



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



Trabalho de Conclusão de Curso

UM ESTUDO SOBRE FERRAMENTAS DE AUDITORIA EM MALHAS DE CONTROLE

Júnia Aparecida de Souza

João Monlevade, MG
2018

Júnia Aparecida de Souza

UM ESTUDO SOBRE FERRAMENTAS DE AUDITORIA EM MALHAS DE CONTROLE

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 Dr. Víctor Costa da Silva Campos

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2018

S729e

Souza, Júnia Aparecida.

Um estudo sobre ferramentas de auditoria em malhas de controle
[manuscrito] / Júnia Aparecida Souza. - 2018.

71f.: il.: tabs.

Orientador: Prof. Dr. Víctor Costa da Silva Campos.

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga.

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

1. Engenharia elétrica. 2. Malhas de controle. 3. Controle de temperatura.
I. Campos, Víctor Costa da Silva. II. Braga, Márcio Feliciano. III.
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 621.313

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 21 dias do mês de fevereiro de 2018, às 17 horas e 05 minutos, no bloco C deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) Júnia Aparecida de Souza, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Marcelo Moreira Tiago, Anny Verly, Márcio Feliciano Braga e Vítor Costa da Silva Campos.

O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: Um estudo sobre ferramentas de auditoria de malhas de controle. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela APROVAÇÃO do(a) candidato(a), com a nota média 9,1, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando(a).

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Marcelo Moreira Tiago	9,0
Anny Verly	9,0
Márcio Feliciano Braga	9,0
Vítor Costa da Silva Campos	9,4
Média	9,1

João Monlevade, 21 de fevereiro de 2018.

Vítor Costa da Silva Campos
Professor(a) Orientador(a)

Márcio Feliciano Braga
Professor(a) Co-orientador(a)

Marcelo Moreira Tiago
Professor(a) Convidado(a)

Anny Verly
Professor(a) Convidado(a)

Júnia Aparecida de Souza
Aluno(a)



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "Um estudo sobre ferramentas de auditoria em malhas de controle" 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, 19 de Março de 2018.


Júnia Aparecida de Souza

"... plante seu jardim e decore sua alma ao invés de esperar que alguém lhe traga flores"
– *William Shakespeare*

Resumo

Este trabalho tem por finalidade apresentar e aplicar uma rotina para auditoria em malhas de controle baseada em índices de desempenho de instrumentos. São descritos detalhes a respeito de alguns sensores de nível e temperatura, válvulas de controle e características de ação de controladores. Para a análise do desempenho dos sensores são observadas características estáticas, sendo verificadas a exatidão, a precisão, a zona morta, o *range* e o *span*. Para a análise das válvulas, devem ser feitos testes que permitam verificar a presença de agarramento, o que é um fator de falha predominante e que ocasiona baixo nível de desempenho do sistema. Para os controladores, é aplicado o índice de Harris, que relaciona a variância mínima teórica de um processo com sua variância real, e também observa-se a média de saída do sistema, uma vez que uma média em torno do ponto desejado indica boas condições de operação. Após a descrição dos índices, uma rotina de auditoria é proposta, cuja aplicação tem o objetivo de verificar e corrigir possíveis falhas do sistema. A rotina proposta é aplicada a um sistema real de controle de nível e temperatura, para o qual também foi feita a identificação da equação a diferenças que o caracteriza, além do projeto de um controlador do tipo PID para o sistema de nível.

Palavras-chave: auditoria de malhas de controle, desempenho de instrumentos, controle de nível e temperatura.

Abstract

The aim of this study is to present a routine for auditing in control-loops based upon the instrumentation's performance. In this work, there are detailed descriptions regarding some level and temperature sensors, control valves and the characteristics of controller's actions. To analyze the sensor's performance, it is observed the static features, where it is verified the accuracy, the precision, the dead band width, the range and the span. To perform the valves analysis, experiments are made aiming to verify the presence of grasping, which is a major failure index that leads to poor system performance. With respect to the controllers, Harris index is applied, it relates the process theoretical minimum-variance with its actual variance, moreover it is checked the mean values of the system output, since that a mean value near the desired point indicates good operational conditions. Subsequently to the index descriptions, it is proposed an auditing routine, which aims the verification and correction of the system's failures. A routine to be applied to a real system of level and temperature control is proposed, for which it is found the set of differential equations that characterizes it. It is also presented the design of a level PID controller.

