



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

**Desenvolvimento de um banho termostático
para controle de temperatura de amostras
utilizadas em ensaios não destrutivos por
ultrassom**

Cassiano Augusto Pimenta

João Monlevade, MG
2019

Cassiano Augusto Pimenta

**Desenvolvimento de um banho termostático
para controle de temperatura de amostras
utilizadas em ensaios não destrutivos por
ultrassom**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof.^o Dr. Marcelo Moreira Tiago

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2019**

P644d

Pimenta, Cassiano Augusto.

Desenvolvimento de um banho termostático para controle de temperatura de amostras utilizadas em ensaios não destrutivos por ultrassom [manuscrito] / Cassiano Augusto Pimenta. - 2019.

50f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Sistemas embarcados (Computadores). 2. Modelagem. 3. Controladores programáveis. 4. Controle de temperatura. I. Tiago, Marcelo Moreira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 09 dias do mês de julho de 2019, às 15 horas, no bloco H deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo formando Cassiano Augusto Pimenta, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Marcelo Moreira Tiago, Marcio Feliciano Braga e Victor Costa da Silva Campos.

O candidato apresentou a monografia intitulada: Desenvolvimento de um banho termostático para controle de temperatura de amostras utilizadas em ensaios não destrutivos por ultrassom. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação do candidato, com a nota média 8,0, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo formando.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Marcelo Moreira Tiago	8,0
Marcio Feliciano Braga	8,0
Victor Costa da Silva Campos	8,0
Média	8,0

João Monlevade, 09 de julho de 2019.

Marcelo Moreira Tiago
Professor Orientador

Marcio Feliciano Braga
Professor Convidado

Victor Costa da Silva Campos
Professor Convidado

Cassiano Augusto Pimenta
Aluno



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Desenvolvimento de um banho termostático para controle de temperatura de amostras utilizadas em ensaios não destrutivos por ultrassom” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 09 de Julho de 2019.

Cassiano Augusto Pinheiro
Nome completo do(a) aluno(a)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus que possibilitou à minha chegada até aqui. Agradeço de forma especial à minha família, principalmente à minha mãe, Maria Úrsula Moura Pimenta, pessoa que tenho muito orgulho e que sou muito grato por tudo que fez e faz por mim. À minha irmã, Lorrânia, pelo apoio e incentivo no decorrer do curso. Aos demais amigos e professores que caminharam junto comigo no decorrer dessa etapa tão importante tanto para minha vida pessoal quanto profissional, principalmente ao Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago e ao Prof. Dr. Víctor Costa Da Silva Campos pelo suporte no desenvolvimento do trabalho.

"(...) Até aqui nos ajudou o Senhor."

1Samuel 7:12

Resumo

O controle de temperatura é fundamental em diversas atividades, principalmente em aplicações industriais e químicas. Pode-se citar alguns modelos de sensores ultrassônicos que necessitam de um controle de temperatura preciso para seu correto funcionamento. Este trabalho simula o controle de temperatura para banhos termostáticos com aplicação voltada para sensores ultrassônicos. O trabalho foi desenvolvido com a utilização de um tanque de aquecimento simulando o banho termostático, em que com a utilização de um circuito embarcado desenvolveu-se a ação de controle PI para o controle de temperatura do tanque. A parte inicial do trabalho consistiu na modelagem matemática do sistema térmico pela técnica de identificação de sistema experimental (modelagem caixa-preta) seguida pela validação do modelo. Posteriormente, realizou-se a sintonia do controlador PI com a escolha de dois métodos de sintonia diferentes a fim de encontrar um método que atendesse melhor aos parâmetros esperados, parâmetros estes associados a baixo valor de sobressinal e tempo de acomodação. Definida a melhor sintonia do controlador, realizou-se a configuração de uma interface gráfica, possibilitando assim a interação do operador com o sistema de maneira simples e objetiva, sendo possível o ajuste do *setpoint* e acompanhamento do valor de temperatura.

Palavras-chave: Sensor ultrassônico, Modelagem, Controle PI, Temperatura, Sistema Embarcado

Abstract

Temperature control is critical in many activities, especially in industrial and chemical applications. We can mention some models of ultrasonic sensors that need a precise temperature control for the correct operation. This work simulates temperature control for thermostatic baths, with application oriented to ultrasonic sensors. The work was developed with the use of a heating tank simulating the thermostatic bath, in which with the action of a microcontroller in an embedded circuit the action of control PI was developed for the temperature control of the system. The initial part of the work was the mathematical modeling of the thermal system, with technique of identification of experimental system, then validation of the acquired model. Subsequently, the PI controller was tuned with the choice of two different tuning methods in order to find one that better matches the expected parameters. Parameters are associated with low overshoot and settling time. Once the controller was better tuned, it was possible to configure a graphical interface, thus allowing the operator to interact with the system in a simple and objective manner. It is possible to adjust the setpoint and to monitor the temperature value.

Keywords: Ultrasonic Sensor, Modeling, PI Control, Temperature, Embedded System

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de utilização do banho termostático	1
Figura 2 – Exemplo de controle de temperatura com utilização de sistema embarcado	3
Figura 3 – Elemento diagrama de blocos	9
Figura 4 – Curva de resposta exponencial	10
Figura 5 – Diagrama de blocos de um sistema de controle	11
Figura 6 – Sistema de controle em malha fechada	11
Figura 7 – Resposta temporal - Sistema de controle	12
Figura 8 – Fluxograma do processo	13
Figura 9 – Controle PID de um processo	14
Figura 10 – Curva S	16
Figura 11 – Diagrama de blocos método IMC	17
Figura 12 – Modulação por largura de pulso	20
Figura 13 – Sistema de controle utilizando microprocessador	21
Figura 14 – Circuito ligação sensor NTC	22
Figura 15 – Curva do sensor NTC Resistência x Temperatura	23
Figura 16 – Simulação circuito	29
Figura 17 – Montagem do protótipo	30
Figura 18 – Relação de tensão x temperatura do sensor NTC	32
Figura 19 – Teste de resolução do sensor	32
Figura 20 – Posição dos sensores para teste	33
Figura 21 – Gradiente de temperatura no tanque	34
Figura 22 – Curva de temperatura dos experimentos realizados para modelagem do sistema - Em azul, a curva referente ao experimento 1, em verde, a curva referente ao experimento 2 e em preto a curva referente ao experimento 3	35
Figura 23 – Validação do sistema - Em azul, a curva referente ao experimento 1, em verde, a curva referente ao experimento 2, em preto, a curva referente ao experimento 3 e em vermelho a curva referente a simulação utilizando a função <i>lsim</i>	37
Figura 24 – Comparação com e sem condicionamento no integrador	39
Figura 25 – IMC - SP 27 °C	40
Figura 26 – Ziegler-Nichols - SP 27 °C	41
Figura 27 – Comparação dos 2 testes - SP 27 °C - Em azul, referente ao método de Ziegler-Nichols, em preto, referente ao método IMC e em vermelho referente ao <i>setpoint</i>	42

Figura 28 – Comparação dos 2 testes - SP 30°C - Em azul, referente ao método de Ziegler-Nichols, em preto, referente ao método IMC e em vermelho referente ao <i>setpoint</i>	43
Figura 29 – Resposta ao método de sintonia de Ziegler-Nichols - Em azul, curva referente ao <i>setpoint</i> de 30 °C, em preto, curva referente ao <i>setpoint</i> de 27 °C, em vermelho contínuo, referente ao <i>setpoint</i> de 30 °C e em vermelho tracejado referente ao <i>setpoint</i> de 27 °C	44
Figura 30 – Resposta ao método de sintonia de Ziegler-Nichols - SP 27°C	44
Figura 31 – Resposta ao método de sintonia de Ziegler-Nichols - SP 30°C	45
Figura 32 – Guide	45

Lista de tabelas

Tabela 1 – Método de sintonia Ziegler-Nichols	16
Tabela 2 – Método de sintonia IMC	18
Tabela 3 – Exemplo de conversão AD para sensor de temperatura	20
Tabela 4 – Valores de K_p e K_i encontrados com auxílio do <i>sisotool</i>	38
Tabela 5 – Comparação das especificações das respostas dos sistemas - SP 27 °C .	42
Tabela 6 – Comparação das especificações das respostas dos sistemas - SP 30 °C .	42

Lista de abreviaturas e siglas

UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
ICEA	Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
FT	Função de Transferência
NTC	Coeficiente de Temperatura Negativo (<i>Negative Temperature Coefficient</i>)
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
IMC	Controle de Modelo Interno (<i>Internal Model Control</i>)
PROM	Memória de Leitura Programável (<i>Programmable Read-Only Memory</i>)
RAM	Memória de Acesso Aleatório (<i>Random Access Memory</i>)
CPU	Unidade Central de Processamento (<i>Central Processing Unit</i>)
PWM	Modulador por Largura de Pulso (<i>Pulse-Width Modulation</i>)
AD	Analógico Digital
MATLAB	Laboratório de Matrizes (<i>Matrix Laboratory</i>)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo	3
1.2	Motivação	3
1.3	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Banhos termostáticos e suas aplicações para medições com ultrassom	5
2.2	Transferência de Calor	7
2.3	Modelagem Matemática e Identificação de Sistemas	8
2.4	Controladores	10
2.4.1	Controlador PID	14
2.4.2	Sintonia de Sistemas de Controle	15
2.4.2.1	Ziegler-Nichols (resposta ao degrau unitário)	16
2.4.2.2	IMC	17
2.5	Sistemas Embarcados	18
2.6	Sensor de Temperatura	21
2.7	Metrologia	23
2.7.1	Incerteza	23
3	METODOLOGIA	26
3.1	Etapas do projeto	26
3.1.1	Definição de objetivo e tecnologia para realização do projeto	26
3.1.2	Modelagem matemática do sistema	27
3.1.3	Sintonia do controlador e análise de desempenho do sistema de controle	27
3.1.4	Interface gráfica	28
3.2	Componentes utilizados	28
3.3	Simulações	28
3.4	Protótipo	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
	REFERÊNCIAS	47

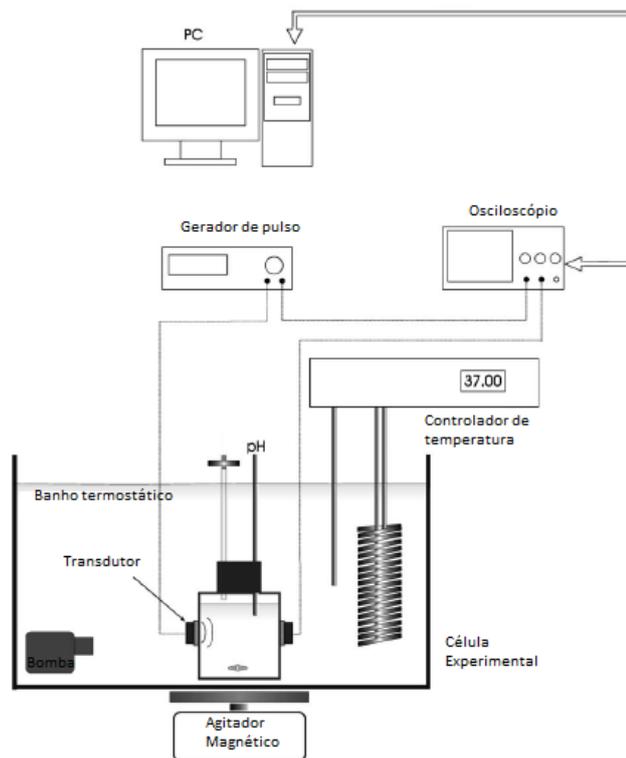
1 Introdução

Os sensores ultrassônicos estão sendo amplamente utilizados como sensores químicos acústicos no monitoramento do curso dos processos de polimerização, cristalização e fermentação. A velocidade do som, absorção sonora e impedância acústica são as propriedades acústicas consideradas para a caracterização de misturas líquidas (HENNING; RAUTENBERG, 2006). Em muitas aplicações os sensores ultrassônicos são utilizados em ensaios não destrutivos, não destrutivos por que não danificam o material ensaiado durante a análise das propriedades.

Os banhos termostáticos são de suma importância para uma medição eficiente com sensores ultrassônicos, pois a incerteza dos parâmetros acústicos podem ser resultantes de flutuações da temperatura durante o procedimento de medição. Em alguns processos, observou-se que flutuações na temperatura na ordem de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ podem contribuir para a incerteza dos parâmetros acústicos, entretanto, esses erros podem ser minimizados pelo controle cuidadoso da temperatura dos meios de propagação e das amostras durante os procedimentos de medição (MATHER; WHITTAKER; BALDOCK, 2002).

A Figura 1 representa um esquemático utilizado para medições com um sensor ultrassônico utilizando um banho termostático em que a temperatura é controlada.

Figura 1 – Exemplo de utilização do banho termostático



Fonte: Retirado de Resa et al. (2007)

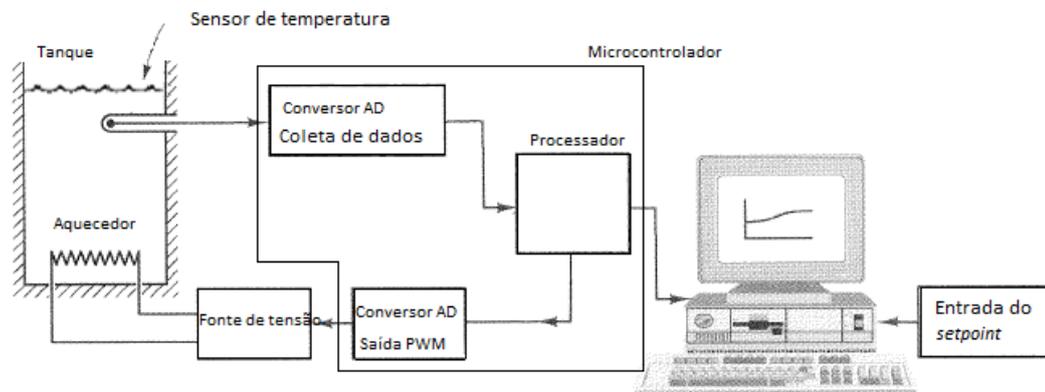
Com relação ao sistema de controle, entende-se como uma interligação de componentes para a formação de um sistema capaz de fornecer uma saída desejada. Neste caso, já que a resposta desejada do sistema é conhecida, utiliza-se deste sinal para que seja gerado um sinal proporcional ao erro entre a variável desejada e o valor medido. O sinal de erro é utilizado na ação de controle e, para que esta ação seja realizada, uma série de operações de controle a malha fechada é implementada (DORF; BISHOP, 2001, cap.4 p. 140).

Para a realização do controle de temperatura foi utilizado neste trabalho um controlador automático. Esses tipos de controladores tem como objetivo manter determinada variável do processo no ponto operacional requisitado pelo sistema, atendendo as especificações preestabelecidas e sendo capazes de eliminar perturbações. Os controladores devem estabelecer as condições de estabilidade evitando desvios entre a variável controlada e o valor de *setpoint*. Para o controle de temperatura em banhos termostáticos, os controladores automáticos podem ser utilizados desde que atendam as especificações do sistema e não interfiram no processo de medição.

No desenvolvimento do trabalho, optou-se pela utilização da ação de controle proporcional-integral (PI) para a realização do controle de temperatura do banho termostático. Para a implementação do controlador foi utilizado um sistema embarcado, em que foi utilizado o microcontrolador ATmega328 para o tratamento de dados e atuação no sistema. O valor de temperatura desejado é inserido via interface gráfica por um *software* que fica encarregado de realizar a comunicação com o Arduino UNO. A medição da temperatura é feita pelo microcontrolador com a utilização de um sensor NTC, o microcontrolador compara o valor medido com o valor desejado e ajusta o valor da variável de atuação no sistema para que o erro entre a valor medido e o desejado seja o mais próximo de zero ou atenda as condições de estabilidade definidas.

A Figura 2 apresenta o esquemático da ação de controle utilizando um sistema embarcado para controle de temperatura.

Figura 2 – Exemplo de controle de temperatura com utilização de sistema embarcado



Fonte: Adaptado de Ogata e Yang (2010)

1.1 Objetivo

O objetivo do trabalho consiste na montagem de um banho termostático, que será utilizado para simular o controle de temperatura de amostras que serão analisadas por meio de ensaios ultrassônicos. Para tanto, será feita a montagem de um sistema eletrônico de controle de temperatura que apresente uma precisão menor que $0,2^{\circ}\text{C}$, e um tempo de assentamento menor que 50 minutos.

Para o controle do processo, será utilizado um controlador PI, cuja sintonia será feita por meio de dois métodos: Ziegler-Nichols e IMC. Ao final, os controladores serão comparados, a fim de se encontrar um controlador que atenda as especificações definidas anteriormente.

1.2 Motivação

Os sensores ultrassônicos são eficazes em diversas aplicações, sendo utilizados como medidores de fluxo e nível em processos industriais. Recentemente estão sendo utilizados em novas áreas e sua importância, conseqüentemente, vem aumentando. Características acústicas estão sendo usadas como processos não invasivos relacionando parâmetros de sons com parâmetros do processo. A medição ultrassônica baseia-se na mudança das propriedades das ondas acústicas que se propagam pelo meio.

