os componentes necessários do projeto:

Figura 23 – Diagrama de blocos da planta didática de controle de temperatura.



Fonte: A autora

Inicialmente foi feita a aferição de parâmetros da planta real afim de representá-la em ambiente de simulação sem a adição de técnicas de controle.

Os valores dos parâmetros foram adquiridos via folha de especificações do fabricante nos casos de potência da lâmpada, velocidade máxima do ventilador e deslocamento de ar no ventilador, outros parâmetros são relacionados às características do ar, como calor específico à pressão constante e coeficiente de transferência de calor, valores esses fundamentados mediante pesquisa bibliográfica, sendo listados na Tabela 8.

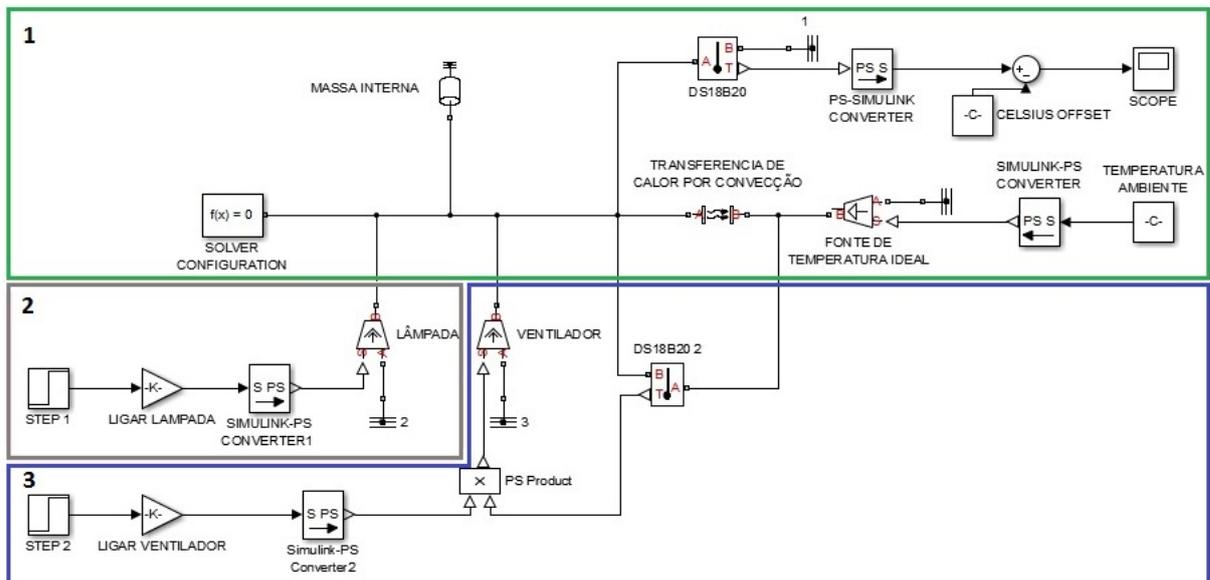
Tabela 8 – Parâmetros da simulação em Simulink®

Item	Descrição	Valor
Pot_Lamp	Potência da lâmpada (W)	60
m	Massa interna (kg)	0.05
Cp	Calor específico à pressão constante (cal/g°C)	1.0054e+03
k_adiabatico	Coeficiente de transferência de calor(W/m²K)	0.024
Desl_Ar_Vent	Deslocamento de ar no ventilador(kg/m².s)	1.8e-4
Vel_Vent	Velocidade máxima do ventilador(m³/s)	2659
Area_superficie	Área da superfície (m²)	1.5e-2
Celsius_offset	Inicial de temperatura (K)	273

Fonte: A autora

Na Figura 24 é ilustrado o modelo da planta em caráter de simulação, onde os parâmetros descritos na Tabela 8 são inseridos nos blocos respectivos da simulação no software Simulink®.

Figura 24 – Modelo da planta no software Simulink®.

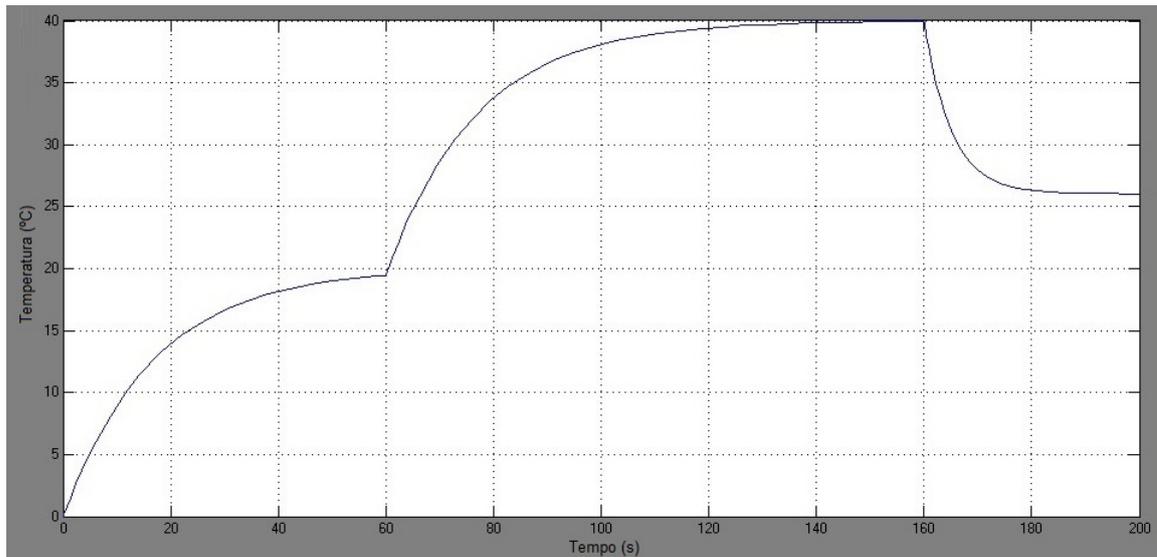


Fonte: A autora

Compilando-se a simulação obteve-se a resposta representada no gráfico 25, pode-se observar que a mesma apresenta três estados:

- Etapa 1 (tempo entre 0 e 6 segundos): corresponde à planta somente com a temperaturas interna e ambiente atuando no sistema, representadas na simulação pelo blocos *massa interna* e *temperatura ambiente* onde pode ser observado a elevação da temperatura naturalmente.
- Etapa 2 (tempo entre 6 e 160 segundos): corresponde à atuação da lâmpada incandescente no sistema elevando exponencialmente a temperatura do sistema, sendo a mesma é ativada mediante o bloco *ligar lâmpada*, sendo previamente inserido no mesmo um atraso de 6 s.
- Etapa 3 (tempo entre 160 e 200 segundos): corresponde ao tempo em que o bloco do atuador (ventilador) passou a operar no sistema, sendo inserido previamente no bloco *ligar ventilador* um atraso de 160 segundos.

Figura 25 – Gráfico da resposta do sistema sem a utilização de técnicas de controle.



Fonte: A autora

No entanto, as simulações foram utilizadas como suporte para realizarmos o estudo da planta afim de conhecermos as características da mesma.

Posteriormente ao estudo das características da planta via simulação, foi iniciado o processo construtivo do modelo físico, a ser descrito na seção 4.4.

4.4 Características construtivas da bancada

O controle de temperatura pode ser encontrado em várias aplicações na indústria, tais como fornos industriais, centrais de ar condicionado, caldeiras, chocadeiras, estufas e uma infinidade de aplicações (MARTINS; RANGEL; SILVA, 2010).

Sendo sistema com características interessantes a serem estudadas no que tange ao controle de temperatura, mostrou-se o sistema ideal para ser utilizado como ferramenta para testes de técnicas de controle e estudo da identificação bem como das características do sistema.

A construção da bancada de controle de temperatura deu-se de forma a representar um ambiente como os supracitados, no entanto em escala piloto, onde o escopo do projeto é o controle da temperatura com base nos níveis desejados.

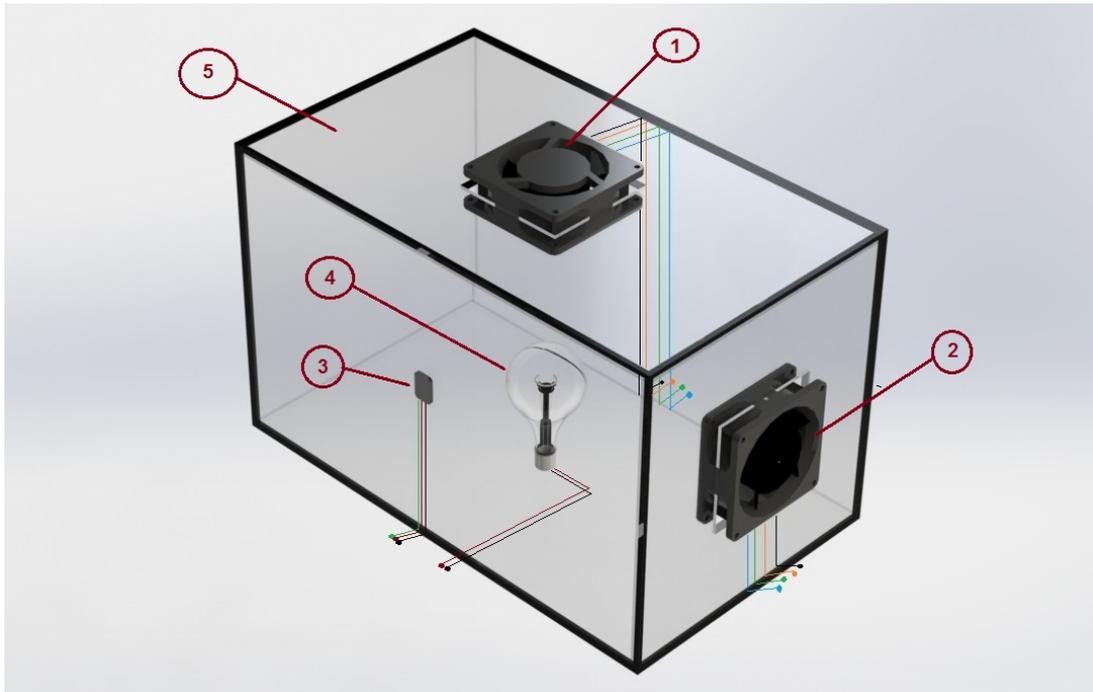
Os atuadores do sistema são duas ventoinhas, onde mediante o sinal de ganho do controlador enviado para a ponte h funciona como regulador de tensão para as mesmas, de forma a fazer o controle da temperatura.