Keywords: auditing in control-loops, instrumentation's performance, level and temperature control system.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Medição de nível por boia.	7
Figura 2 – Medição de nível por célula de pressão.	8
Figura 3 – Medição de nível por sensor ultrassônico.	8
Figura 4 – Medição de temperatura por bimetal.	9
Figura 5 – Curva de temperatura \times resistência dos principais termoresistores. . .	10
Figura 6 – Modelo de válvula gaveta.	11
Figura 7 – Modelo de válvula esfera.	12
Figura 8 – Posições da válvula borboleta.	12
Figura 9 – Modelo de válvula globo.	13
Figura 10 – Sistema de controle em malha aberta.	14
Figura 11 – Sistema de controle em malha fechada.	15
Figura 12 – Efeitos de variação do ganho K_p	16
Figura 13 – Efeitos de variação do ganho K_i	17
Figura 14 – Efeitos de variação do ganho K_d	17
Figura 15 – Histograma de erros de medição de tensão.	19
Figura 16 – Curvas de densidade de probabilidade hipotéticas.	19
Figura 17 – Variação de ângulo <i>versus</i> geração de tensão.	21
Figura 18 – Sequência para rotina de auditoria em malhas de controle.	26
Figura 19 – Malha de controle de nível e temperatura.	29
Figura 20 – Representação do modelo ARMAX.	31
Figura 21 – Resposta ao degrau da equação da malha de controle de nível e tem- peratura.	32
Figura 22 – Comparação entre controladores.	33
Figura 23 – Resposta ao degrau do controlador.	35
Figura 24 – Diagrama de Bode do controlador.	36
Figura 25 – Detalhe da régua paralela ao reservatório.	38
Figura 26 – Medição de nível com <i>setpoint</i> de 15%.	39
Figura 27 – Diferença entre nível instantâneo e médio com <i>setpoint</i> de 15%.	39
Figura 28 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com <i>setpoint</i> de 15%.	40

Figura 29 – Medição de nível com <i>setpoint</i> de 35%.	40
Figura 30 – Diferença entre nível instantâneo e médio com <i>setpoint</i> de 35%.	41
Figura 31 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com <i>setpoint</i> de 35%.	41
Figura 32 – Medição de nível com <i>setpoint</i> de 40%.	42
Figura 33 – Diferença entre nível instantâneo e médio com <i>setpoint</i> de 40%.	42
Figura 34 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com <i>setpoint</i> de 40%.	43
Figura 35 – Medição de nível com <i>setpoint</i> de 65%.	43
Figura 36 – Diferença entre nível instantâneo e médio com <i>setpoint</i> de 65%.	44
Figura 37 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com <i>setpoint</i> de 65%.	44
Figura 38 – Medição de nível com <i>setpoint</i> de 80%.	45
Figura 39 – Diferença entre nível instantâneo e médio com <i>setpoint</i> de 80%.	45
Figura 40 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com <i>setpoint</i> de 80%.	46
Figura 41 – Medição de nível com <i>setpoint</i> de 95%.	46
Figura 42 – Diferença entre nível instantâneo e médio com <i>setpoint</i> de 95%.	47
Figura 43 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com <i>setpoint</i> de 95%.	47
Figura 44 – Sensor de referência usado nos testes de temperatura.	49
Figura 45 – Introdução do sensor de referência na malha.	50
Figura 46 – Armazenamento dos dados de medição de temperatura feita com o Arduíno Nano	51
Figura 47 – Primeiro teste de temperatura.	52
Figura 48 – Diferença entre temperatura instantânea e média no primeiro teste de temperatura.	52
Figura 49 – Histograma e distribuição do primeiro teste de temperatura.	53
Figura 50 – Segundo teste de temperatura.	53
Figura 51 – Diferença entre temperatura instantânea e média no segundo teste de temperatura.	54
Figura 52 – Histograma e distribuição do segundo teste de temperatura.	54
Figura 53 – Terceiro teste de temperatura.	55
Figura 54 – Diferença entre temperatura instantânea e média no terceiro teste de temperatura.	55
Figura 55 – Histograma e distribuição do terceiro teste de temperatura de temperatura.	56
Figura 56 – Quarto teste de temperatura.	56
Figura 57 – Diferença entre temperatura instantânea e média no quarto teste de temperatura.	57
Figura 58 – Histograma e distribuição do quarto teste de temperatura.	57
Figura 59 – Quinto teste de temperatura.	58
Figura 60 – Diferença entre temperatura instantânea e média no quinto teste de temperatura.	58
Figura 61 – Histograma e distribuição do quinto teste de temperatura.	59