Dentre as aplicações dos sensores ultrassônicos pode-se citar as medições ultrassônicas relativas a velocidade e atenuação dos sinais sendo utilizadas para caracterizar o processo de fermentação de iogurte, medições relacionadas à avaliação dos dosímetros de gel de polímero, monitoramento da fermentação do ácido láctico correlacionando os parâmetros do processo com a velocidade do sinal, entre outras aplicações.

Para que as medições sejam realizadas, os sensores ultrassônicos necessitam da

utilização de banhos termostáticos em que a temperatura da amostra deve ser controlada para uma medição eficiente e confiável. Em muitos casos a faixa de temperatura que os meios de transmissão devem ser controlados está entre 25°C e 45°C. O controle de temperatura nesses casos é de suma importância, pois a variação de temperatura influencia diretamente nos parâmetros acústicos, afetando também a densidade, que está diretamente relacionada com a impedância acústica (MATHER; WHITTAKER; BALDOCK, 2002).

Conhecida a importância dos sensores ultrassônicos e suas aplicações abrangendo áreas industriais e químicas, nota-se a importância do controle de temperatura para os banhos termostáticos, extremamente necessários para o bom funcionamento de determinados sensores ultrassônicos disponíveis no mercado.

1.3 Estrutura do Trabalho

Nesta seção é realizada uma breve síntese da estrutura do trabalho, resumindo os principais temas abordados em cada capítulo da monografia.

O primeiro capítulo, introdutório, apresenta os objetivos e motivações para o desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso.

O segundo capítulo, referente a revisão bibliográfica, apresenta uma síntese das diversas áreas científicas utilizadas no desenvolvimento do trabalho, abordando as técnicas de modelagem matemática comumente utilizadas, descrição de sistemas embarcados, abordagem sobre os sistemas térmicos, diferentes tipos de sensores para medição de temperatura, além de técnicas de controle PID e diferentes métodos de sintonia de sistemas de controle.

No capítulo três, metodologia, é apresentado o passo-a-passo dos procedimentos experimentais utilizados ao longo do trabalho, desde a montagem do protótipo às estratégias utilizadas no decorrer dos procedimentos experimentais.

No quarto capítulo os resultados são apresentados, em que é realizada a análise dos resultados obtidos durante os ensaios para cada um dos casos analisados.

O quinto e último capítulo consiste nas considerações e análises sobre os pontos considerados mais relevantes do trabalho. Além disso, são apresentadas propostas de desenvolvimento para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentadas as principais características de sensores ultrassônicos, sistemas térmicos, e são descritos os principais conceitos relacionados ao projeto de um sistema eletrônico embarcado utilizado para o controle de temperatura.

A seguir serão apresentados estudos realizados com a utilização de sensores ultrassônicos com a aplicação de banhos termostáticos, evidenciando a importância dos banhos em determinados sistemas de medição por ultrassom.

2.1 Banhos termostáticos e suas aplicações para medições com ultrassom

O trabalho apresentado por Mather, Whittaker e Baldock (2002) apresentou um sistema de medição, composto por uma cubeta e um banho termostático, utilizado para avaliar as propriedades de um gel de polímero para radioterapia. O gel foi depositado no interior de uma cubeta plástica, que por sua vez foi posicionada dentro de um banho termostático com água. A cubeta foi termostatizada por um período de aproximadamente 12h. Após esse período, deu-se início ao processo de medição das propriedades acústicas do gel, onde foram calculados os valores de velocidade e atenuação.

Lucklum e Aljaafrech (2015) apresentaram um trabalho que cita o uso de medidas ultrassônicas para caracterizar o processo de fermentação do iogurte, demonstrando o efeito do aumento da temperatura na atenuação do sinal recebido para iogurte e leite. Nesse trabalho utilizou-se um banho termostático para a realização das medições com ultrassom, em que a temperatura foi mantida por um controlador de temperatura com precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$ e o controle de temperatura sendo realizado na faixa de temperatura entre 25°C e 45°C . Os valores de temperatura eram diferentes para cada etapa de análise do processo.

Alouache et al. (2015) realizaram um estudo referente a utilização do ultrassom no controle de qualidade e monitoramento dos estágios de fermentação do iogurte. O desenho experimental desenvolvido é composto por um transdutor ultrassônico e um sistema de retenção mecânico que são colocados em um tanque contendo o meio de propagação (água destilada). A temperatura do banho é controlada e mantida a 45°C usando um controlador de temperatura, e as medidas de acidez são tomadas por meio de um transdutor conectado a um receptor de pulsos ultrassônico. Para a realização de tal experimento utilizou-se de um banho termostático para controle de temperatura do meio de propagação.

O trabalho apresentado por Resa et al. (2007) realizou um estudo para modelar as mudanças ocorridas durante a fermentação de ácidos lácticos e mostrar o grande

potencial desta técnica não invasiva de monitoramento de processos biotecnológicos. Para a realização do estudo mediu-se a velocidade ultrassônica durante o processo de crescimento das bactérias. As medições foram realizadas com o meio de fermentação colocado em vidro quadrado com lado interno medindo 57,8mm, imerso em banho termostático à 37°C com precisão de $\pm 0,01^\circ\text{C}$. O meio de propagação foi constantemente agitado por um agitador magnético para garantia da homogeneidade da temperatura. No trabalho é citado também o crescimento da utilização de ultrassom no monitoramento de reações químicas e processos biológicos, mas a técnica é sensível a parâmetros físicos como pressão e temperatura, denotando a importância do controle de temperatura para tais procedimentos.

Zaz et al. (2015) desenvolveram um trabalho para adaptação de um transdutor ultrassônico de alta frequência para a medição da temperatura da água em um reator nuclear. Devido a um processamento de sinal específico, o dispositivo permite a medição de distância através da avaliação do tempo de vôo de uma onda ultrassônica e um dos pontos cruciais é a avaliação da temperatura da água dentro do canal. Para a implementação do sistema de medição é necessário uma série de componentes para aquisição e processamento de sinal. Dentre esses componentes destaca-se o banho termostático que é utilizado para calibração do dispositivo. Para calibração do equipamento, o sensor é imerso em um banho termostático que regula a temperatura de 30°C à 40°C em passos de 0,5°C, onde cada passo é mantido por vários minutos para garantia da estabilidade da temperatura.

Rajendran et al. (2002) realizaram um trabalho referente ao estudo da medição da velocidade ultrassônica e atenuação em temperaturas elevadas. O estudo analisa a sensibilidade e confiabilidade das medições com sensores ultrassônicos e aponta que os sensores apresentam alta sensibilidade e confiabilidade para medições em temperatura ambiente. Entretanto, a técnica não apresenta o mesmo desempenho para altas temperaturas devido a perda de propriedades piezoelétricas do material do transdutor. Para o estudo, foi realizado um procedimento experimental com base na análise da velocidade devido a variação da temperatura, a montagem experimental foi calibrada sem a amostra entre as varetas, desde a temperatura ambiente (300K) até 500K. O controlador de temperatura utilizado tinha precisão de $\pm 1\text{K}$. Observou-se um aumento linear no tempo de vôo com o aumento da temperatura e a tendência geral de diminuição na velocidade com aumento da temperatura.

Henning e Rautenberg (2006) realizaram um trabalho em que analisam um processo de monitoramento da concentração de substâncias selecionadas em líquidos utilizando sistema com sensor ultrassônico. Os sensores estão sendo utilizados para medir a concentração de substâncias selecionadas, densidade, viscosidade ou concentração de partículas. No estudo destacam-se as vantagens e desvantagens da utilização dos sensores de ultrassom, dentre as vantagens tem-se: alta precisão na medição de velocidade, rápida resposta do sensor, método de medição não-invasivo, robustez. As desvantagens citadas pelos autores estão relacionadas a: dependência de propriedades acústicas nas concentrações de substâncias

específicas, velocidade dependente da concentração e temperatura, resolução limitada para absorção e medição de impedância, grande influência da temperatura. Para a realização do estudo a temperatura da água foi controlada em 25°C.

Mafezzoli et al. (1999) elaboraram um estudo em que utiliza a propagação de ondas ultrassônicas para análise aplicada na caracterização mecânica dinâmica (DMA, do inglês *dynamic mechanical characterization*) de polímeros. As medições ultrassônicas foram realizadas em condições isotérmicas, a temperatura foi mantida constante em 48°C, com precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$. Outros experimentos foram realizados aquecendo a $1^\circ\text{C}/\text{min}$, com a temperatura variando de 20 a 90°C. O estudo constatou uma diminuição da velocidade longitudinal inicial como o aumento da temperatura.

2.2 Transferência de Calor

A transferência de calor é conhecida como o processo no qual a energia é transportada. Nos casos em que existir um gradiente de temperatura dentro de um sistema ou quando dois sistemas diferentes forem colocados em contato haverá transferência de calor. O calor não pode ser medido ou observado diretamente, entretanto, seus efeitos podem ser observados e medidos (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2012, cap. 1 p. 1).

O principal problema da transferência de calor está relacionado a determinação da taxa de transferência de calor em uma diferença de temperatura específica, para o dimensionamento da viabilidade, custo e tamanho de equipamento necessário para a transferência de calor. As dimensões de aquecedores, refrigeradores e trocadores de calor dependem da taxa na qual o calor é transferido em determinadas condições e da quantidade de calor a ser transmitida (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2012, cap. 1 p. 2).

Existem três maneiras distintas pelas quais o calor é transferido de uma substância para outra, sendo elas por condução, convecção e radiação.

Para transferência de calor por condução, sempre que existir em um meio sólido um gradiente de temperatura, o calor será transmitido da região de temperatura mais alta para a de temperatura mais baixa (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2012, cap. 1 p. 3).

Na transferência de calor por radiação, a energia que é transferida de uma superfície como calor irradiado depende da temperatura absoluta e temperatura da superfície (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2012, cap. 1 p. 18).

A transferência de calor por convecção consiste na operação de dois mecanismos simultaneamente, o primeiro relacionado a transferência de energia atribuída ao movimento das moléculas e o segundo relaciona-se com a transferência de energia através do movimento macroscópico de parcelas do fluido (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2012, cap. 1 p. 14).

Neste trabalho o método abordado será o de transferência de calor por convecção. No processo de convecção o movimento do fluido está relacionado com o movimento de suas parcelas, com grande número de moléculas que movem-se em razão de força externa. Essa

força pode ser provocada pela convecção natural, por um gradiente de densidade, ou pela convecção forçada provocada pela diferença de pressão gerada por uma bomba ou ventoinha ou pela combinação dos dois. A transferência de calor por convecção depende da densidade, viscosidade, velocidade do fluido e também das propriedades térmicas (condutividade térmica e calor específico). Na convecção forçada, a velocidade é imposta por uma bomba ou ventoinha podendo ser especificada diretamente. Na convecção natural, a velocidade do fluido depende da diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, coeficiente de expansão térmica do fluido e campo de força do corpo (no caso, simplesmente a força da gravidade) (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2012, cap. 1 p. 14).

2.3 Modelagem Matemática e Identificação de Sistemas

Os modelos matemáticos podem assumir diversas formas, que estão diretamente relacionadas com o alvo de interesse e as circunstâncias particulares de cada sistema. Em problemas de controle ótimo, os modelos de espaço de estados são mais indicados, em contrapartida, para análises de resposta transitória, lineares e invariantes no tempo a representação através de função de transferência pode ser mais vantajosa (OGATA; YANG, 2010, cap. 3 p. 48).

Uma questão de grande importância está relacionada a escolha do tipo de modelagem a ser utilizada. Os modelos teóricos baseiam-se nos princípios físicos ou químicos do sistema, entretanto, tais modelos teóricos rigorosos podem ser inviáveis para processos complexos quando são necessários um número grande de equações diferenciais com parâmetros desconhecidos. A outra abordagem baseia-se no modelo empírico voltado para a análise de dados experimentais. Para escolha do melhor método deve-se levar em consideração os objetivos, aplicações, tempo disponível para realização do levantamento de dados, processo e características do banco de dados. Os problemas encontrados na modelagem matemática de sistemas dinâmicos baseados em observações normalmente são tratados dentro da engenharia de controle como problemas de identificação de sistemas (GARCIA, 2005, cap. 3 p. 63).

O intuito do estudo de técnicas de identificação surge do fato de que, frequentemente, não se conhecem as equações envolvidas no funcionamento de um determinado sistema ou elas são conhecidas, mas, por limitações de tempo e recurso seria inviável levantar tais equações e estimar seus respectivos parâmetros (AGUIRRE, 2004, cap. 1 p. 80).

Existem diversas formas de classificar técnicas de modelagem, dentre elas, uma forma comum é agrupar os métodos em três categorias: modelos teóricos, experimentais e híbridos.

Os modelos teóricos oferecem vantagens por fornecer o entendimento do comportamento do processo e por possibilitar a aplicação em amplas faixas de condições. Dentre as desvantagens encontradas, estão a tendência de serem caros e demorarem a serem

desenvolvidos, além de incluírem alguns parâmetros que não estão prontamente disponíveis, como coeficientes de taxa de reações, coeficientes de transferência de calor ou propriedades físicas (SEBORG et al., 2003).

Os modelos experimentais possuem obtenção do modelo simplificada quando comparado aos modelos teóricos, porém, apresentam desvantagens por dependerem de que já se possua o processo ou equipamento construído. Os modelos experimentais devem ser usados com cuidado para operações com condições que não foram incluídas nos dados experimentais usados no ajuste do modelo (SEBORG et al., 2003).

Os modelos híbridos possuem vantagens por incorporarem o conhecimento teórico, por poderem ser extrapolados por meio de uma maior variedade de condições de operação do que o modelo empírico e por necessitarem de menos esforço para desenvolvimento do que modelos teóricos (SEBORG et al., 2003).

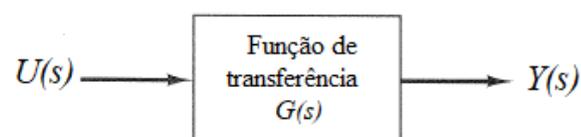
Outro ponto importante da modelagem de sistemas está relacionado com a validação do modelo. Os dados utilizados para verificação de desempenho ou validação do modelo são denominados dados de validação. A preocupação com o teste do modelo é um procedimento básico da validação de modelos, haja vista a necessidade de verificar se os modelos escolhidos incorporam as características de interesse do sistema original (AGUIRRE, 2004, cap. 1 p. 82).

As funções de transferência normalmente são utilizadas para caracterizar as relações de entrada-saída de sistemas que podem ser expressas por equações diferenciais invariantes no tempo, no entanto, não fornecem informações com relação à estrutura física do processo. A função de transferência é uma propriedade intrínseca do sistema que independe da magnitude e natureza do sinal de entrada ou função de excitação (OGATA; YANG, 2010, cap. 3 p. 50).

A função de transferência, FT, de um sistema linear pode ser definida como a relação da transformada de Laplace da variável de saída com a de entrada com todas condições iniciais supostamente iguais a zero. A FT representa a relação que descreve a dinâmica do sistema sob observação (DORF; BISHOP, 2001, cap. 2 p. 37).

A Figura 3 representa o diagrama de blocos referente a FT, em que $U(s)$ é a entrada do processo e $Y(s)$ a saída.

Figura 3 – Elemento diagrama de blocos



Fonte: Retirado de Ogata e Yang (2010)

Os sistemas térmicos comportam-se como sistemas de primeira ordem, ou seja, funções de transferência de primeira ordem podem descrever a dinâmica de tais processos

(OGATA; YANG, 2010).

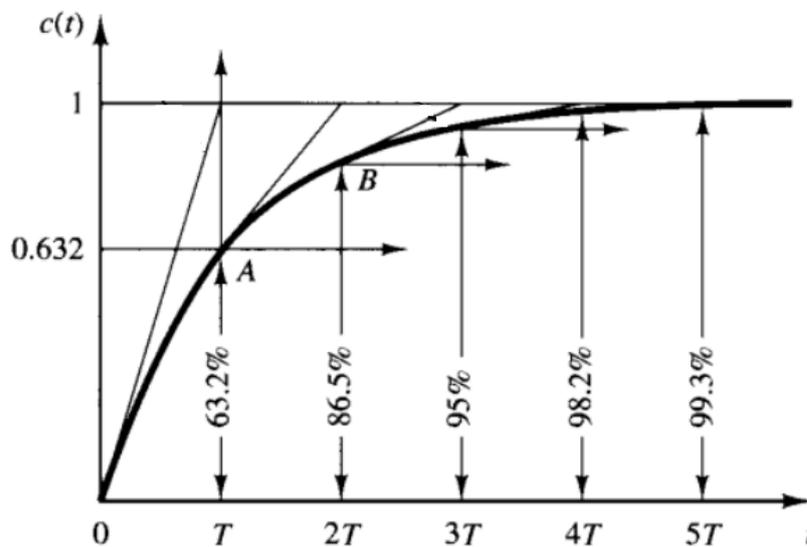
Um sistema de primeira ordem pode ser representado por

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1}, \quad (2.1)$$

em que K é o ganho do processo em regime permanente de operação, τ é o tempo que o sistema leva para atingir 63,2% do seu valor de ganho final e θ consiste no tempo que a saída do sistema demora para variar a partir de uma perturbação na entrada do processo.

A Figura 4 representa a resposta de um sistema de primeira ordem a um degrau unitário.