As características do modelo físico são explicitadas na subseção 4.4.1 :

4.4.1 Construção da bancada

O projeto da bancada foi inicialmente realizado em caráter de simulação, para então posteriormente vir a ser montado o modelo físico real, o modelo da bancada foi feito no software SolidWorks®, e dividido em duas partes de igual importância, sendo a primeira delas ilustrada na Figura 26

Figura 26 – Esboço da parte A da planta didática no SolidWorks®



Fonte: A autora

A parte A é constituída de cinco elementos:

- Itens 1 e 2: ventoinhas modelo E29477
- Item 3: Sensor de temperatura DS18B20
- Item 4: Lâmpada incandescente de 60 *W* de potência
- Item 5: Caixa acrílica medindo 35x21x21 mm e constituída por 6 *mm* de espessura

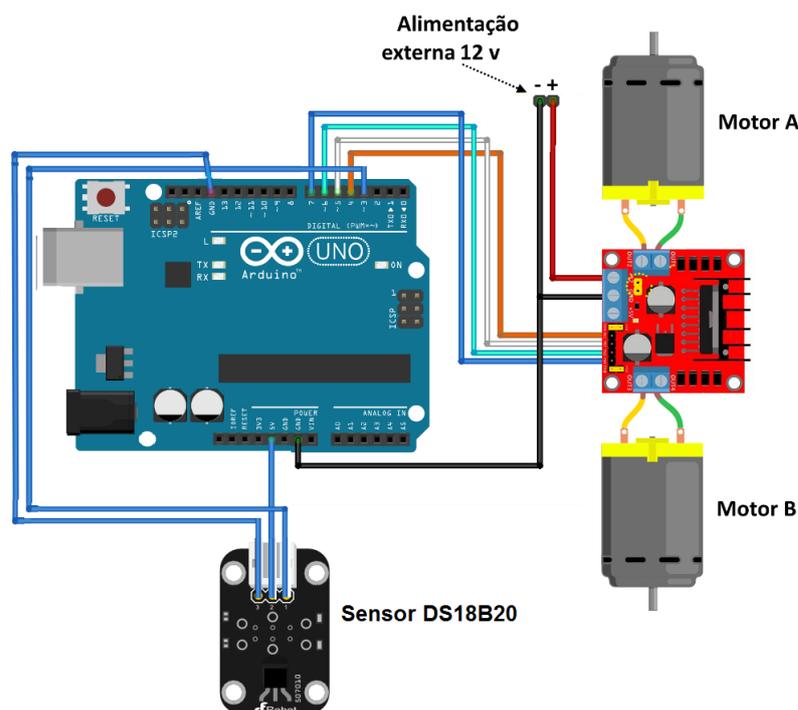
A parte B do projeto do modelo físico está ilustrada na Figura 27 e é formada pelo ilustrativo da conexão elétrica entre:

- O sensor DS18B20 e a plataforma Arduino, de forma a conectar os pinos de saída PWM na entrada 3 do Arduino, e os pinos de 5 V e GND nas entradas correspondentes da placa Arduino.
- O CI L298N e a plataforma Arduino, onde as entradas conectadas nos pinos 7,6,5 e 4, sendo utilizada uma fonte de alimentação externa 12 V pois a plataforma Arduino

oferece somente 5 V de tensão e se porventura for requisitado tensão superior à máxima poderá sofrer dano por sobrecarga.

- O CI L298N e os motores A e B, representando as ventoinhas que serão implementadas no presente projeto.

Figura 27 – Esboço segunda parte da planta didática no software Fritzing®.



Fonte: A autora

4.4.2 Sequência de montagem

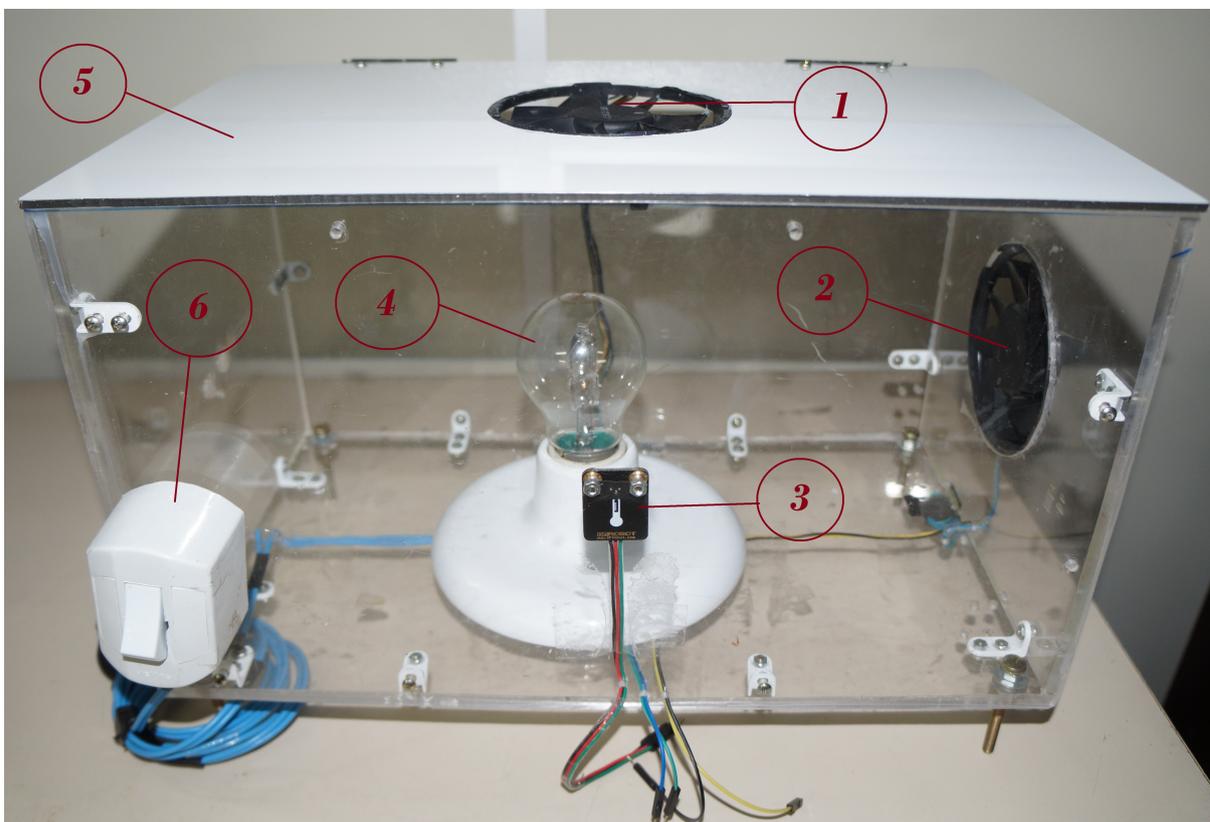
Posteriormente ao projeto e estudo das possibilidades de montagem do modelo físico foi adotada a seguinte sequência de montagem:

- Para a parte A da planta, as descrições dos itens são válidas mediante visualização da Figura 28:
1. Montou-se a caixa de acrílico medindo 35x21x21 cm (item 5)
 2. Fixou-se as ventoinhas na lateral 1 e na tampa da caixa acrílica (itens 1 e 2)
 3. Fixou-se o sensor de temperatura na lateral 3 da caixa acrílica (item 3)
 4. Fixou-se a lâmpada incandescente no fundo da caixa (item 4)
 5. Foi fixada na parte exterior da caixa um interruptor (item 6), que não foi mencionado no esboço da planta, no entanto fez-se necessário como item de segurança do sistema.

6. Foram feitas a ligação elétrica da lâmpada, bem como das ventoinhas

Na Figura 28 pode ser visualizada a estrutura física construída em laboratório:

Figura 28 – Estrutura física da parte A da planta didática.