Figura 62 – Sexto teste de temperatura.	59
Figura 63 – Diferença entre temperatura instantânea e média no sexto teste de temperatura.	60
Figura 64 – Histograma e distribuição do sexto teste de temperatura.	60
Figura 65 – Resultado do teste de elevação na válvula de controle.	62
Figura 66 – Resultado do teste de mudança de ganho do controlador na válvula de controle.	63
Figura 67 – Diagrama de Bode do controlador.	64
Figura 68 – Erro do nível com controlador de variância mínima.	65
Figura 69 – Erro do nível com controlador PID.	65

Lista de tabelas

Tabela 1 – Funções dos instrumentos.	6
Tabela 2 – Variâncias dos sinais de entrada e saída.	34
Tabela 3 – Ganhos do controlador PID da malha.	34
Tabela 4 – Instrumentos da malha de controle auditada.	36
Tabela 5 – Resultados dos testes de medição de nível.	48
Tabela 6 – Resultados dos testes de medição de temperatura.	61
Tabela 7 – Simbologia de instrumentos.	68

Lista de abreviaturas e siglas

ARMAX	<i>Autoregressive Moving Average with Exogenous Inputs</i>
cm	Centímetro
K_d	Ganho Derivativo
K_i	Ganho Integral
K_p	Ganho Proporcional
ISA	<i>International Society of Automation</i>
mA	Miliampére
PID	Proporcional Integral Derivativo
PSI	Libra por Polegada Quadrada
kgf	Quilograma-Força
V	Volt

Sumário

1	APRESENTAÇÃO	1
1.1	Introdução	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Motivação	2
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	INSTRUMENTAÇÃO	4
2.1	Conceitos	4
2.1.1	Classificações	4
2.1.1.1	Classificação Por Função	5
2.1.1.2	Classificação Por Sinal	5
2.1.2	Simbologia	5
2.2	Especificações	6
2.2.1	Sensores de Nível	6
2.2.2	Sensores de Temperatura	9
2.2.3	Válvulas de Controle	11
2.2.4	Controladores	14
3	DESEMPENHO DE INSTRUMENTOS	18
3.1	Desempenho de Sensores	18
3.1.1	Zona Morta	20
3.1.2	Range e Span	20
3.2	Desempenho de Válvulas de Controle	21
3.2.1	Teste de Elevação	22
3.2.2	Teste de Mudança de Ganho do Controlador	22
3.3	Desempenho de Controladores	23
3.3.1	Índice de Harris	24
3.3.2	Média do Sinal de Saída	25
4	PROPOSTA DE ROTINA DE AUDITORIA	26
4.1	Auditoria de Malha de Controle	26
4.1.1	Fase I - Identificação de Campo	27
4.1.2	Fase II - Análise de Sensores e Atuadores	27

4.1.3	Fase III - Análise do Controlador	27
4.1.4	Fase IV - Avaliação Final	27
5	ESTUDO DE CASO	29
5.1	Apresentação	29
5.2	Modelagem da Malha de Controle	30
5.2.1	O Modelo ARMAX	30
5.3	Projeto de Controlador PID via <i>Sisotool</i>	34
5.4	Aplicação da Rotina de Auditoria Proposta	34
5.4.1	Fase I - Identificação de Campo	35
5.4.2	Fase II - Análise de Sensores e Atuadores	37
5.4.2.1	Sensor de Nível	37
5.4.2.2	Sensor de Temperatura	48
5.4.2.3	Válvula de Controle	61
5.4.3	Fase III - Análise do Controlador	61
5.4.4	Fase IV - Avaliação Final	63
6	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . .	66
	REFERÊNCIAS	67
	ANEXOS	68
	A1: Nomenclatura de Instrumentos	68
	A2: Algoritmo para Simulação de Efeitos do Controlador PID	70

Capítulo 1

APRESENTAÇÃO

Este capítulo tem a finalidade de introduzir e apresentar as motivações, objetivos e estrutura desta monografia, cujo foco é propor e aplicar uma rotina de auditoria em malhas de controle baseada em índices de desempenho de instrumentos.

1.1 Introdução

A aplicação de sistemas de controle automáticos nos processos tem o objetivo de garantir uma produção com menor tempo e consumo de energia e maior segurança e qualidade.