Figura 4 – Curva de resposta exponencial



Fonte: Retirado de Ogata e Yang (2010)

No intervalo de tempo com duração de uma constante de tempo igual a τ , a resposta partiu de 0 à 63,2% do valor final. Em 2τ alcançou 86,5%, 3τ 95%, 4τ 98,2% e em 5τ 99,3%, com isso nota-se que para $t \geq 4\tau$ a resposta fica na faixa de 2% do valor final. Na prática considera-se razoavelmente que o tempo de resposta é o tempo que a curva leva para alcançar a linha de 2% do valor final (OGATA; YANG, 2010, cap. 4 p. 115).

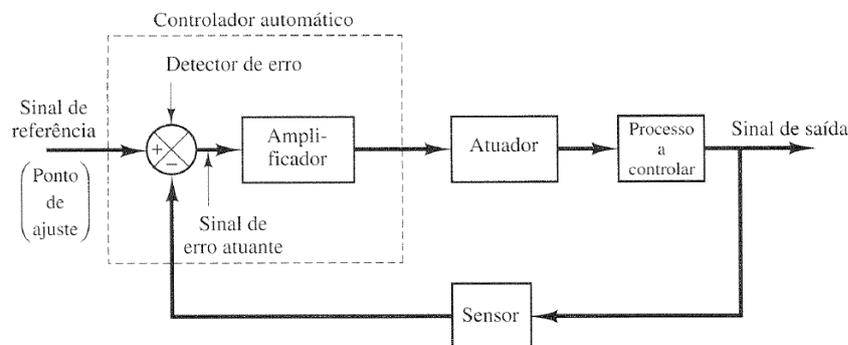
2.4 Controladores

Um controlador é o sistema responsável por comparar uma grandeza real de saída de um processo com a grandeza de referência, calculando o erro entre ambas grandezas e produzindo um sinal de controle que tem como função atuar no sistema para reduzir o erro a zero ou a um valor pequeno.

Os controladores industriais podem ser classificados levando em consideração suas ações de controle, como controladores on-off, controladores proporcionais (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) e proporcional-integral-derivativo (PID) (OGATA; YANG, 2010, cap. 5 p. 177).

O diagrama da Figura 5 refere-se a um sistema de controle industrial composto por um atuador, um controlador, um sensor e um processo a ser controlado. O controlador encontra o sinal de erro atuante no sistema e amplifica este erro a um nível mais elevado. O sinal de saída alimenta o atuador que produz o sinal responsável por agir no processo, de acordo com o sinal de controle, até que o sinal medido seja o mesmo ou bem próximo do sinal de referência (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006, cap.3 p. 45).

Figura 5 – Diagrama de blocos de um sistema de controle

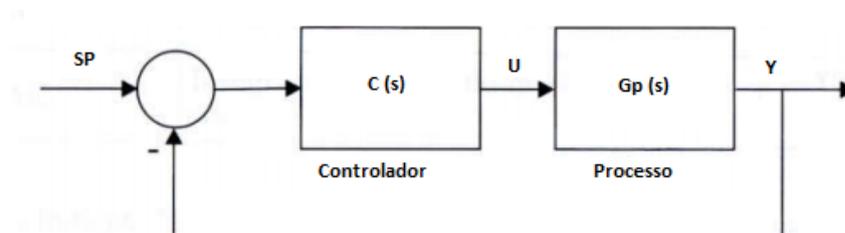


Fonte: Retirado de Ogata e Yang (2010)

O elemento responsável por converter a variável de saída para uma variável que possa ser usada para comparação do sinal de saída com o sinal de referência é o sensor, elemento que fica posicionado no elo de realimentação do sistema a malha fechada. O valor do *setpoint* deve ser convertido em sinal de referência possuindo as mesmas propriedades do sinal originário do sensor (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006, cap.3 p. 45).

A Figura 6 representa o diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.

Figura 6 – Sistema de controle em malha fechada



Fonte: Retirado de Campos e Teixeira (2010)

A função de transferência em malha fechada relaciona a saída do processo com o valor de referência (*setpoint*). Assumindo que a entrada do controlador seja o erro $E(s)$, a saída do controlador pode ser expressa por

$$U(s) = E(s)C(s). \quad (2.2)$$

Logo, a saída do sistema é

$$Y(s) = G_p(s)U(s). \quad (2.3)$$

Substituindo a equação 2.2 na equação 2.3, temos

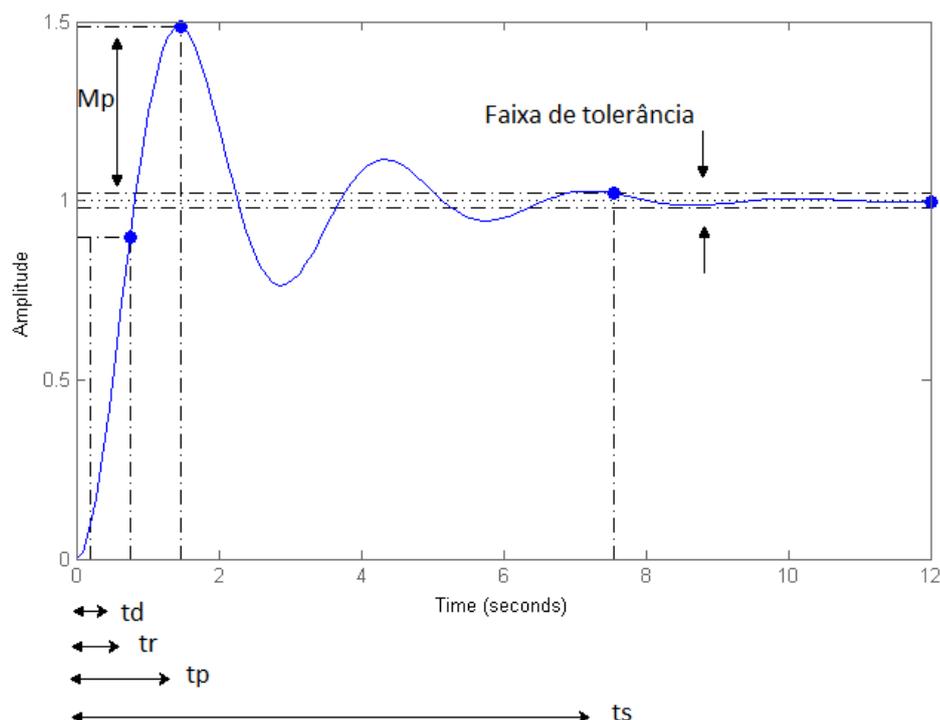
$$Y(s) = G_p(s)E(s)C(s). \quad (2.4)$$

Sabe-se que $E(s) = SP(s) - Y(s)$, o que possibilita a obtenção da função de transferência em malha fechada, que é

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{G_p(s)C(s)}{1 + G_p(s)C(s)}. \quad (2.5)$$

Para as respostas de um sistema de controle devem ser consideradas as seguintes especificações: tempo de subida (t_r), tempo de acomodação (t_s), máximo sobressinal (*overshoot*) (M_p), atraso de transporte (θ) e tempo de pico (t_p). O tempo de subida é o tempo necessário para que a resposta varie de 0% a 100% do valor final. O tempo de acomodação é o tempo que a resposta leva para alcançar valores aproximados do valor de referência. O máximo sobressinal é o valor de pico da curva de resposta. O atraso de transporte é o tempo que a resposta leva para perceber uma variação no sinal de entrada.

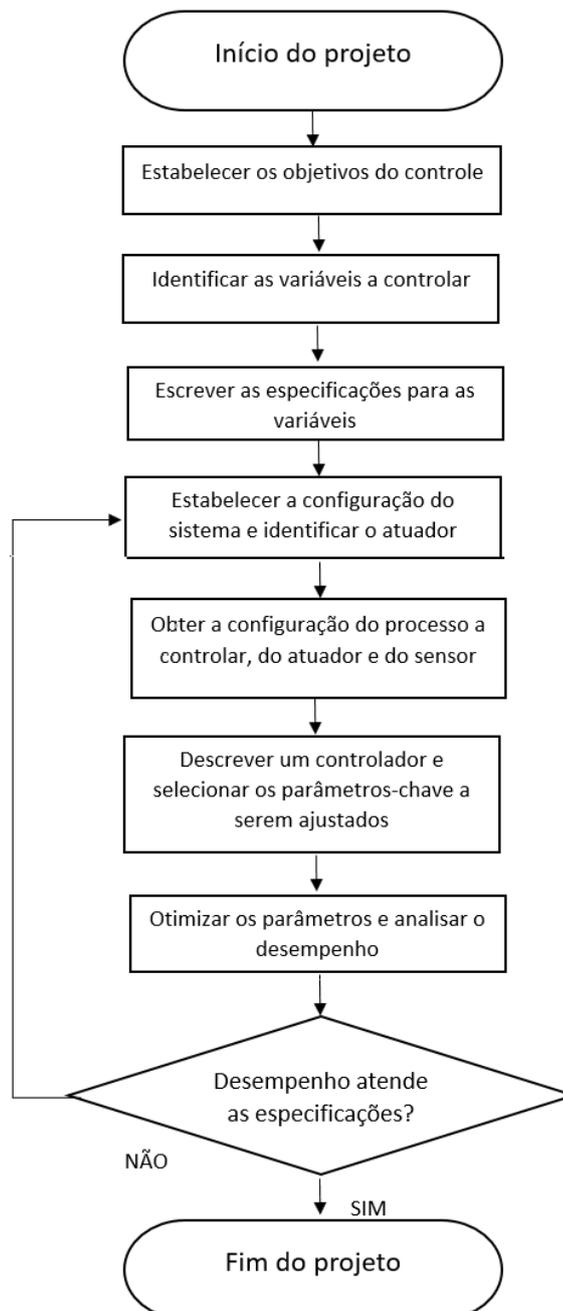
Figura 7 – Resposta temporal - Sistema de controle



Fonte: Elaborado pelo autor

Resumindo, o problema de se projetar um controlador é: definido o modelo a ser controlado e seus objetivos de projeto, obter ou determinar a existência de um controlador adequado. O procedimento de projeto de sistemas de controle segue basicamente o fluxo de processo apresentado no fluxograma da Figura 8 (DORF; BISHOP, 2001, cap. 1 p. 15).

Figura 8 – Fluxograma do processo



Fonte: Adaptado de Dorf e Bishop (2001)

2.4.1 Controlador PID

Alguns dos controles industriais utilizam de estratégias de controle PID ou PID modificadas, em muitos casos são transformados em digitais pela ação de microprocessadores. A utilização dos controladores PID está associada à sua aplicabilidade, abrangendo a maioria dos sistemas de controle (OGATA; YANG, 2010, cap. 10 p. 544).

A ação de controle PID consiste na combinação das ações de controle proporcional, integral e derivativa, possuindo as vantagens das três ações de controle citadas.

A equação de um controlador com a ação PID pode ser expressa por

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.6)$$

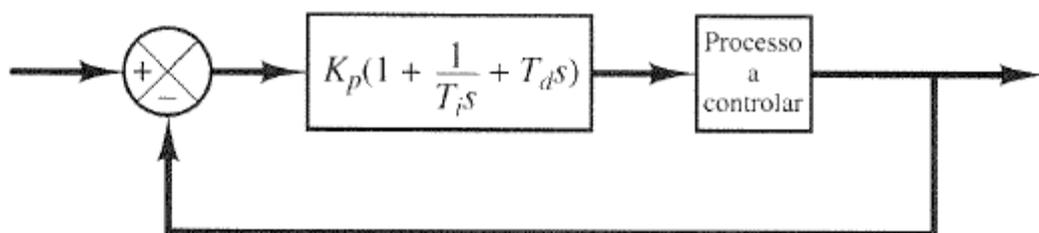
em que $u(t)$ é o sinal de saída do controlador, $e(t)$ é o sinal de entrada do controlador ou erro entre o valor desejado e o valor medido, K_p consiste no ganho proporcional, T_i é o ganho integral e T_d o ganho derivativo.

A equação do controlador pode também ser representada pela função de transferência

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (2.7)$$

A ação de controle proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável. A ação de controle integral é considerada em muito dos casos controle de reestabelecimento, em que o valor de saída é variado segundo uma taxa proporcional ao sinal de erro. A ação de controle derivativa é onde a magnitude da saída do controlador é proporcional à taxa de variação do sinal de erro atuante, já o tempo derivativo consiste no intervalo de tempo pelo qual a ação derivada avança o efeito da ação de controle proporcional. A Figura 9 representa o diagrama em malha fechada com a função de transferência do controlador PID (OGATA; YANG, 2010, cap. 5 p. 181).

Figura 9 – Controle PID de um processo



Fonte: Retirado de Ogata e Yang (2010)

Uma ação de controle muito utilizada consiste da combinação do termo proporcional juntamente com o integral, melhorando a resposta transitória com a ação proporcional e corrigindo o erro de estado estacionário com a ação integral. Utiliza-se a ação PI quando a resposta transitória é aceitável e a resposta em regime insatisfatória. Dentre as vantagens

da ação PI destacam-se a tendência em zerar o erro em regime. Uma desvantagem que pode ser citada está associada ao aumento da possibilidade de instabilidade diferente das apresentadas pelo sistema original (ARAUJO, 2007, cap. 3 p. 21).

Outro ponto relevante que deve ser tratado no projeto de controladores está relacionado à saturação da ação de controle. Os impactos negativos da saturação do controlador são conhecidos como *windup* e as técnicas conhecidas para contorná-lo *anti-windup*. A saturação da ação de controle pode ocasionar desde uma simples degradação no desempenho do sistema até levá-lo à perda de estabilidade (SOARES et al., 2010).

2.4.2 Sintonia de Sistemas de Controle

Após a modelagem matemática de um processo, pode-se realizar a aplicação de técnicas para a determinação dos parâmetros do controlador, visando atender às especificações de regimes transitórios e estacionários do sistema em malha fechada. O procedimento de seleção dos parâmetros do controlador é conhecido como sintonia do controlador (OGATA; YANG, 2010, cap. 10 p. 544).

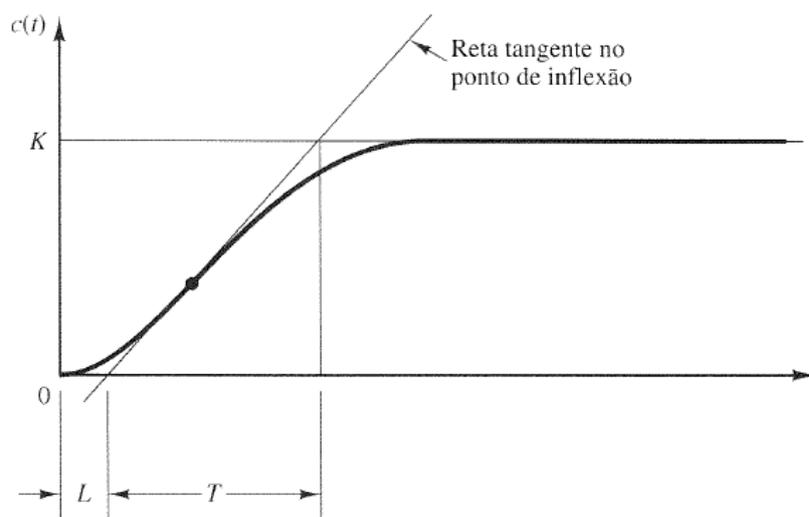
Os controladores PID são amplamente utilizados atualmente, chegando a representar aproximadamente 97% dos controladores utilizados em processos industriais. Os ganhos proporcional, integral e derivativo devem ser devidamente ajustados levando em consideração as exigências e características de cada processo. Ganhos mal ajustados podem ocasionar condições indesejadas, com respostas lentas, maior consumo de energia, menor segurança e instabilidade. A sintonia inadequada leva ao desempenho bem abaixo do ideal. Trabalhos já foram desenvolvidos com o objetivo de realizar um estudo comparativo de algumas técnicas de sintonia de controladores para sistemas de primeira ordem com atraso, sendo analisados a robustez, a capacidade de rejeição de distúrbios e o erro em regime permanente de cada uma das técnicas estudadas, além de análises para avaliação do esforço do controlador para manter o sistema no valor desejado (BATISTA; FERNANDES; MAIA, 2014, cap. 1 p. 1).

Neste trabalho são utilizadas duas técnicas para sintonia de controladores PID válidas para sistemas de primeira ordem com atraso: Ziegler-Nichols e IMC.

2.4.2.1 Ziegler-Nichols (resposta ao degrau unitário)

Ziegler e Nichols elaboraram regras para determinar os valores de ganho proporcional, integral e derivativo baseado em características da resposta transitória de um determinado processo que deseja-se controlar. Abordou-se o método de resposta a um processo com uma excitação em degrau unitário. Nesse método obtém-se experimentalmente a resposta do processo a um excitação em degrau. A resposta pode se assemelhar a uma curva em forma de S, como pode ser visto na Figura 10 (OGATA; YANG, 2010, cap. 10 p. 545).

Figura 10 – Curva S



Fonte: Retirado de Ogata e Yang (2010)

A curva S é caracterizada por duas constantes, tempo de retardo L e constante de tempo T . Ziegler e Nichols sugeriram ajustar os valores de K_p , T_i e T_d seguindo as fórmulas da Tabela 1 (OGATA; YANG, 2010, cap. 10 p. 546).