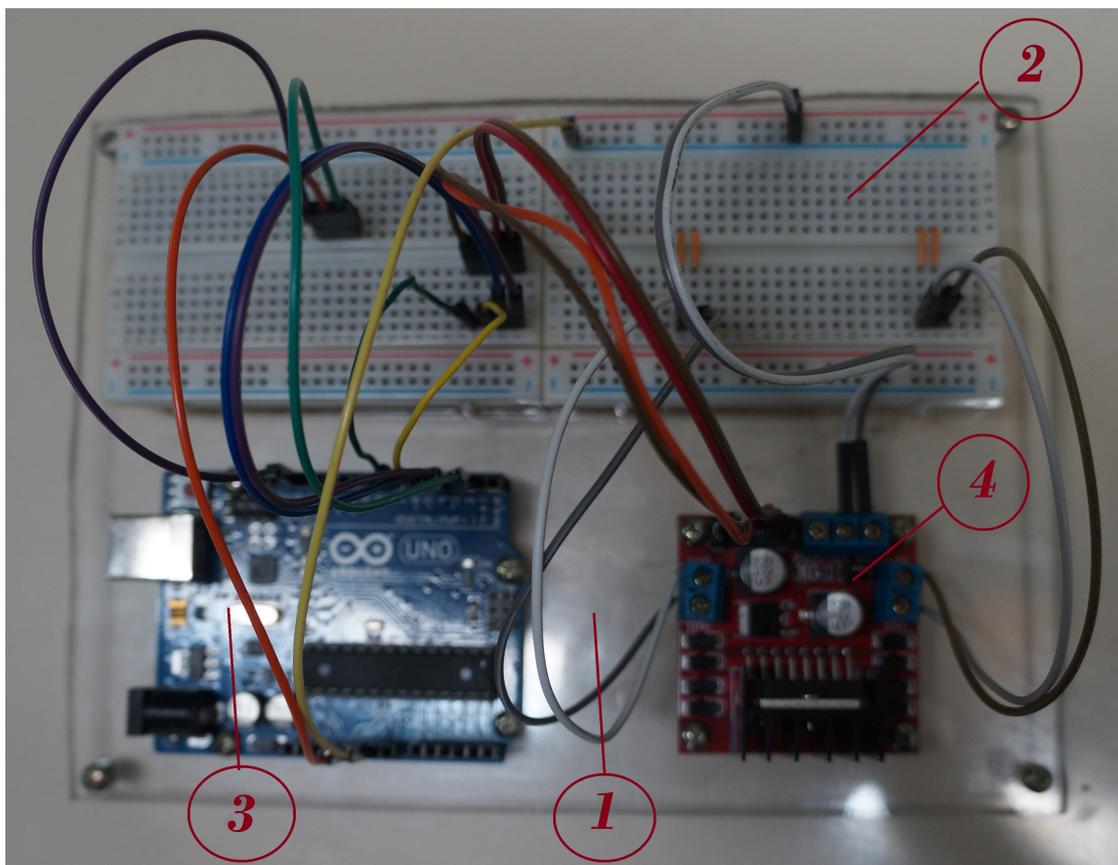


Fonte: A autora

- Para a parte B da planta:
 1. Foi realizada a medição e confecção da base em acrílico medindo 20x10 cm
 2. Fixou-se um *protoboard* ou placa de ensaio
 3. Fixou-se a plataforma Arduino UNO
 4. Fixou-se o CI L298N
 5. Foram feitas as conexões como ilustra a Figura 27.

Na Figura 29 pode ser visualizada a estrutura física construída em laboratório:

Figura 29 – Estrutura física da parte B da planta didática.



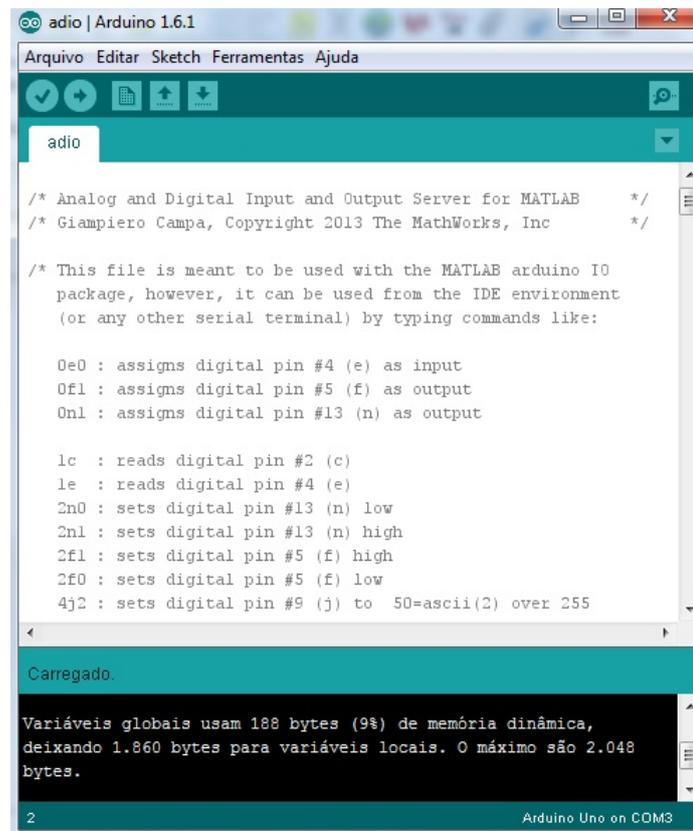
Fonte: A autora

4.5 Comunicação Arduino-MATLAB®

A comunicação entre a plataforma Arduino e o *software* MATLAB® foi essencial pois as técnicas de controle a serem implementadas na planta didática foram executadas a partir da IDE do software, bem como a aquisição de dados. Comunicação essa feita observando os tópicos abaixo e considerando-se a instalação prévia do software MATLAB®:

- Acessar o site da plataforma Arduino e fazer o download e instalação da IDE.
- Acessar ao site do software MATLAB® e fazer o download do arquivo *Package Arduino IO*.
- Copiar o arquivo gerado para a pasta *libraries* que se encontra na raiz da IDE do Arduino.
- Na interface da IDE abrir o arquivo “*adio.pde*” que está localizado nos exemplos da plataforma.
- Verificar e carregar o arquivo na placa Arduino como representado na Figura 30.
- Na janela de comando do MATLAB® executar o arquivo *Install_arduino.m*.

Figura 30 – Algoritmo de teste carregado na placa Arduino.



```
adiao | Arduino 1.6.1
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

adio

/* Analog and Digital Input and Output Server for MATLAB */
/* Giampiero Campa, Copyright 2013 The MathWorks, Inc */

/* This file is meant to be used with the MATLAB arduino IO
package, however, it can be used from the IDE environment
(or any other serial terminal) by typing commands like:

0e0 : assigns digital pin #4 (e) as input
0f1 : assigns digital pin #5 (f) as output
0n1 : assigns digital pin #13 (n) as output

1c : reads digital pin #2 (c)
1e : reads digital pin #4 (e)
2n0 : sets digital pin #13 (n) low
2n1 : sets digital pin #13 (n) high
2f1 : sets digital pin #5 (f) high
2f0 : sets digital pin #5 (f) low
4j2 : sets digital pin #9 (j) to 50=ascii(2) over 255

Carregado.

Variáveis globais usam 188 bytes (9%) de memória dinâmica,
deixando 1.860 bytes para variáveis locais. O máximo são 2.048
bytes.

2 Arduino Uno on COM3
```

Fonte: A autora

Logo após executar o arquivo *Install_arduino.m* na janela de comando do MATLAB®, a placa Arduino obteve êxito na comunicação com o MATLAB®. Como pode ser visto na Figura 31:

Figura 31 – Janela de comando do MATLAB®.



```
Command Window

>> arduino
Note: a DEMO connection will be created
Use a the com port, e.g. 'COM5' as input argument to connect to the real board
Demo mode connection .....
Motor Shield v2 (plus adices.pde functions) sketch detected !
Arduino successfully connected !
ans =

arduino object connected to DEMO port
Motor Shield sketch V2 (plus adices.pde functions) running on the board

Servo 2 is DETACHED
Servo 3 is DETACHED
Servo 4 is DETACHED
Servo 5 is DETACHED
Servo 6 is DETACHED
Servo 7 is DETACHED
Servo 8 is DETACHED
Servo 9 is DETACHED
Servo 10 is DETACHED
Servo 11 is DETACHED
Servo 12 is DETACHED
```

Fonte: A autora

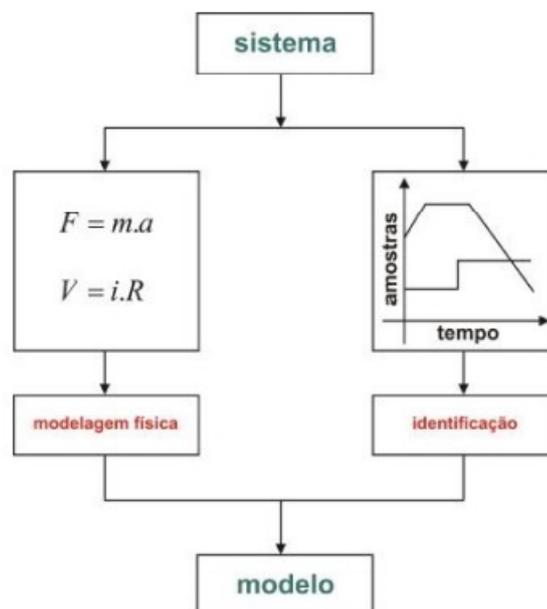
4.6 Método de identificação da planta

Segundo Aguirre (2007), “o modelo matemático dinâmico de um sistema é um conjunto de equações que descrevem o seu comportamento dinâmico e estático”. A obtenção de um modelo matemático deve estabelecer um compromisso entre a simplicidade do modelo e a precisão dos resultados da análise (OGATA, 2013).

A modelagem de sistemas é usualmente classificada em (COELHO; COELHO, 2004):

- **Análise físico-matemática:** requer conhecimentos profundos das leis físicas que regem o sistema, para esta abordagem o modelo tem relação direta com as grandezas físicas relacionadas. No entanto para modelos de alta complexidade como em sistemas reais a escolha da modelagem pela física do processo torna-se inviável sabendo-se que o conhecimento a respeito de todas as variáveis do processo é impraticável, recorrendo então à identificação de sistemas.
- **Análise experimental:** A identificação de sistemas parte de dados de entrada e saída medidos no sistema que se deseja modelar. Tais dados são denominados dados de identificação e são obtidos através da medição simultânea da resposta do sistema $y(t)$ a uma excitação na entrada $u(t)$ pré-determinada.

Figura 32 – Princípios para construção de um modelo matemático.



Fonte: (COELHO; COELHO, 2004)

Mediante a utilização dos procedimentos ilustrados na Figura 32 é proporcionado a obtenção de modelos representativos da dinâmica do sistema, processo ou planta. No entanto para controle de processos, a exatidão do modelo matemático não é requerida e sim é escolhido um modelo adequado para cada aplicação (COELHO; COELHO, 2004).