Tabela 1 – Método de sintonia Ziegler-Nichols

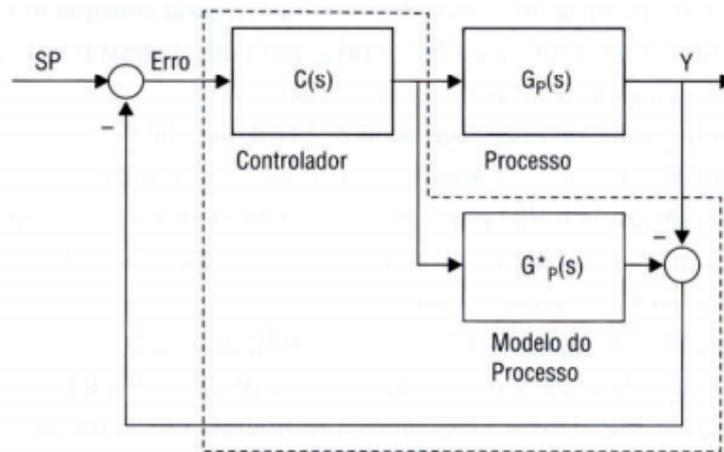
Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2\frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: Retirado de Ogata e Yang (2010, cap. 10 p. 546)

2.4.2.2 IMC

O método de sintonia IMC (do inglês, *Internal Model Control*) tem como finalidade a obtenção do controlador adequado baseado no modelo do processo e de uma especificação de desempenho. Logo, possui um modelo interno do processo utilizado na fase de projeto ou durante a operação (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010, cap.3 p. 60).

Figura 11 – Diagrama de blocos método IMC



Fonte: Retirado de Campos e Teixeira (2010)

O método IMC tem como finalidade a obtenção da sintonia do controlador de maneira que a resposta do sistema possua comportamento conhecido e fornecida como critério de ajuste. Em alguns casos deseja-se que a FT em malha fechada seja de primeira ordem com constante de tempo igual a λ (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010, cap.3 p. 61), que pode ser expressa por

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{1}{\lambda s + 1}, \quad (2.8)$$

em que λ consiste no critério de desempenho do método IMC e define a velocidade com que a resposta alcança o valor de referência. Tal parâmetro deve ser escolhido respeitando a dinâmica do processo. Não deve-se escolher λ menor que o tempo morto, pois ocasionaria uma sintonia muito agressiva (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010, cap.3 p. 61).

Sabe-se que para a função de transferência para a malha fechada é

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{G_p(s)C(s)}{1 + G_p(s)C(s)}. \quad (2.9)$$

Logo, igualando (2.8) e (2.9) temos

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{1}{\lambda s + 1} = \frac{G_p(s)C(s)}{1 + G_p(s)C(s)}. \quad (2.10)$$

Encontrando assim o controlador que satisfaça o critério

$$C(s) = \frac{1}{G_p(s)\lambda s}. \quad (2.11)$$

Existe uma dificuldade para a escolha do melhor controlador PID devido à dinâmica do processo, entretanto, quando devidamente apresentada por um modelo de primeira ordem em série com um tempo morto, sugere-se a sintonia da Tabela 2 (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010, cap.3 p. 62).

Tabela 2 – Método de sintonia IMC

Tipo de Controlador	Kp	Ti	Td
PID	$\frac{2\tau+\theta}{K \times (2\lambda+\theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau\theta}{2\tau+\theta}$
PI	$\frac{2\tau+\theta}{K \times 2\lambda}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	

Fonte: Retirado de Campos e Teixeira (2010)

Para o caso de um sistema de primeira ordem, tem-se

$$G_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1}. \quad (2.12)$$

Substituindo (2.12) em (2.11), tem-se

$$C(s) = \frac{1}{G_p(s) \times \lambda \times s} = \frac{\tau s + 1}{K \times \lambda \times s} = \frac{\tau}{K \times \lambda} \left(1 + \frac{1}{\tau s}\right). \quad (2.13)$$

Onde obteve-se um controlador PI com a seguinte sintonia:

$$K_p = \frac{\tau}{K \times \lambda},$$

$$T_i = \tau,$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i},$$

em que τ é a constante de tempo da função de transferência do sistema, K o ganho do processo em regime permanente e λ é o critério de desempenho do método IMC, responsável pela definição de quão rápido deseja-se que a saída do processo tenha o mesmo valor do *setpoint*.

2.5 Sistemas Embarcados

Um sistema embarcado consiste em um sistema baseado em microprocessador construído com a finalidade de controlar uma função ou intervalo de funções, e não para ser programado pelo usuário final como os computadores de uso geral. O usuário final pode fazer escolhas relacionadas à funcionalidade, mas não pode alterar a funcionalidade

do sistema. Um sistema embarcado tem como função principal executar tarefas específicas (HEATH, 2003, cap. 1 p. 2).

Um sistema embarcado em muitos casos é utilizado como componente dentro de algum sistema maior. Por exemplo, em carros modernos e caminhões controlando freios antitravamento, monitorando e controlando as emissões do veículo, e exibindo informações no painel (BARR; MASSA, 2006, cap. 1, p. 9).

O Arduino é considerado um sistema embarcado constituído por um software e por periféricos acoplados a placa. O Arduino UNO utilizado no desenvolvimento do trabalho utiliza o microcontrolador ATmega328, que é um microcontrolador baseado na arquitetura RISC.

Um microcontrolador é um dispositivo que reúne em um mesmo encapsulamento: microprocessador, memória e periféricos de entrada e saída. Os microcontroladores surgiram em decorrência do aumento da complexidade dos circuitos digitais, como uma evolução destes circuitos (PENIDO, 2013, cap. 1, p. 15). Os microcontroladores possuem capacidade de processamento limitada, mas são utilizados para aplicações específicas.

Internamente um microcontrolador possui diversos periféricos com finalidades específicas, dentre os quais destacam-se: um conjunto de periféricos I/O para controle de dispositivos externos, como recepção de sinais de sensores; uma memória PROM (do inglês, *Programmable Read Only Memory*) em que são gravadas as instruções; conjunto de dispositivos auxiliares como gerador de clock, contadores, etc; uma memória RAM (do inglês, *Random Access Memory*) utilizada para armazenar as variáveis do programa e uma CPU (do inglês, *Central Processor Unit*) que interpreta as instruções do programa (PENIDO, 2013, cap. 1, p. 16). Neste trabalho, dois periféricos serão utilizados: o conversor AD e o modulador PWM.

Segundo o *datasheet* do componente, o conversor AD do microcontrolador ATmega328 apresenta uma resolução de 10 bits com uma frequência de amostragem de 492 Hz. Este módulo está conectado a um multiplexador analógico de 8 canais que possibilita oito entradas de tensão. O conversor realiza a conversão do valor de tensão da entrada analógica em um valor digital de 10 bits através de aproximações sucessivas. Após o processo de conversão, o resultado pode ser expresso por

$$ADC = \frac{V_{in} \times 1023}{V_{ref}}, \quad (2.14)$$

em que V_{in} é a tensão medida no pino de entrada analógica, V_{ref} a tensão de referência e ADC o valor encontrado após a conversão.

O *datasheet* apresenta também um exemplo de conversão realizado pelo conversor AD relacionado a um sensor de temperatura, com o conversor sendo utilizado no modo de conversão única para medir a tensão sobre o sensor de temperatura. A tensão medida tem uma relação linear com a temperatura, a sensibilidade do sensor é de aproximadamente

$1mV/^{\circ}C$. A Tabela 3 representa a relação de temperatura com o valor de tensão medido pelo sensor.

Tabela 3 – Exemplo de conversão AD para sensor de temperatura

Temperatura/ $^{\circ}C$	-45 $^{\circ}C$	30 $^{\circ}C$	65 $^{\circ}C$
Tensão/mV	258mV	330mV	390mV

Fonte: Elaborado pelo autor

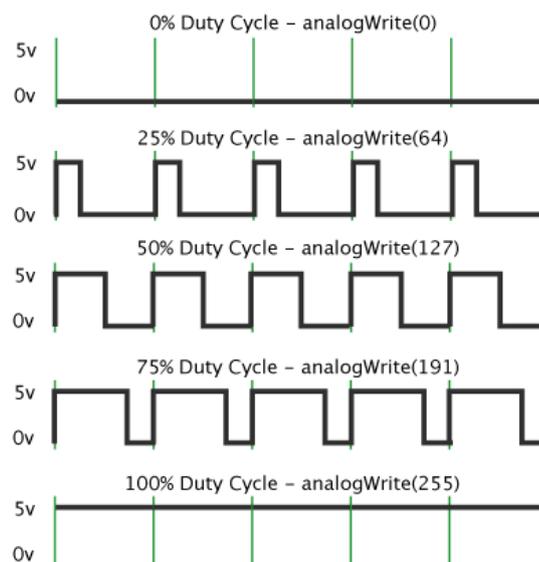
O modulador PWM (do inglês, *Pulse-Width Modulation*) é constituído basicamente por um oscilador de onda retangular, em que é fixada a frequência de repetição do sinal (frequência da portadora) e altera-se o *duty cycle* ou ciclo ativo da onda. O valor médio na saída do PWM pode ser encontrado por (PENIDO, 2013, cap. 4, p. 36)

$$V_s = V_p \times \frac{T_{on}}{T}, \quad (2.15)$$

em que V_s é a tensão de saída, V_p a tensão máxima de saída, T_{on} o tempo que a tensão é igual a tensão máxima e T o período do sinal.

A Figura 12 representa a tensão de saída do ATmega328 junto ao Arduino UNO, considerando uma frequência de PWM em cerca de 500Hz. As linhas em verde estão espaçadas em aproximadamente 2 ms e aparecem devido a limitações no modulador, que não é capaz de gerar sinais com *duty cycle* de 0 e 100%.

Figura 12 – Modulação por largura de pulso



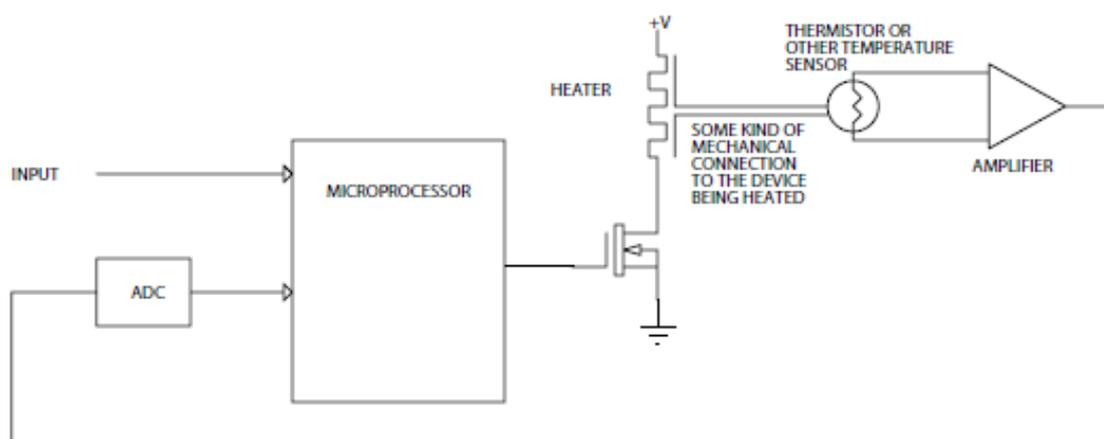
Fonte: Retirado de (Hirzel, 2017)

Analisando o *datasheet* do ATmega328, nota-se que o microcontrolador possui um Timer/Counter0 que basicamente consiste em um módulo Temporizador/Contador de 8 bits, que possui duas unidades de comparação de saída independentes com suporte a ação

de PWM, permitindo uma precisa execução do programa e geração de ondas. A frequência padrão do ATmega328 no Arduino UNO é de aproximadamente 490 Hz.

Na Figura 13 tem-se um diagrama típico da utilização de um sistema embarcado na ação de controle de temperatura, consistindo em um sistema de controle em que um microprocessador liga e desliga um aquecedor através de um transistor MOSFET. O termistor realiza a medição do valor de temperatura, o microprocessador lê o valor de temperatura e a partir desse valor liga ou desliga o aquecedor visando manter o valor da temperatura igual ao valor de *setpoint* (BALL, 2004, cap. 5 p. 109).

Figura 13 – Sistema de controle utilizando microprocessador



Fonte: Retirado de Ball (2004)

2.6 Sensor de Temperatura

A temperatura é uma das características monitoradas em aplicações industriais, devido a variedade de processos que dependem desse parâmetro (BALL, 2004, cap. 3 p. 47).

Uma das formas de realizar a medição da temperatura é através de sensores termoresistivos. Os termistores são tipos de sensores cuja resistência de saída varia em função da temperatura. Essa variação pode ser positiva, onde a resistência aumenta com a temperatura, ou negativa, em que a resistência diminui com a temperatura. A maioria dos termistores tem um coeficiente de temperatura negativo (NTC, do inglês, *negative temperature coefficient*), o que significa que a resistência diminui à medida em que a temperatura aumenta. De todos os sensores passivos de medição de temperatura, os termistores tem a sensibilidade mais alta, entretanto, são sensores que não possuem uma curva linear de temperatura/resistência. As características do termistor dependem do processo de fabricação e materiais utilizados. Muitas vezes, muitos termistores de uma família têm características semelhantes e curvas idênticas (BALL, 2004, cap. 3 p. 47).

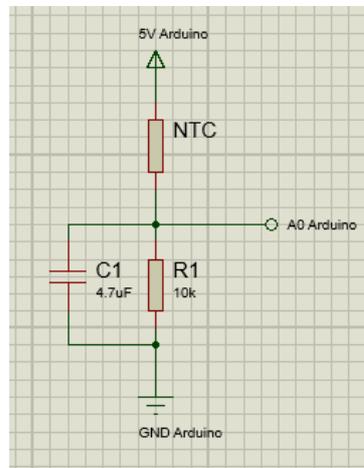
Conforme já mencionado, a curva de temperatura x resistência do sensor NTC utilizado não é linear e pode ser estimada com auxílio de

$$T_{Kelvin} = \frac{1}{A + B \ln(R_{NTC}) + C [\ln(R_{NTC})]^3}, \quad (2.16)$$

em que T_{Kelvin} é a temperatura em Kelvin, R_{NTC} a resistência do sensor NTC, e A, B e C são os coeficientes de Steinhart–Hart.

Para gerar a curva de temperatura x resistência foi necessária análise do circuito referente ao sensor NTC, que pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Circuito ligação sensor NTC



Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando a utilização de um circuito divisor resistivo, como o apresentado na Figura 14, o valor da tensão de saída do sensor pode ser determinado por

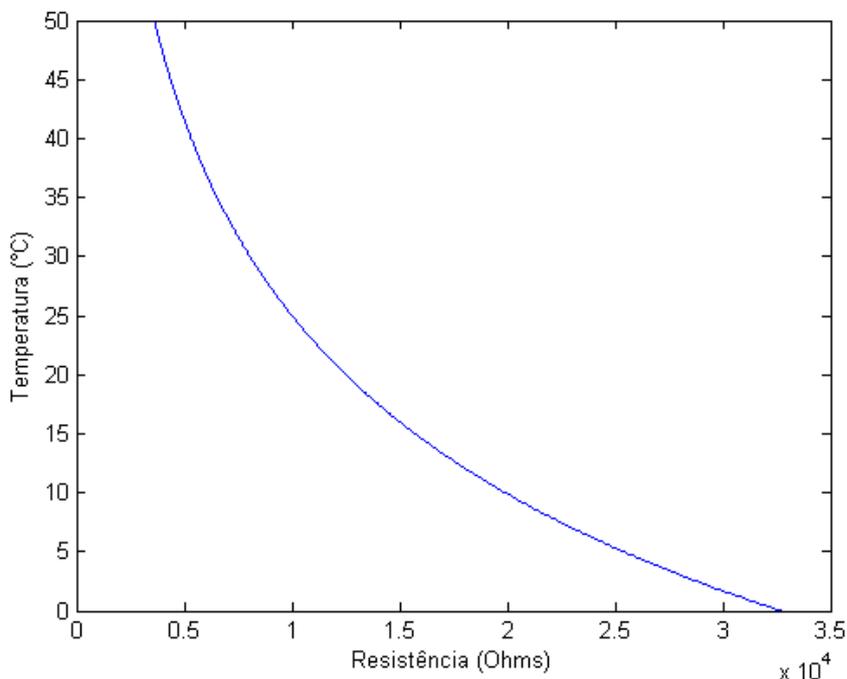
$$V_{AD} = V_{max} \times \frac{10k}{10k + R_{NTC}}, \quad (2.17)$$

em que a tensão V_{AD} refere-se a tensão medida pelo microcontrolador, a tensão V_{max} é a tensão de referência do conversor AD do micro e R_{NTC} é a resistência do termistor. Para um conversor AD de 10bits com tensão V_{max} igual a 5V, a resolução em tensão é de aproximadamente 4,88mV. Logo, os possíveis valores de resistência do sensor podem ser expressos por

$$R_{NTC} = \frac{50k}{V_{AD}} - 10k. \quad (2.18)$$

Com os valores de resistência do termistor e utilizando (2.16) pode-se calcular o valor da temperatura medida, como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Curva do sensor NTC Resistência x Temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor

2.7 Metrologia

Define-se metrologia como a ciência que engloba aspectos teóricos e práticos relacionados as medições, tendo como objetivo principal a determinação do valor do mensurando (GUM, 2008, definição 3.1.1).

De acordo com (GUM, 2008, definição 3.1.2):

Em geral, o resultado de uma medição é somente uma aproximação ou estimativa do valor do mensurando e, assim, só é completo quando acompanhado pela declaração da incerteza dessa estimativa.

A seguir são relatadas as definições e considerações a respeito da incerteza na medição, de grande relevância para as análises quanto ao sistema de medição desenvolvido no trabalho.

2.7.1 Incerteza

De acordo com (GUM, 2008, definição 2.2.1), o termo incerteza pode ser definido da seguinte forma:

A palavra “incerteza” significa dúvida, e assim, no sentido mais amplo, “incerteza de medição” significa dúvida acerca da validade do resultado de uma medição. Devido à falta de palavras diferentes para este conceito geral de incerteza, e para as grandezas específicas que proporcionam medidas quantitativas do conceito, como, por exemplo, o desvio-padrão, é necessário utilizar a palavra “incerteza” nestas duas acepções diferentes.

A falta do conhecimento exato do valor do mensurando é consequente da incerteza do resultado. O valor resultante de uma medição, após correção dos possíveis efeitos que possam estar influenciando na medição, é uma estimativa do valor do mensurando proveniente da incerteza dos efeitos aleatórios e para efeitos sistemáticos da correção imperfeita dos resultados (GUM, 2008, definição 3.3.1). Existem diversas fontes de incerteza em medições, dentre elas pode-se citar: definição incompleta do mensurando, amostragem não representativa, imperfeição na definição do mensurando, erro na leitura dos instrumentos analógicos, resolução inadequada do instrumento de medição, dentre outros fatores que possam interferir de forma significativa no processo de medição (GUM, 2008, definição 3.3.2).

A avaliação do Tipo A pode auxiliar na obtenção da incerteza de uma correção de um efeito sistemático. Na avaliação do Tipo A, a melhor estimativa do valor u_q (de uma grandeza q que varia aleatoriamente, e para a qual foram obtidas sob as mesmas condições de medição n observações independentes q_k) é a média aritmética ou média q das n observações, conforme apresentado por (GUM, 2008, definição 4.2.1)

$$q = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k. \quad (2.19)$$

As observações q_k são diferentes devido a variações aleatórias nas grandezas de influência. A variância experimental, pode ser expressa por (GUM, 2008, definição 4.2.2)

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - q')^2. \quad (2.20)$$

O desvio-padrão $s(q_k)$ caracteriza a variabilidade ou dispersão dos valores q_k em torno de sua média q' (GUM, 2008, definição 4.2.2). A melhor estimativa da variância da média, $s^2(q') = s^2/n$, é obtida por

$$s^2(q') = \frac{s^2(q_k)}{n}. \quad (2.21)$$

A variância experimental e desvio-padrão experimental da média avaliam a qualidade com que o valor medido estima o valor do mensurando, e podem ser usados como medida da incerteza de q' (GUM, 2008, definição 4.2.3).

Logo, para uma grandeza de entrada X_i determinada por n observações repetidas e independentes $X_{i,k}$, a incerteza-padrão $u(x_i)$ de sua estimativa $x_i = X'i$ é $u(x_i) = s(X'i)$, com $s^2(X'i)$ calculada a partir de (2.21) (GUM, 2008, definição 4.2.3).

Comentários

O capítulo 2 apresentou os assuntos mais relevantes no desenvolvimento do trabalho. Desde técnicas de controle e modelagem matemática de sistemas físicos, análise e comparação de sistemas embarcados à especificações de instrumentos de medição. Além de apresentar aplicações para o banho termostático, aplicações essas voltadas principalmente para a medição via sensores ultrassônicos.

3 Metodologia

Para desenvolvimento do banho termostático, o projeto foi fragmentado em etapas definidas de maneira estratégica visando a organização e eficiência no planejamento das atividades. As atividades seguem o modelo de planejamento em cascata, ou seja, para que um estágio das atividades seja inicializado, o estágio anterior deve estar finalizado e validado.

3.1 Etapas do projeto

O escopo do projeto é constituído pelas seguintes atividades: a princípio definiu-se o objetivo principal do trabalho, bem como o tipo de tecnologia e infraestrutura necessária para o desenvolvimento das atividades, posteriormente realizaram-se ensaios para modelagem matemática do sistema térmico em questão. Após a validação do modelo matemático definiram-se os parâmetros do controlador PI utilizando dois métodos de sintonia distintos. Após a definição dos parâmetros dos controladores, realizaram-se ensaios para definir o melhor método para a atividade em questão e, por fim, configurada uma interface gráfica para atuar como supervisor para o sistema de controle.

3.1.1 Definição de objetivo e tecnologia para realização do projeto

Optou-se pela utilização de um tanque com capacidade para 8,8L de água natural, cuja temperatura deverá ser controlada. O sistema de controle e acionamento é composto por um sistema embarcado que fica encarregado de realizar a ação de controle de temperatura pela atuação direta de um circuito de acionamento, que controlará a potência entregue a resistência elétrica de aquecimento.

No sistema embarcado a coleta de dados de temperatura será realizada utilizando um sensor de temperatura NTC. Os sinais elétricos serão adquiridos através de um conversor AD, e os dados serão processados por um microcontrolador, que ficará responsável por comparar o valor de temperatura medido com o valor de *setpoint* requerido, ajustando o valor da variável de saída, *duty cycle*, até que o valor de temperatura do líquido e o valor de *setpoint* atendam a condição de estabilidade. O componente que realizará a função de atuador no sistema será uma resistência de aquecimento, com potência máxima de 100W, e o controle da potência entregue a resistência é realizado pelo modulador PWM disponível no microcontrolador ATmega328. A potência entregue ao aquecedor será controlada através do chaveamento de um transistor MOSFET, alimentado por uma fonte de tensão CC responsável pelo fornecimento de potência ao aquecedor.

3.1.2 Modelagem matemática do sistema

A modelagem matemática do sistema foi feita considerando um sistema de primeira ordem, com o intuito de obter-se uma função de transferência que descreva o comportamento do sistema térmico em questão. A estratégia de modelagem escolhida é constituída pela modelagem caixa-preta, baseada em procedimentos experimentais.

Para a realização do processo de identificação de sistema, foram realizados três ensaios experimentais seguindo as mesmas condições iniciais, que baseiam-se em: *duty cycle* igual a 100%, nível de líquido no tanque igual a 5L, tempo de simulação igual a 300 minutos (5 Horas), potência dissipada pela resistência de aquecimento de aproximadamente 100W, posição do sensor de temperatura fixa e temperatura inicial do líquido em torno de 22°C. A realização dos três ensaios é realizada com o a finalidade de minimizar os erros experimentais que possam ter ocorrido ao longo dos procedimentos.

Após a realização dos três procedimentos experimentais foram gerados gráficos das curvas de resposta do sistema e, com auxílio delas, realizou-se a análise e extração da FT de primeira ordem de cada experimento. A obtenção da FT foi realizada de maneira teórica e com auxílio de software dedicado à título de comparação.

Realizada a validação das técnicas para obtenção da FT, realizou-se a média aritmética dos valores de ganho K e constante de tempo τ entre as três funções encontradas, visando a obtenção da FT média. O próximo passo constitui-se da validação do sistema com a comparação entre as respostas dos três ensaios experimentais com a simulação da aplicação de degrau de potência máximo na FT média calculada.

3.1.3 Sintonia do controlador e análise de desempenho do sistema de controle

Foram realizados os cálculos para obtenção dos parâmetros de um controlador PI. Escolheu-se dois métodos de sintonia: IMC e Ziegler-Nichols. Após a realização dos cálculos manualmente, realizou-se a sintonia dos parâmetros do controlador com auxílio do MATLAB, novamente à título de comparação.

Após o projeto do controlador, iniciou-se a fase de ensaios de validação com valores de *setpoint* iguais a 27°C e 30°C. Optou-se por utilizar valores de temperatura superiores aos da temperatura ambiente (de aproximadamente 25°C). A análise levou em consideração os seguintes parâmetros: tempo de pico (t_p), tempo de acomodação (t_s), tempo de subida (t_r), atraso de transporte (θ) e máximo sobressinal (M_p). Dentre as especificações citadas, as consideradas fundamentais para escolha do melhor método de sintonia foram tempo de acomodação (t_s) e máximo sobressinal (M_p).

As especificações para escolha do melhor método de sintonia basearam-se em:

- Tempo de acomodação para *setpoint* de 27°C: 30 minutos;
- Tempo de acomodação para *setpoint* de 30°C: 50 minutos;
- Margem em torno do *setpoint* para atender a condição de estabilidade: $\pm 0,2^\circ\text{C}$;
- *Overshooting* máximo para ambos *setpoints*: 2%.

A escolha do *setpoint* é justificada pela ideia principal do trabalho estar voltada para controle de temperatura para medidas com ultrassom. Nesses casos o valor de temperatura não pode ultrapassar 50°C, pois os transdutores ultrassônicos possuem limitações e tendem a se deteriorar quando submetidos a temperaturas acima desse limite.

3.1.4 Interface gráfica

Ao final, uma interface gráfica foi desenvolvida, com o intuito de simplificar a interação do usuário com o sistema, além de melhorar a visualização dos resultados e facilidade de interação com o processo. O supervisor possibilita a visualização do comportamento do valor da temperatura com o decorrer da ação de controle, além de possibilitar que o operador ligue e desligue o sistema e escolha o valor de *setpoint* desejado.

3.2 Componentes utilizados

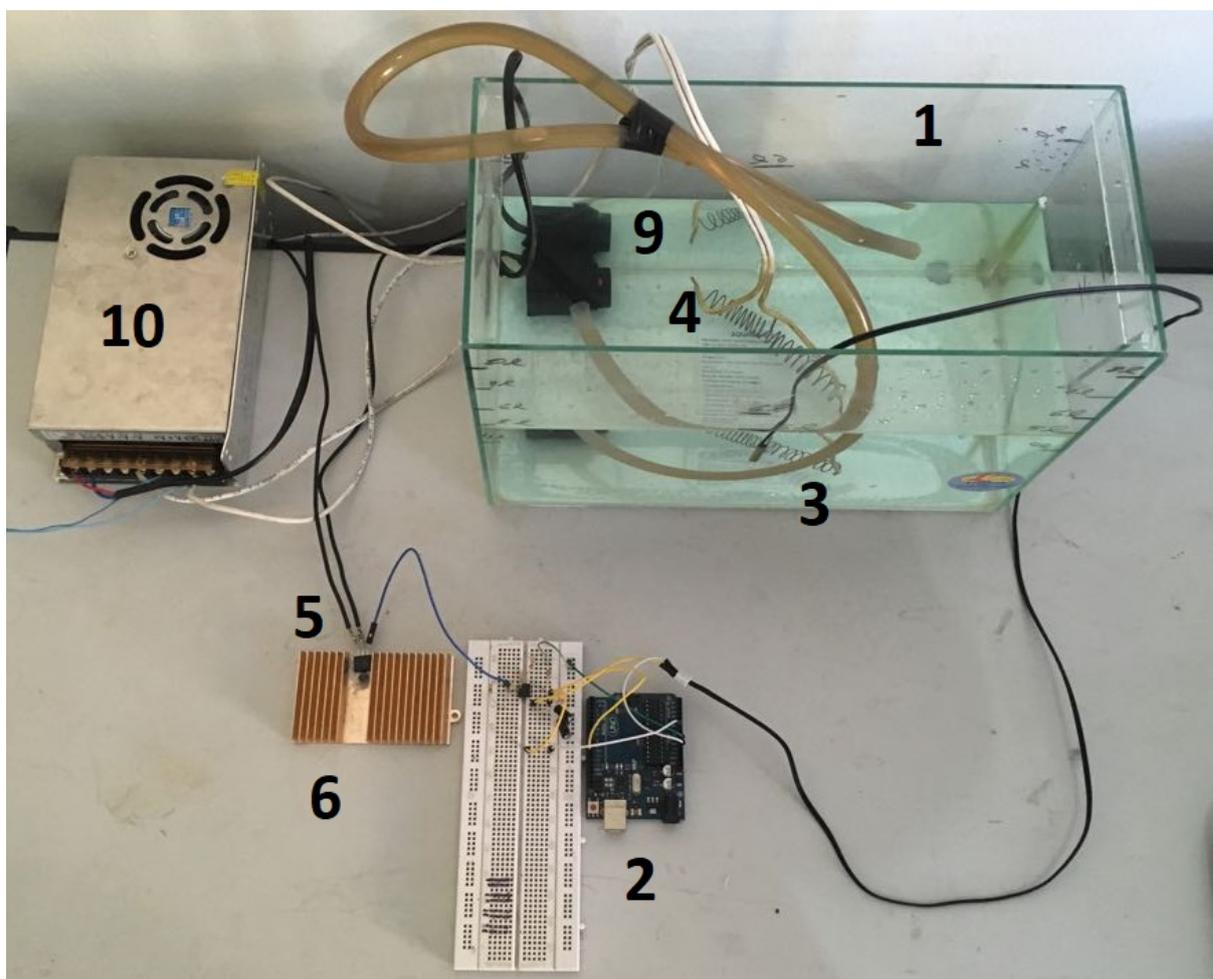
Sobre os componentes utilizados para montagem do protótipo, existem dados relevantes que devem ser abordados nesta seção. Com relação ao sistema embarcado utilizou-se o Arduino UNO devido à simplicidade de aplicação e baixo custo. A frequência de chaveamento utilizada pelo modulador PWM é de 488,28Hz com 8 bits de resolução. Dessa forma, para uma tensão de saída máxima do PWM de 5V a resolução em volts na saída do PWM é igual a 19,66mV. Já o conversor AD utilizado possui 10 bits, utiliza uma tensão de referência de 5V e apresenta uma resolução em tensão de aproximadamente 4,88mV.

Para o controle de potência entregue a resistência de aquecimento, utilizou-se o Mosfet IRFZ46N para a realização do chaveamento e controle da tensão média aplicada no aquecedor. A alimentação do circuito foi realizada através de uma fonte de tensão de 12V, 30A.

3.3 Simulações

Antecedendo a montagem do tanque e energização do circuito na rede de energia, realizou-se a simulação do circuito para teste do projeto e código desenvolvido para o

Figura 17 – Montagem do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

4 Resultados e Discussão

Antecedendo as análises para prosseguimento do processo, foram realizados testes no sistema eletrônico. Dentre os testes realizados pode-se citar o teste de incerteza e sensibilidade do sensor de temperatura, e o teste para medição do gradiente de temperatura no tanque.

Com relação ao teste do sistema de medição é de grande importância citar a necessidade da inserção do capacitor de acoplamento no circuito, evitando a propagação de ruídos da fonte de tensão.

A fim de estimar os valores de resolução e sensibilidade do sensor de temperatura, utilizou-se (2.17) para traçar um gráfico de tensão x temperatura. Limitando o gráfico para uma faixa de temperatura entre 20°C e 45°C, conforme pode ser visto na Figura 19, nota-se que é possível aproximar o comportamento da curva utilizando uma função de primeiro grau.

A equação da reta encontrada pode ser representada por

$$T(V) = 19,66V - 23,91. \quad (4.1)$$

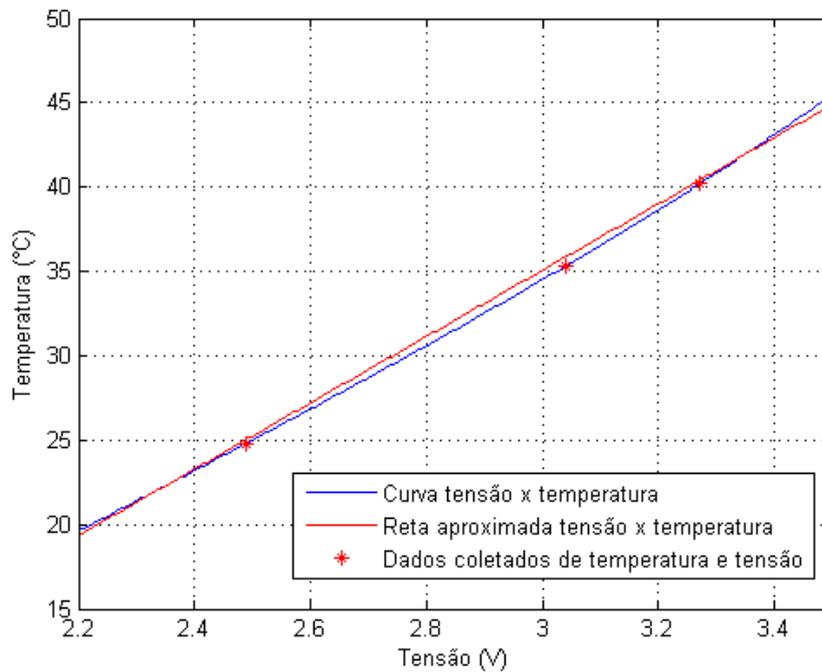
A sensibilidade do sensor pode ser obtida a partir do coeficiente angular da reta, que neste caso é igual a 19,66 °C/V. Sabe-se que a resolução do conversor AD utilizado é de 5V/1023 ou 4,88mV, logo, a resolução do sensor de temperatura é de aproximadamente 0,095 °C.