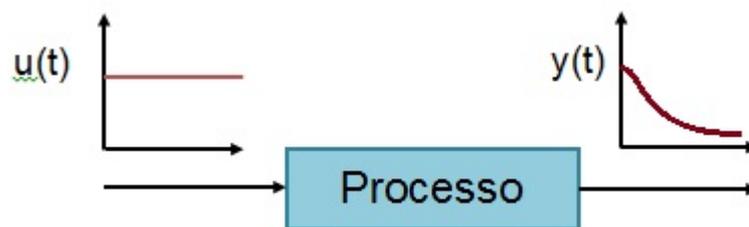
4.6.1 Identificação do processo mediante teste de resposta ao degrau

O referido método consiste na aplicação de uma entrada do tipo degrau como sinal de referência $u(t)$, visando o estudo do comportamento da planta mediante a curva de reação do processo, e por conseguinte a aplicação de técnicas gráficas, numéricas ou computacionais para modelar o sistema estudado.

O chaveamento mediante o acréscimo ou decréscimo de uma entrada na magnitude do degrau pode ser admitida pela variação da tensão ou corrente.

Um esquemático da utilização deste método utilizado neste trabalho pode ser visualizado na Figura 33

Figura 33 – Esquemático da realização de testes com entradas degrau.



Fonte: A autora

Para a planta didática construída foi considerado como variável manipulada a tensão e a variável controlada a temperatura, ou seja:

$$u(t) = V(t) \quad (4.1)$$

$$y(t) = T(t) \quad (4.2)$$

Visto que a tensão é dada em Volts e a temperatura em Celsius.

O algoritmo de aquisição de dados foi implementado na IDE do software MATLAB® e pode ser encontrado no Apêndice A.

Sendo realizados quatro testes para os valores 8 V, 10 V, 12 V, 14 V de tensão e todos com um tempo de 1000 segundos ou 16,6 minutos. As respostas obtidas podem ser vistas nas Figuras 34, 35, 36 e 37 e apresentam características de um modelo de primeira ordem com atraso de tempo (FOPTD), o qual é representado pela Equação 4.3:

$$Gs = Kp \frac{e^{-Ls}}{1 + Ts} \quad (4.3)$$

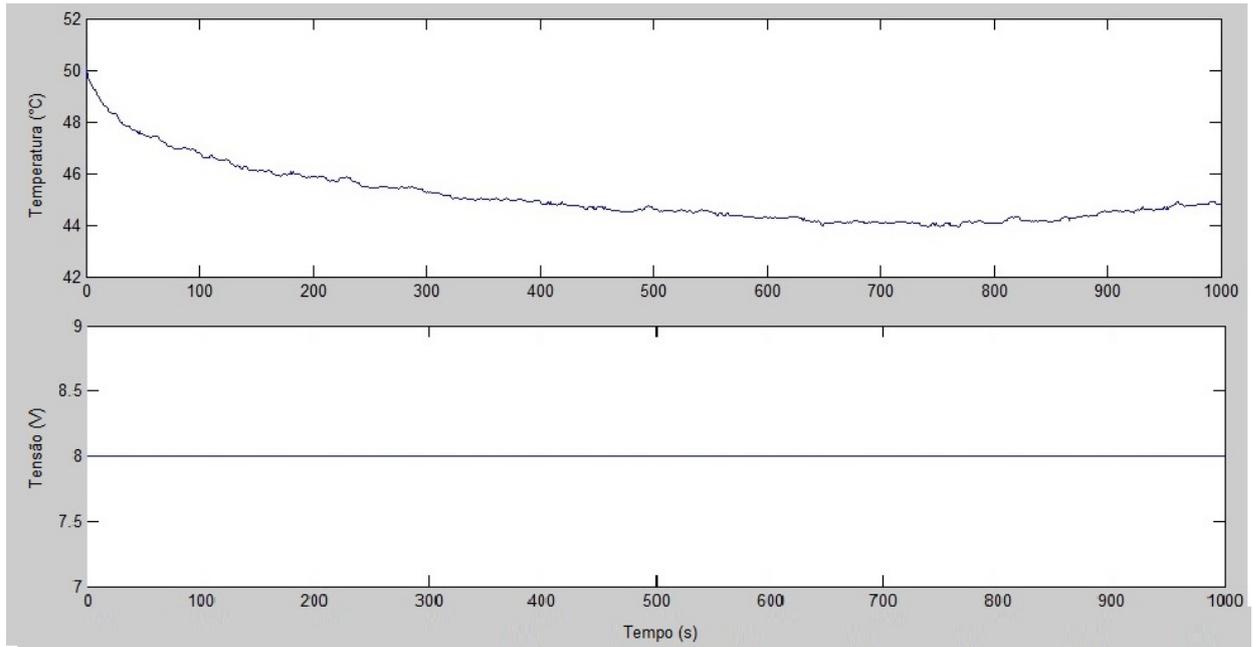
Sendo o ganho Kp diretamente calculado pela Equação 4.4 de uma forma simplória comparando saída Δy e Δu (ZHI; JINGLING, 1997):

$$Kp = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{\Delta T}{\Delta V} \quad (4.4)$$

A constante L : representa o tempo morto, que é conceituado como o tempo que o processo leva para começar a responder a uma variação na variável manipulada, assim no presente projeto corresponde ao tempo que a saída demora a reagir após a entrada (tensão) atuar, verificando-se nos gráficos obteve-se um valor de L aproximado de 5 segundo, portanto $L=5$.

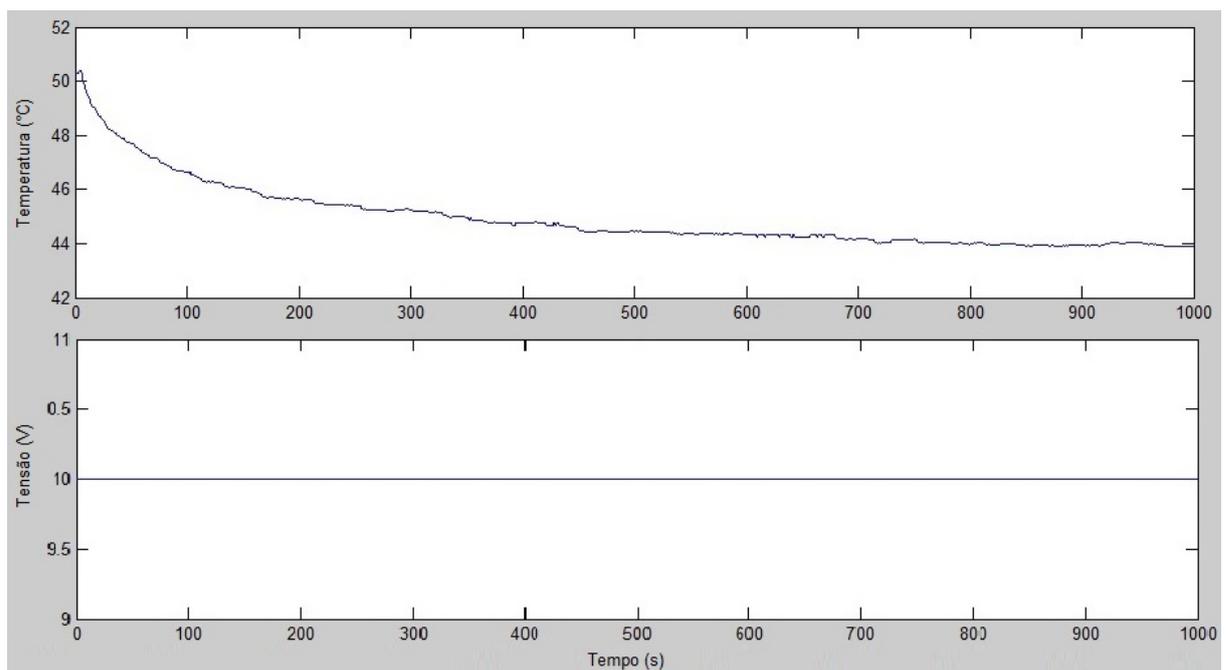
A constante τ : constante de tempo de processo a ser calculado utilizando a Tabela 10.

Figura 34 – Resposta do sistema a uma entrada degrau de 8 volts.



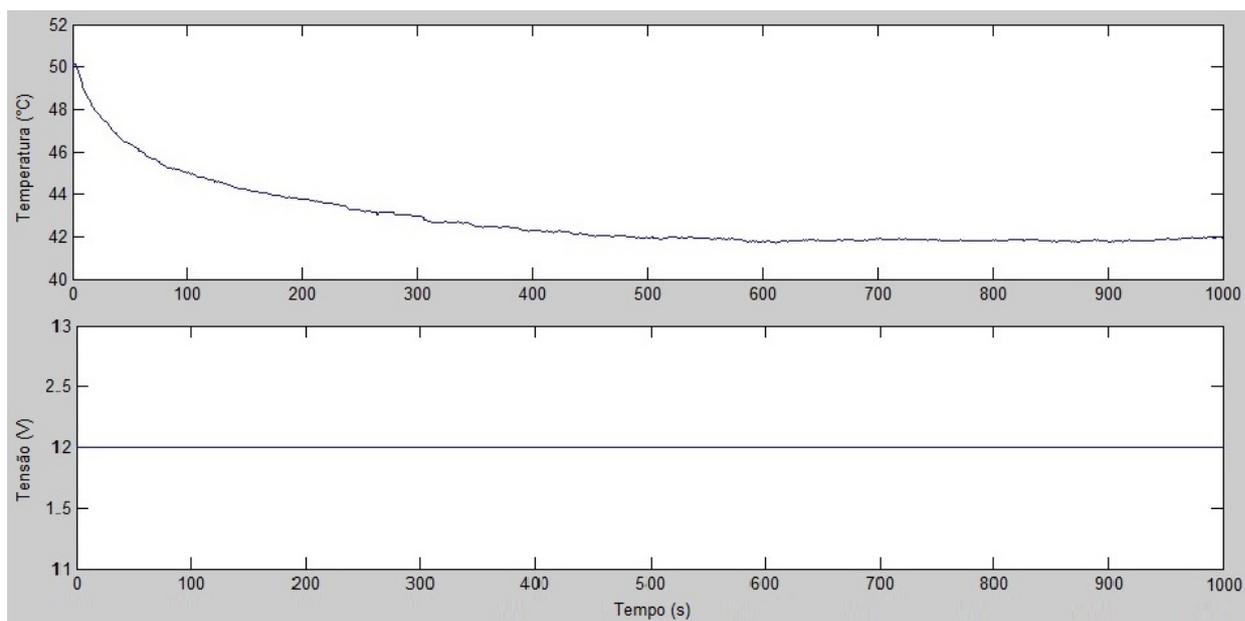
Fonte: A autora

Figura 35 – Resposta do sistema a uma entrada degrau de 10 volts.