Os pontos representados pelo * no gráfico da Figura 18 são referentes a coleta de três valores de tensão e conseqüentemente do seu respectivo valor de temperatura indicado pelo sensor. Nota-se que os três valores de temperatura medidos encontram-se próximos da curva levantada pelo sensor e da reta utilizada para obtenção da sensibilidade do sensor.

De posse da resolução do sensor em °C, verificou-se a variação mínima de temperatura que estava sendo coletada pelo sensor, para um valor fixo de temperatura igual a 30°C, como pode ser visto na Figura 19. Nota-se que a variação de temperatura mínima está dentro dos limites indicados pela linhas tracejadas no gráfico.

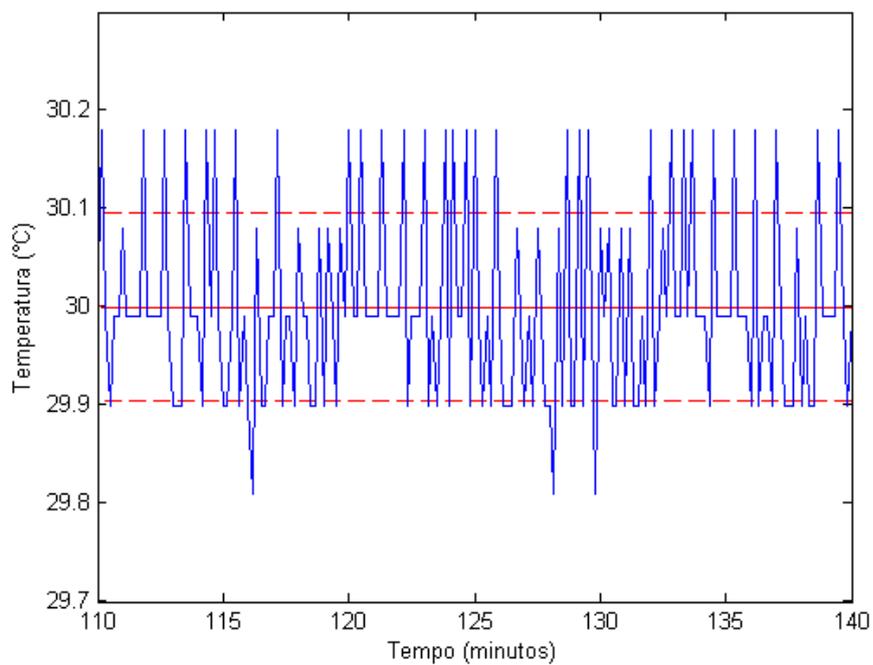
Outro teste realizado está relacionado ao cálculo da incerteza do sensor de temperatura. Para isso, foram utilizadas as equações referentes a avaliação de incerteza do Tipo A (capítulo 2, seção 2.7.1).

Figura 18 – Relação de tensão x temperatura do sensor NTC



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – Teste de resolução do sensor



Fonte: Elaborado pelo autor

Para isso, foram medidos os valores de temperatura em ambiente de temperatura controlada (no caso dentro de caixa térmica de isopor), com temperatura ajustada em 23°C. Foram realizadas 120 aquisições de dados de temperatura medidos a cada 10 segundos,

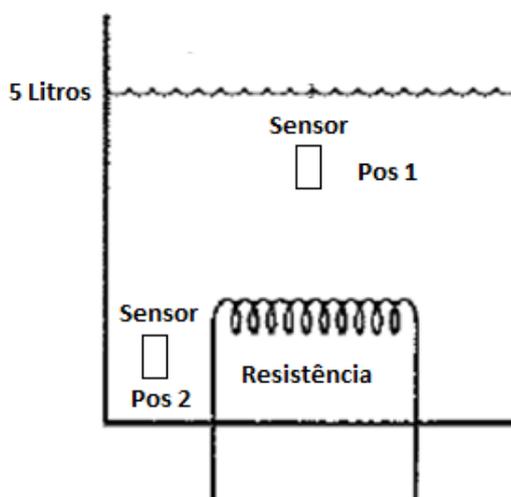
com valor máximo igual a $23,49^{\circ}\text{C}$ e mínimo de $23,05^{\circ}\text{C}$. A média calculada por (2.7) é igual a $23,29^{\circ}\text{C}$, a variância experimental das observações, utilizando a equação (2.8), é igual a $0,0248^{\circ}\text{C}$. O desvio-padrão experimental $s(q_k)$ é de $0,1573^{\circ}\text{C}$.

Considerando a melhor estimativa para a variância da média (2.9), calculou-se o valor de $2,0626 \times 10^{-4}^{\circ}\text{C}$ para a variância da média e para o desvio-padrão experimental da média calculou-se o valor de $0,0144^{\circ}\text{C}$. Logo, a incerteza-padrão do Tipo A para o sensor NTC utilizado no desenvolvimento do trabalho é de $0,0144^{\circ}\text{C}$.

Após a caracterização do sensor de temperatura, realizaram-se testes para avaliar os efeitos da utilização de um misturador dentro do tanque com água. Em sistemas comerciais, misturadores são frequentemente utilizados com o intuito de reduzir os valores dos gradientes de temperatura dentro do tanque.

Escolheram-se dois pontos específicos para determinação da diferença de temperatura no interior do tanque, antes e após a utilização do misturador. A disposição dos sensores no tanque pode ser vista na Figura 20.

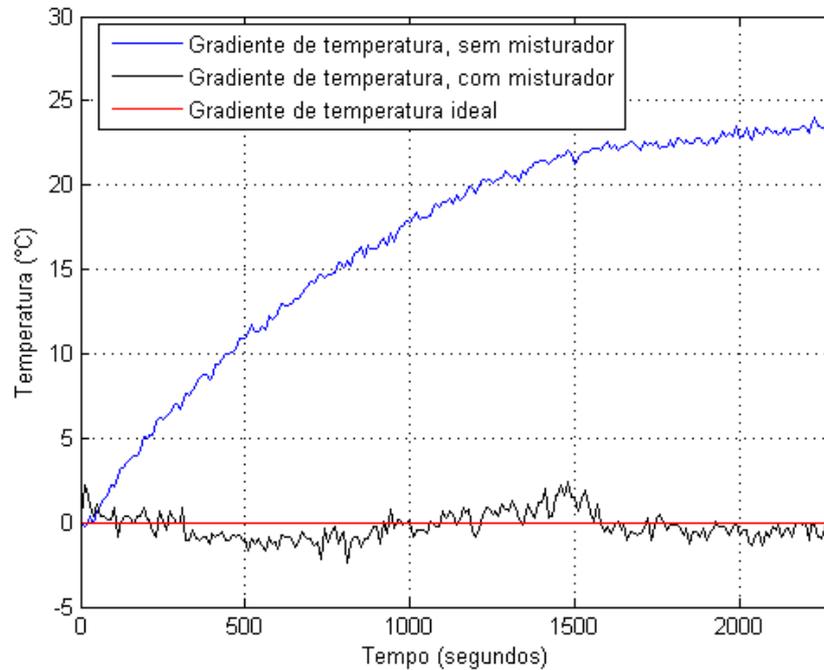
Figura 20 – Posição dos sensores para teste



Fonte: Elaborado pelo autor

Realizaram-se quatro ensaios, o primeiro sem a utilização do misturador com o sensor na posição 1 e o segundo com o sensor na posição 2, para os outros dois ensaios o misturador foi utilizado, com o sensor na posição 1 para o terceiro experimento e na posição 2 para o quarto ensaio. A diferença de temperatura entre a posição 1 e 2 do sensor podem ser vistas na Figura 21. Nota-se que com a utilização do misturador a temperatura da água adquire características mais homogêneas, possibilitando a suposição de que a temperatura coletada pelo sensor na posição 1 representa a temperatura do líquido no tanque.

Figura 21 – Gradiente de temperatura no tanque



Fonte: Elaborado pelo autor

Posteriormente, calculou-se a potência máxima entregue as resistências elétricas, que pode ser calculada pela expressão

$$P = \frac{D \times V_f^2}{R}, \quad (4.2)$$

em que P é a potência fornecida a resistência elétrica em Watts, D é o *duty cycle* em %, V_f a tensão da fonte em Volts e R é o valor ôhmico da resistência em Ohms.

Com a utilização de (4.2) foi possível calcular os valores de potência aplicados na resistência. Nota-se que a relação de *duty cycle* pela potência fornecida às resistências obedece uma relação linear, já que o valor de V_f é constante. Logo, para um valor de *duty cycle* de 100% o valor de potência entregue a resistência é máxima.

Para obtenção da potência máxima fornecida pela resistência, mediu-se o valor ôhmico da resistência elétrica e a tensão da fonte. Com auxílio de (4.2), encontrou-se o valor máximo de potência fornecida pela resistência elétrica.

$$P_{MAX} = \frac{1 \times 12,3^2}{1,5} = 100W, \quad (4.3)$$

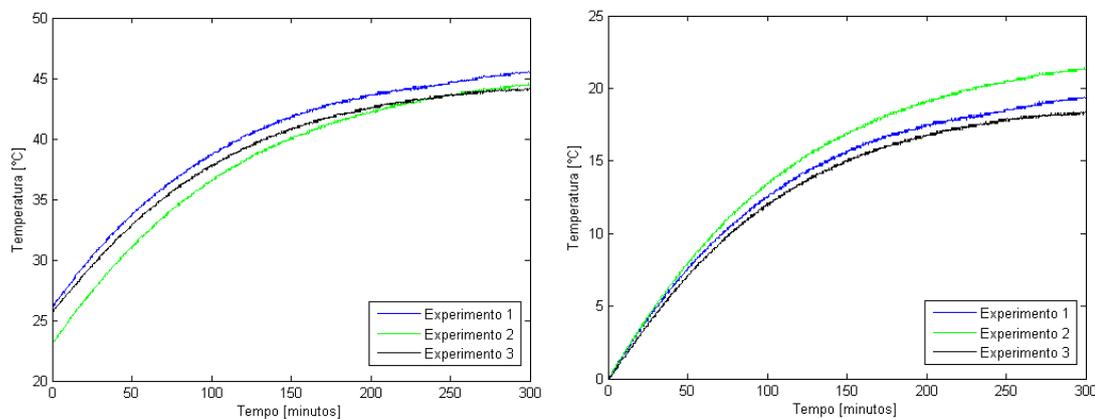
considerando D igual a 100%, R igual a $1,5 \Omega$ e V_f $12,3V$.

Após a realização dos procedimentos citados anteriormente nesta seção, iniciaram-se os ensaios para identificação da função de transferência do sistema. Na primeira bateria de testes realizaram-se três ensaios, em que aplicou-se degrau de potência máximo na resistência elétrica, com volume de líquido constante no tanque igual a 5L.

A Figura 22 representa os três testes realizados para levantamento da função de transferência, representando testes com valores medidos e com os valores após a subtração do valor de temperatura inicial, visando encontrar assim o ganho de temperatura obtido em cada experimento.

Nota-se que os valores de temperatura na estabilização das curvas são aproximados, mesmo com diferença no valor de temperatura inicial. Pode-se observar também que para um valor de temperatura inicial inferior o ganho de temperatura é maior, já que o valor de temperatura na estabilização é aproximado.

Figura 22 – Curva de temperatura dos experimentos realizados para modelagem do sistema - Em azul, a curva referente ao experimento 1, em verde, a curva referente ao experimento 2 e em preto a curva referente ao experimento 3



Fonte: Elaborado pelo autor

Para obtenção dos valores do ganho K e da constante de tempo τ , encontrou-se os valores de maneira manual. Pelo gráfico da Figura 22b observou-se que o ganho de temperatura do sistema é de aproximadamente 20°C , sendo assim, os valores de temperatura na condição de estabilização foram divididos pelo *duty cycle* aplicado na resistência elétrica, neste caso igual a 100%, obtendo os valores de ganho para cada experimento. Para obtenção do valor de τ , multiplicou-se os valores de ganho por 0,632, e então analisando no gráfico obteve-se o tempo necessário para que a temperatura do líquido tenha alcançado 63,2% do valor de temperatura de estabilização.

Posteriormente, com o auxílio do recurso denominado *pidtool* no software MATLAB, foram encontrados os respectivos valores de τ e K dos três experimentos em questão. Como os valores encontrados com a abordagem teórica e com o auxílio do *pidtool* apresentaram valores aproximados, levou-se em consideração para o prosseguimento do trabalho os valores encontrados pelo *pidtool*, estimando assim as funções de transferência para cada experimento.

Para o valor de *duty cycle* igual a 100%, temos:

- Experimento 1

$$H(s) = \frac{0,2}{104s + 1}. \quad (4.4)$$

- Experimento 2

$$H(s) = \frac{0,23}{113s + 1}. \quad (4.5)$$

- Experimento 3

$$H(s) = \frac{0,2}{103s + 1}. \quad (4.6)$$

De posse da função de transferência de cada experimento, realizou-se a média aritmética do ganho K e da constante de tempo τ encontrada para cada experimento, com o intuito de obter uma função de transferência que descreva o sistema em questão. O resultado dessa média é

$$H(s) = \frac{0,21}{107s + 1}. \quad (4.7)$$

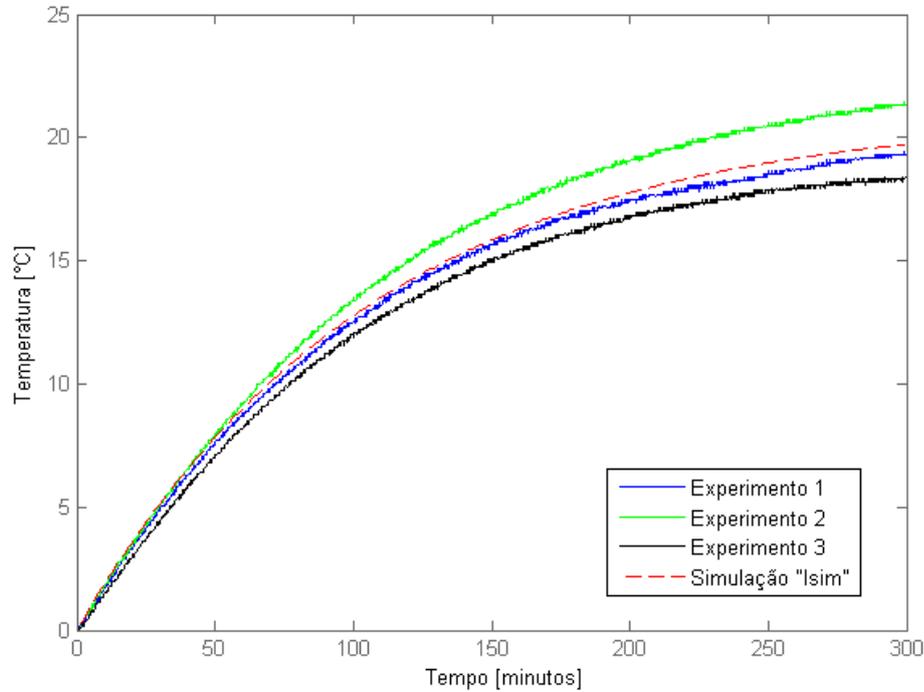
Para validar a equação obtida foi gerado um novo gráfico com auxílio da função *lsim* do software MATLAB, possibilitando a simulação da aplicação de degrau de potência máximo na função de transferência média, juntamente com os valores obtidos nos três ensaios realizados.

Nota-se pela Figura 23 que a diferença de temperatura máxima entre a curva da FT média e as curvas dos procedimentos experimentais não ultrapassa o valor de 2°C (variação correspondente a diferença dos valores iniciais de temperatura), logo, apresentam comportamento similar.

Após a obtenção da função de transferência que descreve o sistema, tornou-se possível a implementação das técnicas de sintonia para definição dos parâmetros do controlador. Optou-se pelo controlador PI, já que o tempo de atraso na resposta do sistema é pequeno, aproximadamente 1 minuto e 50 segundos (valor encontrado após análise do gráfico no MATLAB com o aumento da imagem gráfica no início da curva), justificando a escolha do controlador PI em detrimento ao PID.

Os cálculos quanto aos parâmetros do controlador à serem implementados foram realizados de forma manual e posteriormente com auxílio do MATLAB para fins de comparação. Com relação aos cálculos realizados manualmente, deu-se início pelo método de sintonia de Ziegler-Nichols, em que com auxílio das equações da Tabela 1 obteve-se os parâmetros K_p e K_i considerando T igual a 90 minutos e L igual a 1 minuto e 48 segundos, logo

Figura 23 – Validação do sistema - Em azul, a curva referente ao experimento 1, em verde, a curva referente ao experimento 2, em preto, a curva referente ao experimento 3 e em vermelho a curva referente a simulação utilizando a função *lsim*



Fonte: Elaborado pelo autor

$$K_p = 0,9 \times \frac{90}{1,8} = 45,$$

$$K_i = \frac{1,8}{0,3} = 6.$$

Para o método IMC realizou-se os cálculos de acordo com as equações presentes na Tabela 2, em que o valor de λ escolhido é igual a 20 devido ao objetivo de encontrar-se um controlador que atenda a condição de estabilidade com relação ao tempo de estabilização para ambos valores de *setpoint*, logo

$$K_p = \frac{107}{0,21 \times 20} = 25,47,$$

$$K_i = \frac{25,47}{107} = 0,238.$$

Com auxílio da ferramenta *sisotool* do software MATLAB, os parâmetros do controlador apresentaram resultados similares com relação aos ganhos K_p e K_i encontrados manualmente, para o método de Ziegler-Nichols $K_p=42,9$ e $K_i=2,25$; e também para o método IMC $K_p=24,3$ e $K_i=0,228$.

Para realização dos ensaios referentes a escolha do melhor método de sintonia, optou-se pela utilização dos parâmetros obtidos via MATLAB.

A Tabela 4 representa os ganhos K_p e K_i encontrados com auxílio do software e os métodos de sintonia escolhidos para tal representação. É relevante salientar que foram realizados ensaios para dois valores de *setpoint*, 27°C e 30°C, respectivamente.

Tabela 4 – Valores de K_p e K_i encontrados com auxílio do *sisotool*

Método	K_p	K_i
IMC	24,3	0,228
Ziegler-Nichols	42,9	2,25

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a realização do primeiro ensaio para teste dos controladores, notou-se que o sistema comportava-se de maneira inadequada devido a falta de condicionamento da ação integradora. Para contornar tal problema realizou-se um ajuste no código implementado no microcontrolador para que não seja incrementado na ação integradora nos momentos em que o valor de erro assume valores negativos, ou seja, nos momentos em que o valor de temperatura medido pelo sensor é maior que o valor de *setpoint*. Após o condicionamento, observou-se que a resposta do sistema tanto para os valores de temperatura quanto para os valores de *duty cycle* apresentaram resultados mais próximos do esperado, como pode ser visto na Figura 24.

O condicionamento realiza a ação de *antiwind-up* do integrador, com a função de impedir que o integrador continue sendo incrementado após a saturação. Caso não seja realizada tal ação, a resposta transitória do sistema tende a ficar lenta e oscilatória.

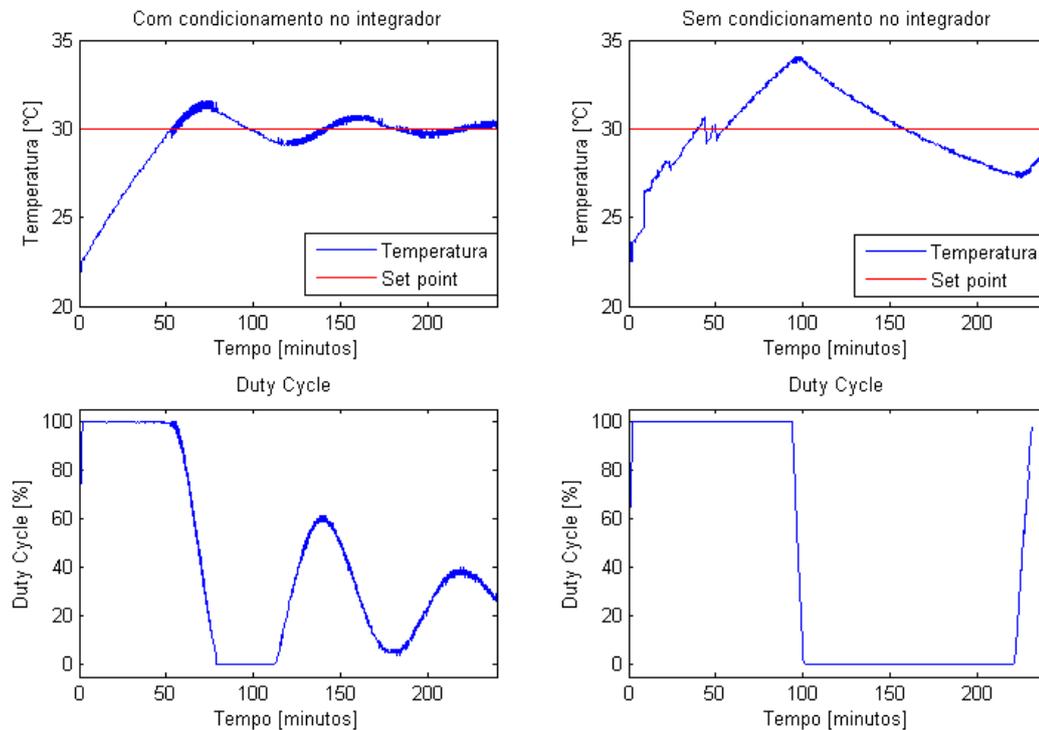
Após os testes e ajustes realizados anteriormente, foram gerados os gráficos referentes aos experimentos realizados para conhecimento de qual método de sintonia adequa-se melhor ao sistema.

Os principais parâmetros a serem analisados referem-se ao tempo de acomodação (t_s) e ao máximo sobressinal (M_p). O tempo de pico (t_p) varia de acordo com a temperatura inicial e será analisado, entretanto, não será de tanta relevância na escolha do melhor método de sintonia.

Não analisou-se o tempo de subida (t_r) por variar de acordo com o valor de temperatura inicial, não sendo um parâmetro confiável pelo fato dos experimentos apresentarem valores de temperaturas iniciais diferentes e também por condições externas (temperatura ambiente por exemplo) poderem interferir na velocidade do ganho de temperatura do líquido. O atraso de transporte (t_d) não é considerado por ser muito pequeno.

Relembrando que para atingir a condição de estabilidade, admitiu-se uma variação de 0,2°C com relação aos dois *setpoints* escolhidos, e tempo de acomodação (t_s) próximo de 30 minutos para o *setpoint* de 27°C e 50 minutos para o de 30°C, tempo de acomodação escolhido levando em consideração a margem em torno do *setpoint* de 0,2°C. Para o máximo sobressinal (M_p), espera-se que não ultrapasse o limite de 2%.

Figura 24 – Comparação com e sem condicionamento no integrador



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 25 é referente ao método IMC para o *setpoint* de 27 °C.

O resultado do método de sintonia IMC apresentou valor de M_p acima do valor especificado com *overshooting* de 3,59% (0,97°C), acima de 2%. O t_s apresenta valor próximo de 110 minutos, muito acima dos 30 minutos desejados.

Entretanto, analisando o comportamento do *duty cycle* é possível notar que ele apresenta aspecto estável a partir dos 130 minutos, e apesar do tempo de acomodação ser elevado o gráfico já dá indícios que a condição de estabilidade com esse parâmetro pode ser atendida.

A Figura 26 é referente aos métodos Ziegler-Nichols para o *setpoint* de 27 °C.

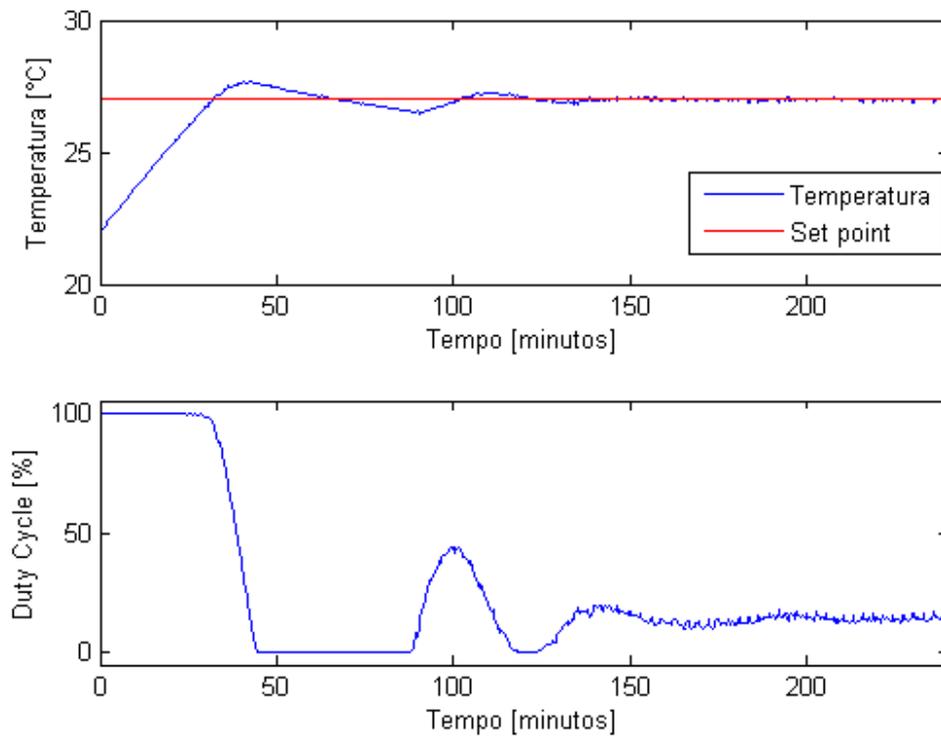
O experimento referente ao método de sintonia de Ziegler-Nichols mostra que o sistema entrou em regime permanente em um tempo menor, o que justifica o término do experimento aos 150 minutos.

O resultado do método de sintonia Ziegler-Nichols apresentou boa resposta quanto ao M_p , com 1,55% (0,42°C) (atendendo as especificações requeridas). O t_s se deu por volta dos 33 minutos, próximo dos 30 minutos desejados.

Quanto ao *duty cycle*, nota-se que a partir dos 60 minutos o mesmo apresenta comportamento com menor oscilação, variando entre 10% e 25%.

Dos métodos de sintonia propostos, o método de Ziegler-Nichols apresentou melhor desempenho na ação de controle para o *setpoint* de 27 °C.

Figura 25 – IMC - SP 27 °C



Fonte: Elaborado pelo autor

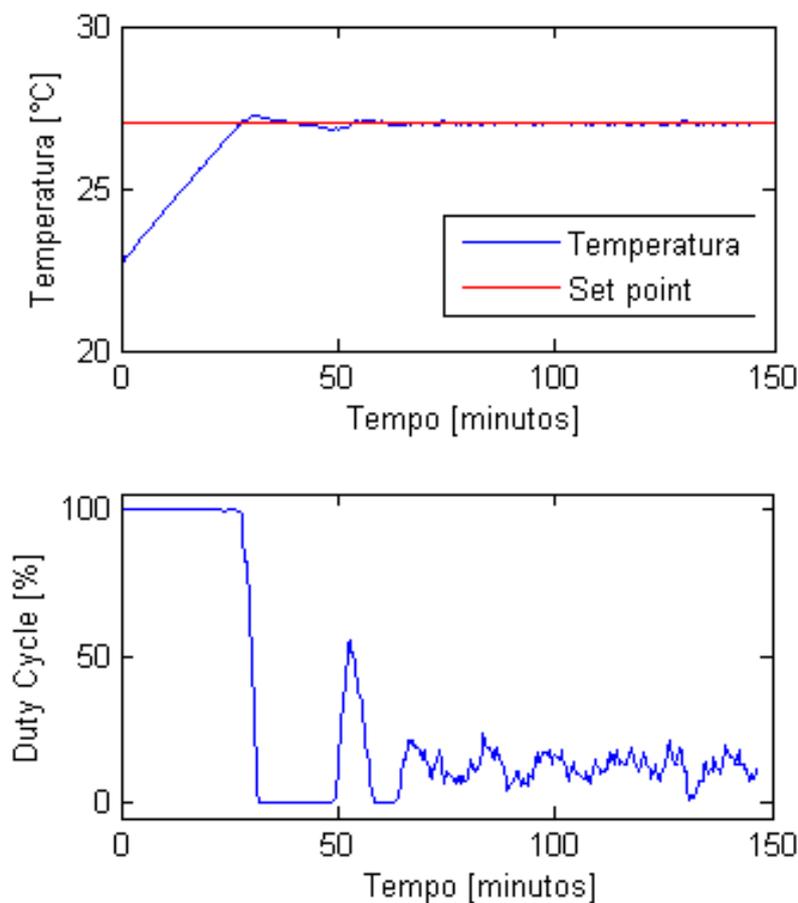
A Figura 27 representa o gráfico com os dois métodos propostos. É possível perceber que mesmo com valores de temperaturas iniciais diferentes, a análise quanto a qual melhor método de sintonia não é impossibilitada, já que levou-se em consideração os parâmetros de máximo sobressinal e tempo de acomodação como os pontos determinantes na tomada de decisão.

Percebe-se que o resultado do método de sintonia de Ziegler-Nichols apresenta resultado mais próximo do esperado, principalmente quanto ao valor de *overshooting*. A oscilação da resposta também é um ponto a se destacar, pois o método de Ziegler-Nichols além de apresentar máximo sobressinal menor, não apresentou queda no valor de temperatura tão considerável quanto o método de sintonia IMC.

A Figura 27 deixa evidente o melhor desempenho do método de Ziegler-Nichols com melhores resultados tanto para o máximo sobressinal como também para o tempo de acomodação. Resultando em uma resposta estável, rápida e com *overshooting* baixo.

Realizadas as análises e discussões referentes aos testes com o *setpoint* de 27°C, foram realizados outros dois experimentos com *setpoint* de 30°C para assegurar que o método de sintonia visto como de melhor desempenho apresenta o mesmo resultado para outro valor de *setpoint*, como pode ser visto na Figura 28.

Figura 26 – Ziegler-Nichols - SP 27 °C



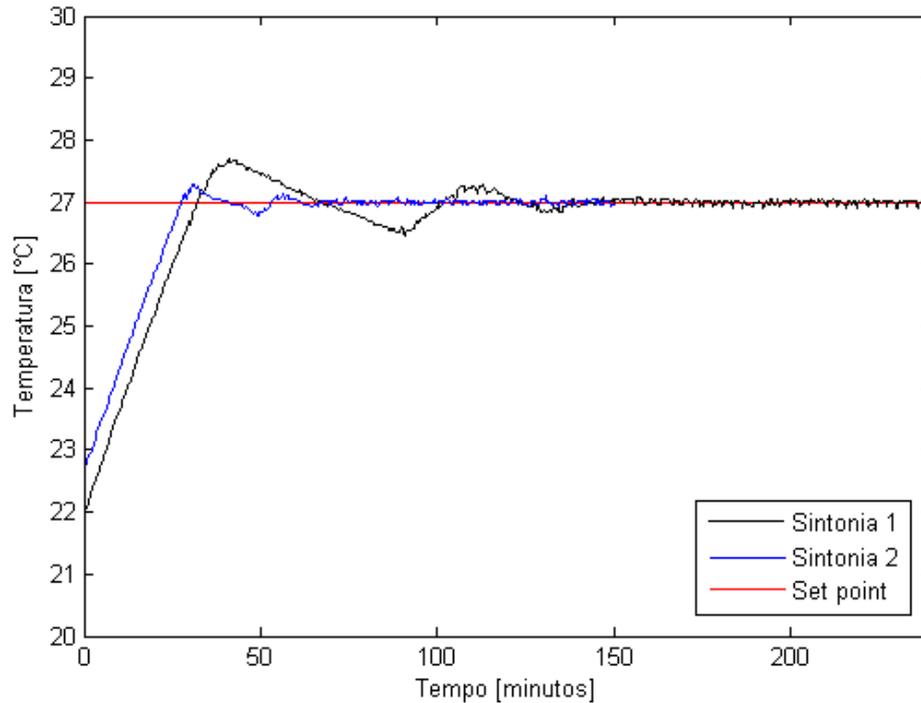
Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado do método de sintonia IMC apresentou melhor resposta para o *setpoint* de 30°C quando comparado ao *setpoint* de 27°C, mas, ainda encontra-se fora das condições especificadas. O M_p está próximo dos 2% desejados, na casa de 2,76% (0,83°C). Entretanto, o t_s está acima dos 50 minutos pretendidos, com resultado próximo de 110 minutos. Apesar do alto tempo de acomodação, o *duty cycle* apresentou comportamento com baixa oscilação a partir dos 130 minutos.

Por fim, realizou-se o último teste para escolha do melhor método de sintonia a ser utilizado. Nota-se que o método de sintonia Ziegler-Nichols apresentou baixo *overshooting* e baixo tempo de acomodação. Atingindo a condição de estabilidade rapidamente, sem ultrapassar o valor de *setpoint* em nível acima do especificado. Com M_p de aproximadamente 1,2% (0,36°C) e t_s de 54 minutos.

Logo, dos métodos de sintonia propostos, o método de Ziegler-Nichols apresentou melhor desempenho na ação de controle do sistema térmico em questão para o *setpoint* de 30°C. O método além de apresentar máximo sobressinal menor, não apresentou queda no valor de temperatura tão considerável quanto o método de sintonia IMC.

Figura 27 – Comparação dos 2 testes - SP 27 °C - Em azul, referente ao método de Ziegler-Nichols, em preto, referente ao método IMC e em vermelho referente ao *setpoint*



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o *setpoint* de 30°C é possível perceber que mesmo com valores de temperatura iniciais diferentes a análise quanto a escolha do melhor método de sintonia não é impossibilitada, já que levou-se em consideração os parâmetros de máximo sobressinal e tempo de acomodação como os pontos determinantes na tomada de decisão.

Após a plotagem e análise dos resultados referentes aos testes dos métodos de sintonia, os dados obtidos foram dispostos nas Tabelas 5 e 6 para uma melhor representação das especificações das respostas do sistema de controle.