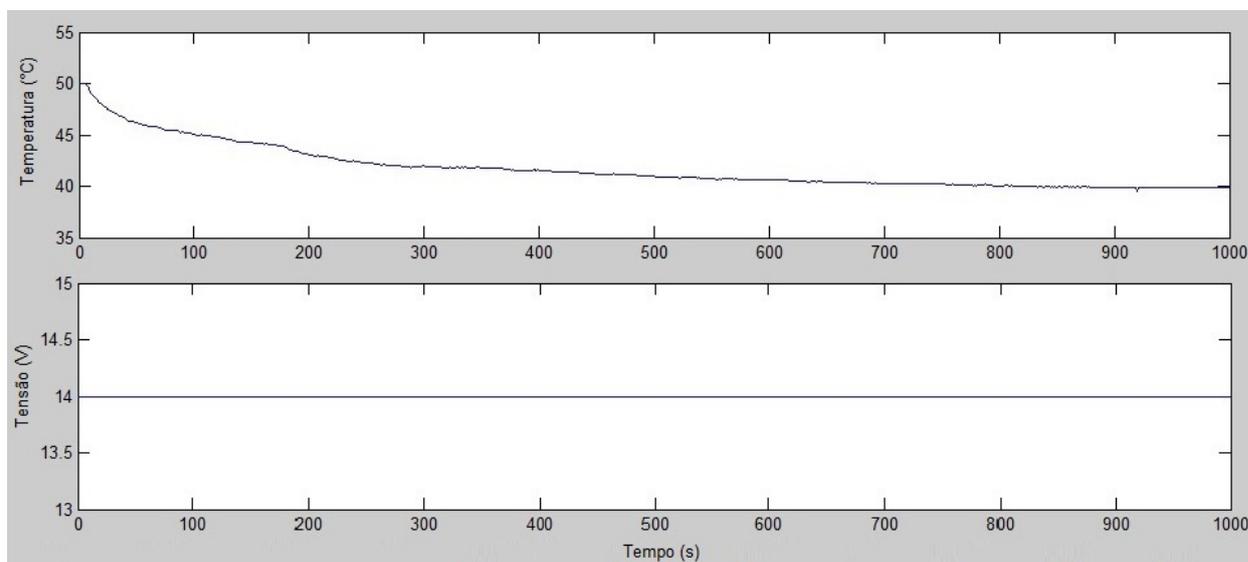
Fonte: A autora

Figura 36 – Resposta do sistema a uma entrada degrau de 12 volts.



Fonte: A autora

Figura 37 – Resposta do sistema a uma entrada degrau de 14 volts.



Fonte: A autora

Afim de obter-se o modelo matemático do processo, foi feito inicialmente os cálculos dos valores de K_p utilizando a Equação 4.4, para valores de tensão entre 8 e 14 Volts e variação de temperatura calculado mediante a relação entre o maior e menor valor medidos para a taxa de tempo definida.

Tabela 9 – Valores dos ganhos K_p para as quatro entradas de tensão

Variação de tensão (ΔV)	Variação de temperatura (ΔT)	Ganho proporcional (K_p)
8	-6.19	-0.7737
10	-6.5	-0.6500
12	-8.44	-0.7033
14	-10.6	-0.7571

Fonte: A autora

O valor de K_p a ser utilizado será o maior valor, ou seja, $K_p=0.77$ sendo o valor para $\Delta V=8$, sendo este valor da tensão fornecido ao cooler afim de evitarmos possíveis erros relacionados com escolhas equivocadas do parâmetro K_p .

Para realizar os cálculos do valor da constante de tempo τ foi necessária a utilização do método de Aström Hägglund, que propõe a sintonia mediante a um valor de referência. Para τ correspondente ao tempo no qual a temperatura atinge 63,2% do seu valor final, sendo representado pela Equação 4.5:

$$T(\tau) = 0.632(T(\infty) - T(L)) + T(L) \quad (4.5)$$

onde:

$T(\infty)$ =temperatura final

$T(L)$ =temperatura após o tempo morto

Tabela 10 – Valores da constante de tempo τ para os valores de entrada degrau.

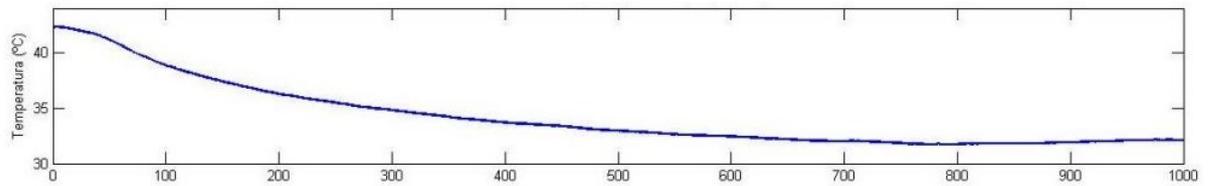
V(t)	63,2% x T(∞)	τ
8 V	28.31	143.85
10 V	27.73	152.42
12 V	26.50	167.13
14 V	25.19	254.52

Fonte: A autora

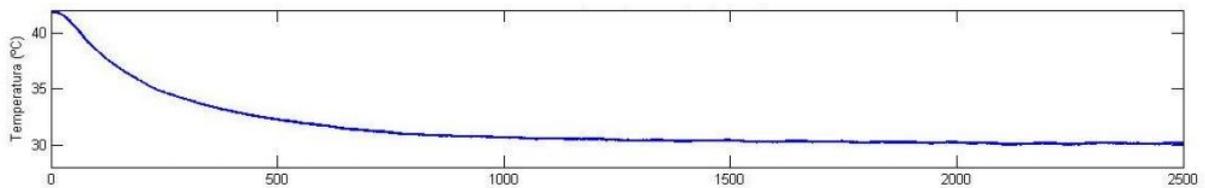
Mediante o cálculo da média aritmética entre os valores de τ , obteve-se o valor $\tau=179.48$. Como já obtivemos os valores das constantes, o modelo matemático encontra-se na Equação 4.6, a qual representa a dinâmica da bancada:

$$G(s) = \frac{T(s)}{U(s)} = -0.77 \frac{e^{-5s}}{1 + 179.48s} \quad (4.6)$$

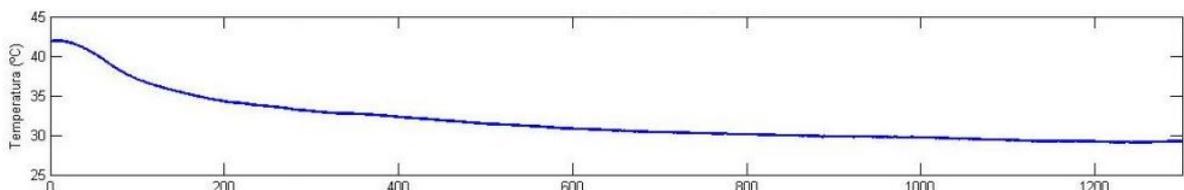
Para verificarmos o comportamento da Equação 4.6 mediante entradas degrau no intervalo de 8 a 14 V, afim de fazermos a comparação do resultado experimental com o resultado de simulação da função $G(s)$:

Figura 38 – Resposta da função $G(s)$ mediante entrada de tensão 8 V.

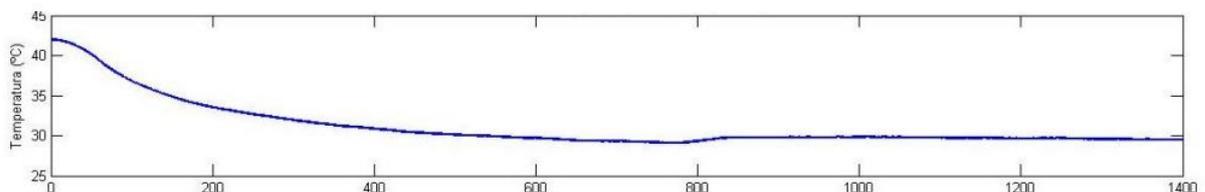
Fonte: A autora

Figura 39 – Resposta da função $G(s)$ mediante entrada de tensão 10 V.

Fonte: A autora

Figura 40 – Resposta da função $G(s)$ mediante entrada de tensão 12 V.

Fonte: A autora

Figura 41 – Resposta da função $G(s)$ mediante entrada de tensão 14 V.

Fonte: A autora

São ilustradas nas Figuras as respostas para os valores de tensão 8 V, 10 V, 12 V e 14 V. Sendo que a resposta da função $G(s)$ mostrou-se próxima da resposta obtida experimentalmente, apresentando um erro correspondente a 0.5 °C no estado estacionário. Ressaltando que a função de transferência $G(s)$ obteve uma boa aproximação em todos os casos.