Tabela 5 – Comparação das especificações das respostas dos sistemas - SP 27 °C

Método de sintonia	M_p (%)	M_p (°C)	t_p (minutos)	t_s (minutos)
IMC	3,59	0,97	41	110
Ziegler-Nichols	1,55	0,42	31	33

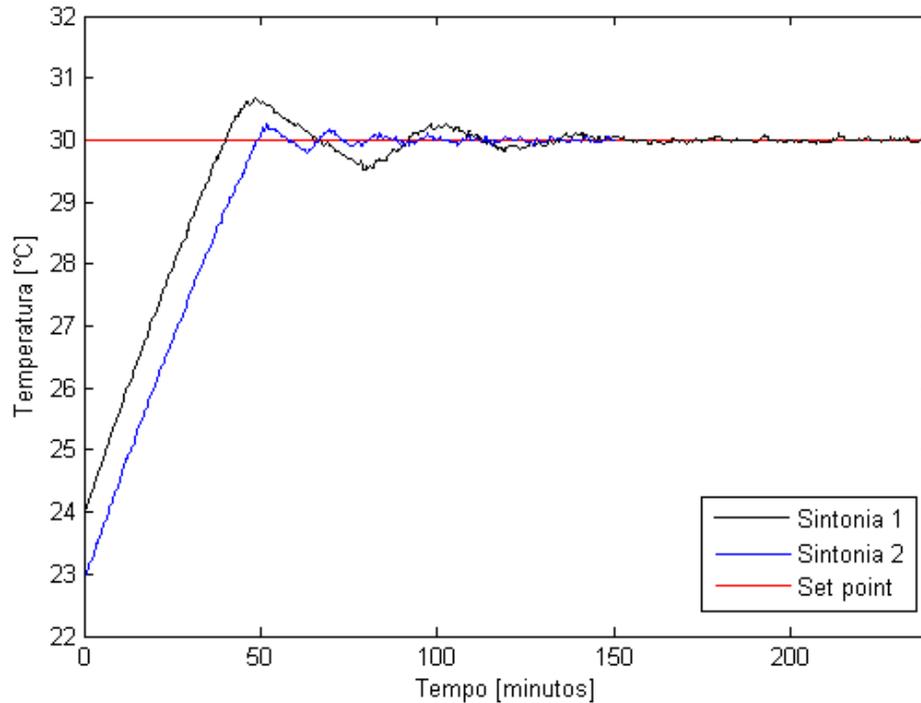
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 6 – Comparação das especificações das respostas dos sistemas - SP 30 °C

Método de sintonia	M_p (%)	M_p (°C)	t_p (minutos)	t_s (minutos)
IMC	2,76	0,83	49	104
Ziegler-Nichols	1,2	0,36	53	54

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28 – Comparação dos 2 testes - SP 30°C - Em azul, referente ao método de Ziegler-Nichols, em preto, referente ao método IMC e em vermelho referente ao *setpoint*



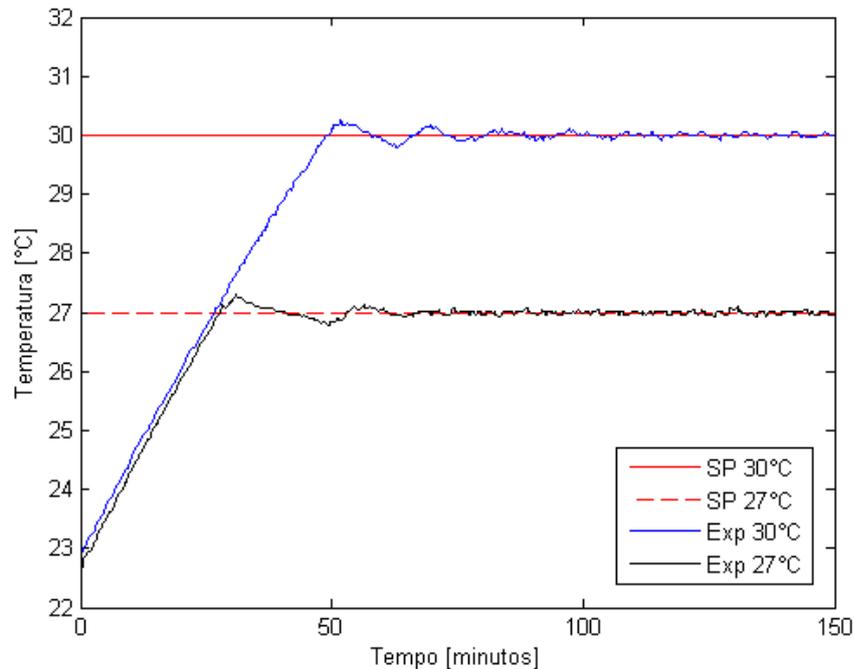
Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que o método de Ziegler-Nichols apresentou uma melhor resposta, quando considera-se a análise das especificações de máximo sobressinal (M_p) e tempo de acomodação (t_s), com baixo M_p , conseqüentemente tempo de pico (t_p) menor (pelo fato do *overshooting* ser menor). O tempo de acomodação menor que os demais métodos é o critério de maior destaque, já que a intenção principal do projeto consiste na rápida estabilização do sistema.

Novamente, volta-se a destacar que as especificações de atraso de transporte e tempo de subida não foram consideradas na análise dos resultados. O atraso de transporte foi desconsiderado pelas respostas apresentarem atraso muito pequeno. O tempo de subida não foi considerado pela variação nos valores de temperatura inicial, o que deixaria a análise deste parâmetro inconsistente.

A Figura 29 representa as respostas do sistema de controle referentes a utilização do método Ziegler-Nichols para os *setpoints* de 27 e 30°C.

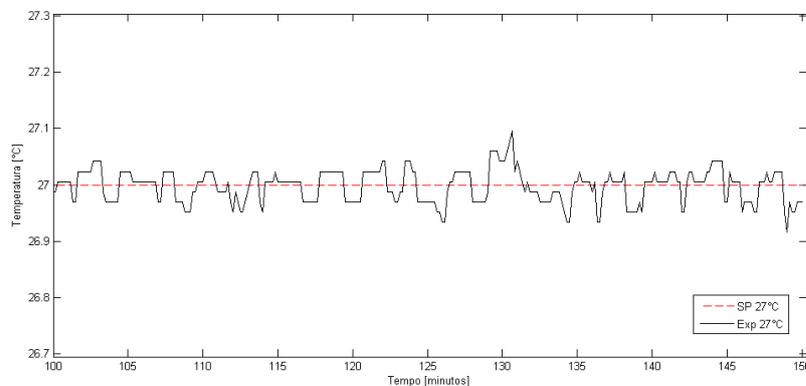
Figura 29 – Resposta ao método de sintonia de Ziegler-Nichols - Em azul, curva referente ao *setpoint* de 30 °C, em preto, curva referente ao *setpoint* de 27 °C, em vermelho contínuo, referente ao *setpoint* de 30 °C e em vermelho tracejado referente ao *setpoint* de 27 °C



Fonte: Elaborado pelo autor

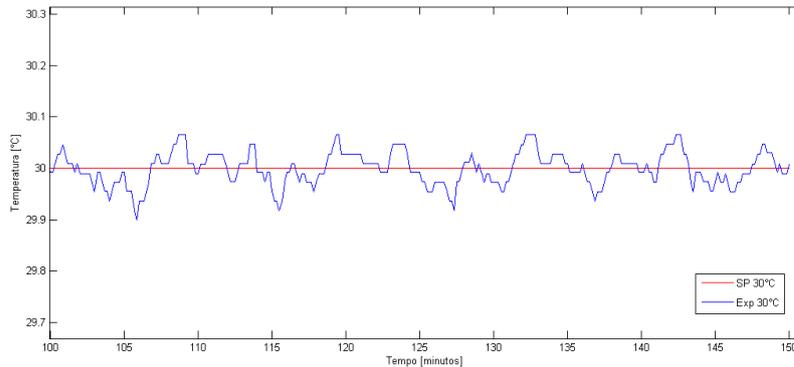
As Figuras 30 e 31 consistem na análise do método de Ziegler-Nichols após a obtenção da condição de estabilidade para ambos valores de *setpoints*, nota-se que em aproximadamente 50 minutos os valores de temperatura não variam acima de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Satisfazendo a condição de estabilidade desejada e especificada no início do processo.

Figura 30 – Resposta ao método de sintonia de Ziegler-Nichols - SP 27°C



Fonte: Elaborado pelo autor

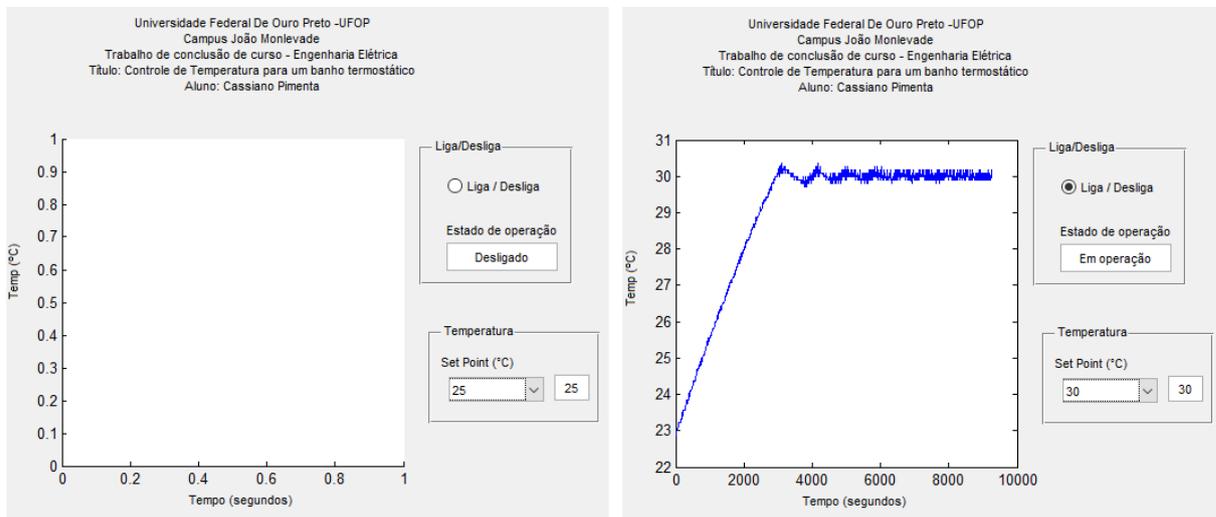
Figura 31 – Resposta ao método de sintonia de Ziegler-Nichols - SP 30°C



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, elaborou-se a configuração de uma interface gráfica, possibilitando uma simples interação com o sistema em questão. A interface gráfica é simples e de fácil utilização, com um botão liga/desliga, um indicador do estado de operação do sistema, uma lista de possíveis valores de temperatura a serem ajustados como *setpoint*, e com um gráfico que apresenta em tempo real o valor de temperatura do líquido em que a ação de controle está sendo executada.

Figura 32 – Guide



Fonte: Elaborado pelo autor

5 Considerações finais

Neste trabalho o intuito principal passa pelo controle de temperatura de líquido em um tanque de aquecimento que simula a ação de um banho termostático com aplicação voltada para sensores ultrassônicos, e para a realização do projeto do controlador foi implementada técnica experimental de identificação de sistema e realizada a comparação de métodos de sintonia para ajuste do controlador.

Com relação à técnica de identificação de sistema, a técnica de modelagem matemática caixa-preta mostrou-se eficiente no levantamento da função de transferência do sistema, levando em consideração os resultados da validação do modelo e os resultados apresentados pela ação do controlador. Sobre o projeto do controlador, os parâmetros dos controladores apresentaram resultados similares quando comparados os valores encontrados via software e manualmente, apresentando respostas aproximadas dos limites estabelecidos para uma avaliação positiva da escolha dos parâmetros. Os resultados apresentados pela sintonia referente ao método de Ziegler-Nichols apresentou resultado dentro dos parâmetros definidos, atendendo as condicionantes tanto para valor de máximo sobressinal quanto para o tempo de acomodação, permanecendo dentro da faixa de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ em torno do *setpoint*, demonstrando ser mais eficiente para o sistema em estudo.

A interface gráfica possibilitou praticidade na interação do operador com o sistema, facilitando o ajuste do *setpoint* e acompanhamento do valor de temperatura no decorrer do experimento.

Apesar de ter alcançado o resultado esperado, o presente trabalho possui alguns pontos de melhoria que podem contribuir para melhora dos resultados, dentre as melhorias pode-se citar a adição de um equipamento para resfriamento do líquido, como um compressor, já que o controlador atua no sistema apenas pelo aquecimento. Outra ação de melhoria é pela utilização de um microcontrolador com um conversor AD de 24bits visando a melhora nas medições de temperatura com resultados mais precisos.

Contudo, nota-se que a ação de controle proposta apresentou resultados eficientes e dentro do esperado para as condições iniciais em que os testes foram realizados, denotando a eficácia da ação do controlador PI juntamente com o circuito embarcado no controle de temperatura para banhos termostáticos, em que a precisão do valor de temperatura é essencial para o correto funcionamento dos sensores ultrassônicos.

Além dos resultados apresentados acima, uma consideração pertinente a ser abordada está relacionada a utilização do protótipo em disciplinas acadêmicas, já que o trabalho engloba áreas distintas como eletrônica, controle e instrumentação. O projeto consiste em uma integração interessante entre tais áreas e pode ser aproveitado no desenvolvimento das aulas práticas relacionadas ao tema.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas—Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. Belo Horizonte - MG: Editora UFMG, 2004. v. 4.
- ALOUACHE, B. et al. Monitoring of lactic fermentation process by ultrasonic technique. *Faculty of Physics, El-Alia, Algiers, Argélia*, 2015.
- ARAUJO, F. M. U. d. *Sistemas de Controle*. Natal - Rio Grande do Norte: Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Centro de Tecnologia - Depto. de Engenharia de Computação e Automação, 2007.
- BALL, S. R. *Analog interfacing to embedded microprocessor systems*. Burlington - USA: Rev. ed. of: Analog inter-facing to embedded microprocessors, 2004.
- BARR, M.; MASSA, A. *Programming Embedded Systems*. Sebastopol, Califórnia - EUA: O'Reilly, 2006. v. 2.
- BATISTA, L. C. F.; FERNANDES, G. Q.; MAIA, A. A. T. Estudo comparativo de técnicas de sintonia de controladores pid para sistemas de primeira ordem com atraso. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, Belo Horizonte - MG, v. 6, 2014.
- CAMPOS, M. C. M. M. d.; TEIXEIRA, H. C. G. *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. São Paulo - SP: Edgard Blucher, 2006. v. 1.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Modern control systems*. Rio de Janeiro - RJ: Editora LTC, 2001. v. 8.
- GARCIA, C. *Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos Vol. 1*. São Paulo - SP: Edusp, 2005. v. 1.
- GUM. *Avaliação de dados de medição — Guia para a expressão de incerteza de medição (2008)*. 2008. <<http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteud/o/isogumversaosite.pdf>>. Acesso em 20 de Junho de 2019.
- HEATH, S. *Embedded Systems Design*. London - England: Editora Newnes, 2003. v. 2.
- HENNING, B.; RAUTENBERG, J. Process monitoring using ultrasonic sensor systems. *Ultrasonics*, Paderborn, Alemanha, 2006.
- Hirzel. *PWM*. 2017. <<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>>. Acesso em em 12 de Junho de 2019.
- KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. *Princípios de Transferência de Calor*. São Paulo - SP: Pioneira Thomson Learning, 2012.
- LUCKLUM, R.; ALJAAFRECH, A. On-line monitoring of yorgut fermentation using ultrasonic characteristics. *New Developments in Circuits, Systems, Signal Processing, Communications and Computers*, Vienna, Austria, 2015.
- MAFEZZOLI, A. et al. Cure monitoring of epoxy matrices for composites by ultrasonic wave propagation. *Journal of Applied Polymer Science*, Itália, v. 72, 1999.

- MATHER, M. L.; WHITTAKER, A. K.; BALDOCK, C. Ultrasound evaluation of polymer gel dosimeters. *Institute of physics publishing*, Queensland, Austrália, 2002.
- OGATA, K.; YANG, Y. *Modern control engineering*. New Jersey - USA: Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 2010. v. 3.
- PENIDO. *Microcontroladores*. 2013. <<http://www.ifmg.edu.br/ceadop3/apostilas/microcontroladores/@@download/file/microcontroladores.pdf>>. Acesso em em 05 de Março de 2019.
- RAJENDRAN, V. et al. Measurement of ultrasonic velocity and attenuation at elevated temperatures. *NDE2002 predict. assure. improve. National Seminar of ISNT Chennai*, Tamil Nadu, India, 2002.
- RESA, P. et al. Monitoring of lactic acid fermentation in culture broth using ultrasonic velocity. *Journal of Food Engineering*, Madrid, Espanha, 2007.
- SEBORG, D. E. et al. *Process dynamics and control*. Danvers - USA: John Wiley & Sons, 2003. v. 2.
- SOARES, C. E. et al. Técnica anti-windup para controladores ressonantes aplicados a inversores de tensão monofásicos com filtro LC na saída. *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, Bonito - MS, 2010.
- ZAZ, G. et al. Adaptation of a high frequency ultrasonic transducer to the measurement of water temperature in a nuclear reactor. *Elsevier*, Grenoble, França, 2015.