4.7 Controle da temperatura da planta

Mediante o conhecimento da função de transferência do sistema (Equação 4.6), foram realizados os procedimentos apresentados na seção 3.4 para fins de cálculo dos parâmetros do controlador PID, sendo escolhidos os seguintes parâmetros para o projeto:

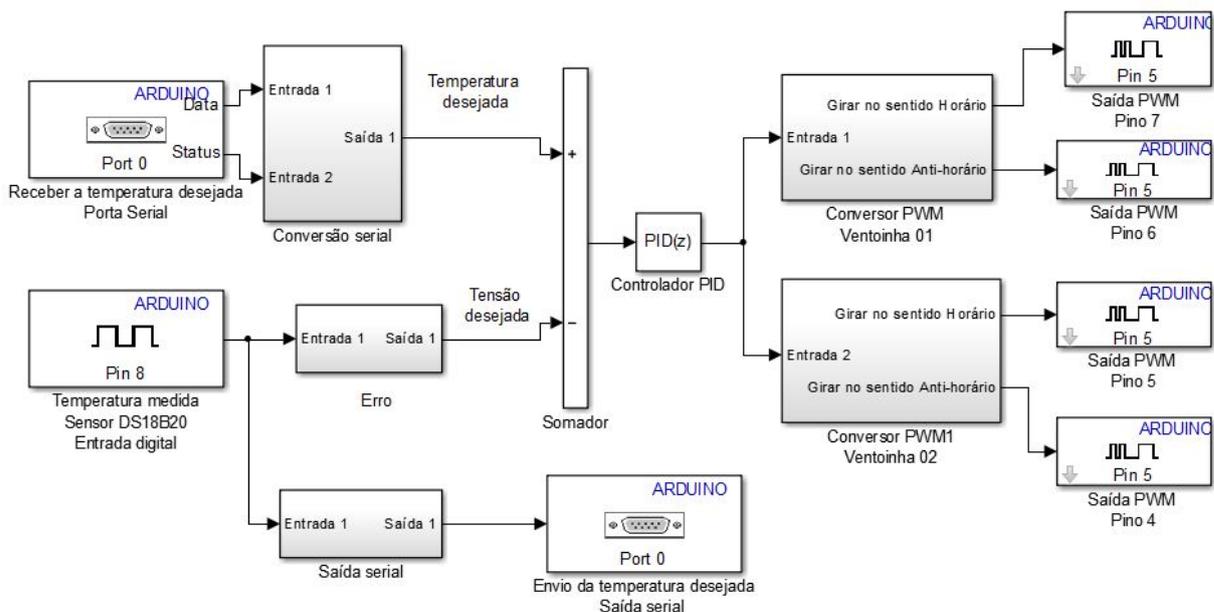
- Margem de fase requerida: $\phi_m \geq 60^\circ$
- Margem de ganho requerida: $\gamma_m \geq 4dB$ para o primeiro teste e $\gamma_m \geq 6dB$ para o segundo teste.
- Parâmetro do filtro de alta frequência: $N = 10$

Realizando os procedimentos de sintonia para o teste 01, verificou-se o valor da margem de ganho inferior a 6 dB para K_i máximo, sendo para essa margem de ganho o valor de $a = 1.04$ e mediante esse valor obtêm-se os parâmetros do controlador PID:

- Ganho proporcional (K_p): 17.5621
- Ganho integral (K_i): 1.4953
- Ganho derivativo (K_d): 74.0545

Com a aferição dos valores de K_p , K_i , K_d foi possível implementar o controlador PID no processo mediante o diagrama de blocos que pode ser visualizado na Figura 42

Figura 42 – Implementação do controle PID no software Simulink®.

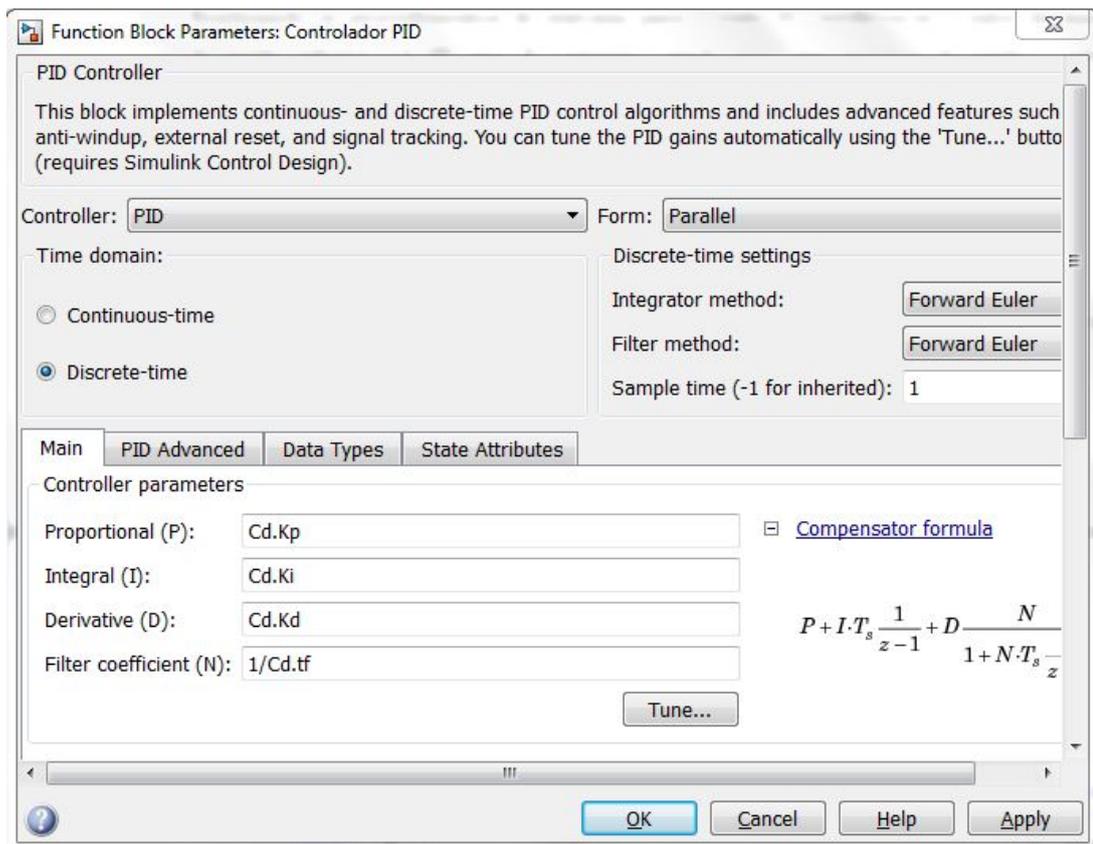


Fonte: A autora

A Figura 42 representa o diagrama de blocos da implementação do controlador PID no processo, tendo seu funcionamento dado da seguinte maneira:

- Inicialmente é feita a aferição em paralelo dos dados de temperatura medida pelo sensor DS18B20 e temperatura desejada pelo sistema mediante o envio dos dados da porta serial .
- O erro da variável controlada passa pelo bloco PID, gerando o valor da variável manipulada a ser enviado para os atuadores.
- Com as variáveis requeridas inseridas no bloco do controlador PID é necessário também a inserção dos valores de Kp, Ki e Kd, conforme os dados encontrados mediante a sintonia do controlador.
- O controlador envia os dados aos atuadores (Ventoinha 01 e 02), fazendo a conversão PWM e dependendo o sentido de rotação (ventilador ou exaustor) é enviado o sinal conforme o pino de saída PWM correspondente.

Figura 43 – Inserção dos dados de Kp, Ki e Kd no bloco do controlador PID.

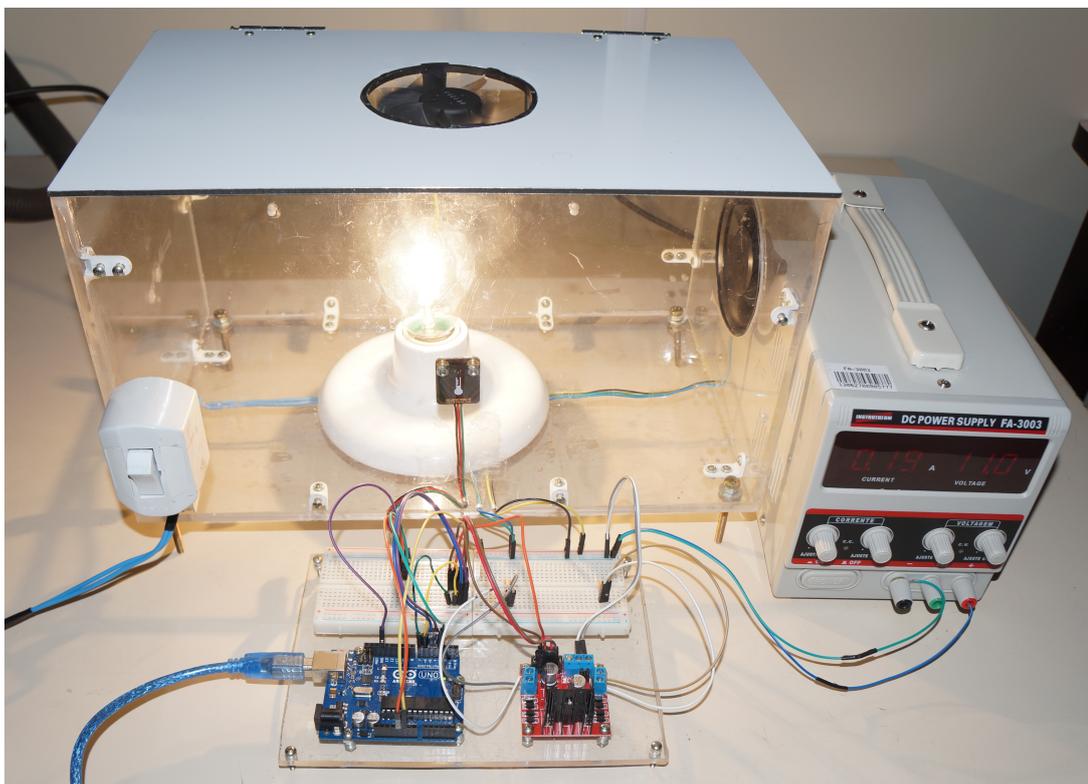


Fonte: A autora

Mostrou-se necessário a inserção dos valores dos ganhos no bloco do controlador, no entanto os valores dos ganhos foram inseridos previamente na janela de comando do MATLAB®, sendo fundamental a inserção do parâmetro Cd o qual também foi inserido anteriormente na janela de comando, e que tem como função a transformação de uma variável que encontra-se no domínio do tempo para o domínio da frequência.

Com a auferição dos parâmetros do controlador, bem como os valores necessários para o método de sintonia, foi implementada a técnica de controle PID no modelo físico planta didática no Laboratório de Robótica Fixa da Universidade do Estado do Amazonas, como pode ser visualizado na Figura 44.

Figura 44 – Sistema em funcionamento com o controlador PID implementado.



Fonte: A autora

5 RESULTADOS OBTIDOS

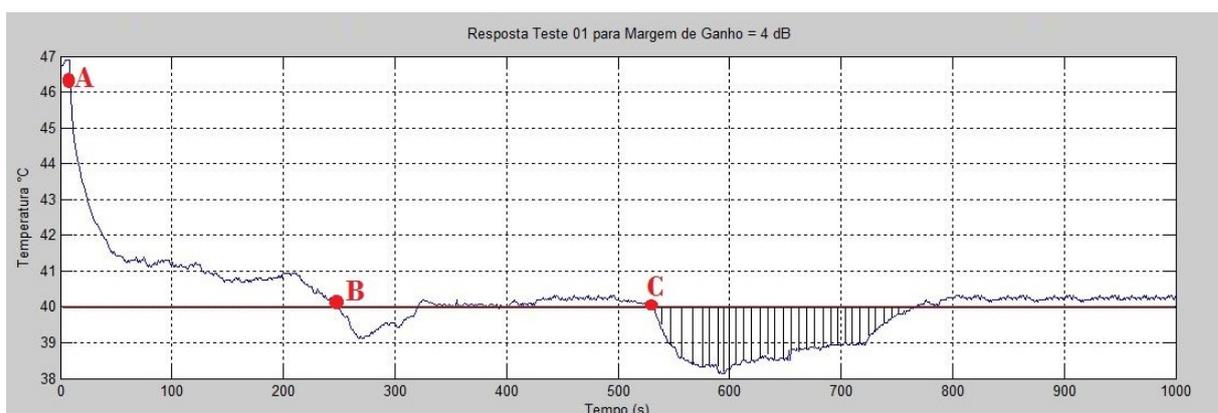
Objetivando a implementação do controlador PID foram realizados dois testes, denominados teste 1 e 2, sendo utilizados os valores de $\gamma_m = 4dB$ e $\gamma_m = 6dB$, sendo valores sugeridos na Equação 1 da subseção 3.3.1, bem como os valores de temperatura a serem mantidos pelo controlador, sendo os mesmos 40 °C e 41 °C.

5.1 Resultados do teste 1

O teste 01 pode ser descrito em três etapas, que podem ser visualizadas nas Figura 45 e Figura 46:

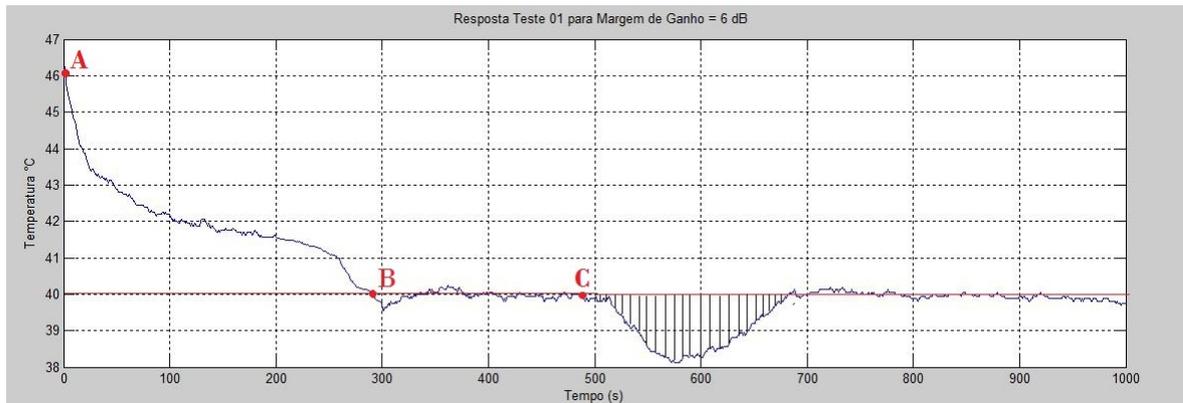
- Etapa 1: referente ao ponto A nas Figuras 45 e 46, onde o mesmo configura-se como o ponto de estabilidade do sistema sem adicional do controle,.
- Etapa 2: posteriormente à implementação do controle PID a temperatura inicia o processo de estabilidade no ponto B, aproximadamente em 250 segundos permanecendo próximo ao valor de referência após 300 segundos.
- Etapa 3: momento em que a tampa da caixa é aberta, considerando-se como um distúrbio no sistema, e sendo mantida desta forma até o t=1000 segundos, ou seja, a finalização do teste.

Figura 45 – Gráfico para valor de $\gamma_m = 4dB$ e *setpoint* 40 °C.



Fonte: A autora

Observando as Figuras 45 e 46, é possível visualizar que os resultados do teste 01 para $\gamma_m = 4dB$ e $\gamma_m = 6dB$ têm comportamento semelhante, iniciando-se no ponto A ou ponto correspondente a t=0 s.

Figura 46 – Gráfico para valor de $\gamma_m = 6dB$ e *setpoint* 40 °C.

Fonte: A autora

Sendo então feita uma comparação entre as respostas do sistema sem controle (Figura 25) e as respostas com o adicional de controle, fez-se a constatação de uma redução de 20% no tempo de acomodação, situação essa que não esteve presente nos sistemas não controlados, a um pequeno custo no valor da ultrapassagem percentual $\%UP \approx 5$, valor esse equivalente a 0,5 °C e um tempo de acomodação $t_s \approx 320s$, valor esse simbolizado pelo ponto B.

Ressaltando que para o ponto C, onde é adicionado o distúrbio externo, mediante a abertura da tampa ocasionando assim uma queda brusca de temperatura, visto que o ambiente interno passou a ter influência direta do ambiente externo, cuja temperatura encontrava-se aproximadamente em 25 °C, e da mesma maneira o controlador obteve êxito no controle da temperatura retornando ao valor de referência.

Ainda com o adicional do distúrbio o controle conseguiu contornar fatores externos mesmo para $\gamma_m = 4dB$, valor esse que encontra-se fora dos valores sugeridos na Tabela 1, no entanto apresenta desvantagens quando comparado ao sistema com $\gamma_m = 6dB$ por apresentar um valor maior da integral do erro absoluto (IAE) representada pela área rachurada nas Figuras 45 e 46 .

5.2 Resultados do teste 2

O teste 2 tem resposta semelhante ao teste 1, sendo que o mesmo foi aplicado nas mesmas configurações que o primeiro, modificando-se somente o valor de referência, que para este caso foi adotado um valor de 41 °C.

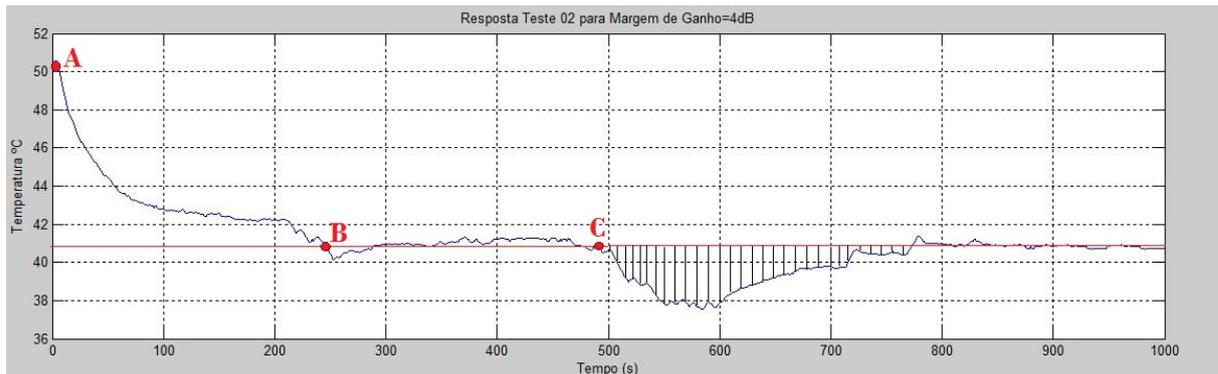
Também pode ser descrito em três etapas, sendo as mesmas representadas pelos pontos A, B e C que configuram-se nas mesmas condições de contorno que o teste 01. Sendo as mesmas:

- Ponto A: tempo em que a planta chega à sua estabilidade sem a adição de técnicas de controle.

- Ponto B: ponto em que o sistema alcança do setpoint.
- Ponto C: ponto em que é adicionado o distúrbio ao sistema.

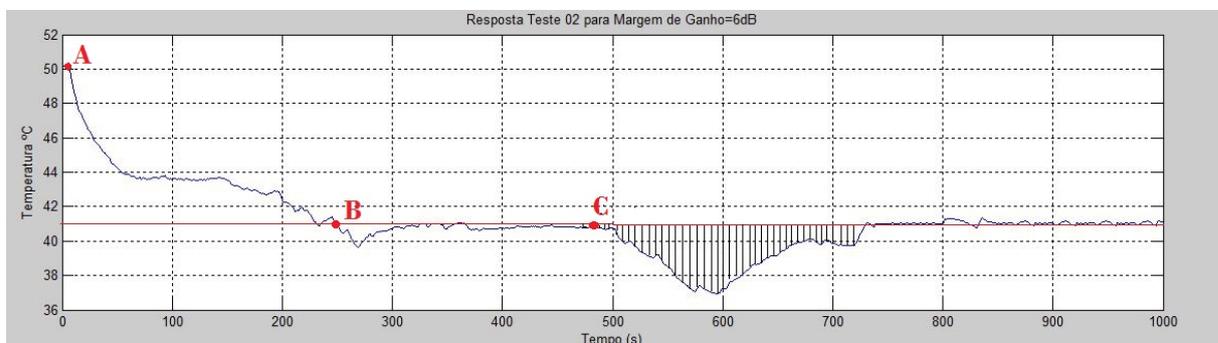
Na Figuras 47 e 48 pode ser visualizados os gráficos de respostas da planta à inserção do controlador PID, utilizando como parâmetro $\gamma_m = 4dB$ e $\gamma_m = 6dB$, com tempo de amostragens 1000 segundos e valor de referência de 41 °C

Figura 47 – Gráfico para valor de $\gamma_m = 4dB$ e *setpoint* 41 °C.



Fonte: A autora

Figura 48 – Gráfico para valor de $\gamma_m = 6dB$ e *setpoint* 41 °C.



Fonte: A autora

Em ambos os gráfico representados nas Figuras 47 e 48, assim como no teste 1 apresentam basicamente a mesma resposta, sendo o início do controle equivalente ao ponto A, ou seja, para $t=0$ segundos.

Na Figura 47 tem-se os valores de tempo de acomodação $t_s = 300$ segundos e valor de ultrapassagem percentual %UP equivalente a 0.6 °C, verificando-se uma redução de 23% no tempo de acomodação.

Na Figura 48 tem-se os valores de tempo de acomodação $t_s = 350$ segundos e valor de ultrapassagem percentual equivalente a 0.7 °C verificando-se uma redução de 17% no tempo de acomodação comparativamente com a resposta da planta sem o adicional de controle apresentados nas Figuras 38, 39, 40 e 41 na seção 4.6.1.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado o projeto e construção de um modelo físico de sistema de controle de temperatura, utilizando a tensão como variável manipulada e temperatura como variável controlada.

Posteriormente foi feita comunicação entre a plataforma Arduino e o software MATLAB® utilizado para implementação do controle no sistema, mediante as etapas citadas na seção 4.5, comunicação essa de vital importância para o funcionamento do projeto.

Com a etapa supracitada concluída foi elaborado um algoritmo de aquisição de dados (Apêndice A), afim de utilizá-lo na identificação do sistema.

Foram feitas simulações computacionais para fins de estudo comportamental da planta, realizando mediante simulação o controle da temperatura de maneira manual.

Com o intuito de verificar o comportamento do sistema real foi realizado o procedimento de identificação da planta mediante o método de resposta à entrada degrau, procedimento utilizado em larga escala na identificação de sistemas e que apresentou uma função de transferência que correspondente à do modelo característico de temperatura.

Em seguida foram realizados estudos sobre quais técnicas de controle implementar no sistema, e optando-se pela técnica de controle PID utilizada em larga escala tendo como características: robustez e simplicidade de aplicação.

E por fim foram realizados dois testes no protótipo utilizando a técnica de controle PID visando o teste do mesmo e implementação do controlador no sistema real.

6.1 Trabalhos futuros

Algumas sugestões de pesquisas posteriores estão descritas abaixo:

- No modelo físico construído é possível realizar várias modificações afim de termos outra perspectiva do que entendemos como variáveis controlada e manipulada no sistema, como por exemplo a inserção de um componente eletrônico afim de realizar o ajuste da tensão, onde esta variável pode ser entendida tanto como entrada e saída do sistema, configurando-se um sistema MIMO, ou seja, com múltiplas variáveis.
- Realizar testes no modelo físico substituindo o CI L298N por um circuito TRIAC, afim de realizar o controle da temperatura utilizando outro circuito de referência.
- Complementar o método de sintonia de forma a torná-lo automático, podendo ser feito mediante a utilização do método apresentado em (ROMERO; SANCHIS; BALAGUER, 2011).

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas—Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. [S.l.]: Editora UFMG, 2007. v. 3. 730 p. 19, 50
- ANDRADE, J. F. B. *Controle Multivariável em Sistemas de Nível de Líquidos com Tanques Interligados*. 86 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará - UFPA, 2009. 19
- ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *PID controllers: theory, design and tuning*. [S.l.]: International Society for measurement and Control Seattle, WA, 1995. v. 2. 28
- BARCELOS, F. P. *Sistema Didático para Controle de Nível e Temperatura*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pelotas - UFPel, 2005. 17, 18
- BARREIROS, J. A. L.; ANDRADE, J. F. B. Construção e utilização de protótipo didático de controle de nível de líquidos não-linear multivariável. *Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE*, v. 1, p. 11, 2014. 19, 20
- BISHOP, R. D. R. *Sistema de Controle Moderno*. [S.l.]: LTC, 2013. 23, 24, 27, 31
- CASTRUCCI, P. de L.; BITTAR, A.; SALES, R. M. *Controle Automático*. [S.l.]: LTC, 2011. 27
- CHIARELLO, J. A. *Ventilação natural por efeito chaminé: estudo em modelo reduzido de pavilhões industriais*. 90 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. 41
- COELHO, A. A. R.; COELHO, L. dos S. *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*. [S.l.]: Editora da UFSC, 2004. 50
- JOHSON, M. A. e. e. a. *PID control: new identification and design methods*. [S.l.]: EUA: SPRINGER, 2005. 28
- JUNIOR, F. M. R. *Desenvolvimento de um Protótipo Didático Multivariável: Sistema de Controle de Níveis de Líquido*. 113 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, 2008. 19
- JUNIOR, M. dos S. *Sistemas Térmicos*. 1. ed. Unidade Integrada SESI SENAI Rio Verde, 2012. 22
- KETZER, F. *Modelagem, simulação e Controle de uma Coluna de Destilação Descontínua Adequada à Produção de Etanol em Pequena Escala*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. 28
- LUNETTA, V. N. Atividades práticas no ensino da ciência. *Revista Portuguesa de Educação*, v. 2, n. 1, p. 81–90, 1991. 11
- MARTINS, S. B.; RANGEL, R. F.; SILVA, S. A. da. Construção de um protótipo para o controle de temperatura. *Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação*, v. 1, p. 11, 2010. 44

- NISE, N.; SILVA, F. R. da. *Engenharia de sistemas de controle*. [S.l.]: LTC, 2009. 27, 28
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2013. 21, 23, 24, 26, 28, 50
- PARASKEVOPOULOS, P. *Digital control systems*. [S.l.]: Prentice Hall Upper Saddle River, 1996. 20
- RODRIGUES, R. A. C. *Computação Paralela: Viabilidade em Cluster de Alto Desempenho*. 71 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Uberaba, 2011. 15
- ROMERO, J. A.; SANCHIS, R.; BALAGUER, P. Pi and pid auto-tuning procedure based on simplified single parameter optimization. *Journal of Process Control*, p. 14, 2011. 62
- SANCHIS, R.; ROMERO, J. A.; BALAGUER, P. Tuning of pid controllers based on simplified single parameter optimization. *International Journal of Control*, v. 1, p. 20, 2010. 29, 30
- SILVA, T. V. da. *Simulação de Modelos Matemáticos de Uma Planta Didática para Controle de Nível e Temperatura em um Cluster Beowulf*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2012. 15, 16
- SILVEIRA, J. A. da. *Experimentos com Arduino*. [S.l.]: Editora Ensino Profissional, 2011. 35
- SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. *Principles and practice of automatic process control*. 2. ed. [S.l.]: Wiley New York, 1997. 11
- ZHI, Y.; JINGLING, W. Auto-tuning of pid parameters based on switch step response. In: IEEE. *Intelligent Processing Systems, 1997. ICIPS'97. 1997 IEEE International Conference on*. [S.l.], 1997. v. 1, p. 779–782. 51

APÊNDICE A – ALGORITMO NA IDE DO SOFTWARE MATLAB PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA E TENSÃO

```

//Programa : TCC_002
//Autora : IZONEIDE LEITE
%run('clean');
delete(instrfindall);
clear all;
close all;
clc
s = serial('COM3');
fopen(s)//abre a porta serial do Arduino
set(s, 'FlowControl', 'hardware');
set(s, 'BaudRate', 9600);
set(s, 'Parity', 'none');
set(s, 'DataBits', 8);
set(s, 'StopBit', 1);
set(s, 'Timeout',0.100);
%clc;
disp(get(s, 'Name'));
prop(1)=(get(s, 'BaudRate'));
prop(2)=(get(s, 'DataBits'));
prop(3)=(get(s, 'StopBit'));
prop(4)=(get(s, 'InputBufferSize'));
disp(['Port Setup Done!!', num2str(prop)]);
t=1; disp('Running');
while(t<=1000) %ler os dados da porta serial durante 1000 segundos
s =fread(s)
fprintf('%s', s);
x(t)=t*0.100;
y(t)=str2num(s);
t=t+1;
s=0;
end
%Função para guardar os dados em um bloco de notas
time=clock;

```

```
adress='C:\Users\Administrador\Desktop\tccteste';
dia = num2str(time(3));
mes = num2str(time(2));
ano = num2str(time(1));
horas=num2str(time(4));
minutos=num2str(time(5));
nome_do_arquivo=atrcat(adress,dia,'-',mes,'-',ano,'-',horas,'-',minutos,'');
t=1
while (t<=1000)
fprintf(id_do_arquivo,'\t%5.2f\t%8.2f\n',x(t),y(t));
t=t+1;
end
fclose(id_do_arquivo)
%fecha porta serial do Arduino
fclose(s);
plot(x,y)
```