Para a garantia desses objetivos, as malhas de controle devem estar funcionando da melhor forma possível e, para isso, é preciso que haja uma rotina de auditoria no processo. Contudo, a presença de perturbações, ruídos, subutilização de tecnologias, erros de projeto, dentre outros fatores, torna necessário o desenvolvimento contínuo de técnicas de monitoramento e análise de desempenho. Algumas causas do desempenho insatisfatório de um sistema são:

- Limitações características dos instrumentos e limitações provocadas por distúrbios;
- Ajuste inadequado do controlador, devido a erros de projeto ou mesmo alterações do ponto de operação do sistema e características do produto;
- Desgaste e falhas dos instrumentos e do sistema de monitoramento, levando o controlador a uma tomada de decisão equivocada.

Esses levantamentos mostram que o próprio sistema de controle pode contribuir para o aumento de erros e variações do processo e justificam a necessidade de auditoria contínua.

Sobre a avaliação de desempenho, HARRIS, SEPPALA e DESBOROUGH (1999) listam os requisitos que um sistema de análise deve ter:

- Operação automática, eliminando erros de interferência de operadores;
- Embasamento teórico e suporte técnico, para auxílio na tomada de decisões;
- Interface gráfica com operadores, para possibilitar e facilitar o monitoramento do sistema.

Nesse trabalho, apresentam-se algumas métricas de avaliação de desempenho que podem ser utilizadas em uma rotina de auditoria em malhas de controle. Em seguida, é feita uma proposta de rotina de auditoria baseada nos índices apresentados.

1.2 Objetivos

Apresentar e aplicar uma rotina de auditoria de malhas de controle, baseada na avaliação de índices de desempenho dos instrumentos.

1.3 Motivação

Diversos fatores afetam o desempenho de um sistema de controle, acarretando em prejuízos financeiros e na qualidade do produto.

Em um levantamento realizado em mais de 700 malhas de controle, constatou-se que (PASSOS, 2009):

- 14% das malhas operam com desgaste excessivo de atuadores;
- 16% dos controladores ainda operam de forma manual;
- 16% das malhas possuem problemas de sintonia;
- 24% das saídas do sistema estão em estado saturado;
- 41% das malhas possuem problemas de oscilação causadas por operação inadequada da instrumentação do processo.

Os dados supracitados reforçam a necessidade de que é preciso efetuar a correção e melhoria na operação das malhas de controle e estar atento as potencialidades dos dispositivos, buscando utilização máxima de seus recursos para alcance dos objetivos desejados no sistema.

É preciso também atenção quanto aos sistemas que se tornam obsoletos pela redução do desempenho dos instrumentos, sendo uma consequência natural de uso de qualquer dispositivo, seja ele, elétrico, mecânico ou de outra natureza.

As menções acima reforçam a teoria de que é importante efetuar a avaliação do comportamento das malhas de controle com o propósito de tomar decisões que sejam desde

uma simples modificação até mesmo a necessidade de um novo projeto para o sistema, objetivando seu funcionamento adequado.

1.4 Estrutura do Trabalho

Essa monografia é composta por seis capítulos. O primeiro foi dedicado a apresentar alguns argumentos que comprovam a importância de uma rotina de auditoria em malhas de controle. No segundo capítulo, é feita uma abordagem teórica a respeito de instrumentação, com foco nos dispositivos usados para medir nível e temperatura, além de válvulas e controladores. No terceiro capítulo, são apresentadas as métricas usadas para análise de desempenho de sensores, atuadores e controladores. No capítulo quatro, é feita uma proposta de rotina de auditoria para malhas de controle baseada na fundamentação teórica dos capítulos anteriores. No quinto capítulo, é feito o estudo de caso de um sistema real de controle de nível e temperatura, com aplicação do modelo de auditoria proposto. No sexto e último capítulo, é feita uma conclusão geral sobre o trabalho elaborado e também são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que tenham interesse em desenvolver rotinas para auditar sistemas de controle.

Capítulo 2

INSTRUMENTAÇÃO

Este capítulo tem a finalidade de apresentar conceitos gerais sobre instrumentação, além de especificações sobre os principais sensores utilizados para medição de nível e temperatura, válvulas de controle e ações de controladores.

2.1 Conceitos

A instrumentação é uma área da engenharia que aplica e desenvolve instrumentos capazes de realizar ações de medição, transmissão, indicação, registro e controle de variáveis físicas.

A aplicação de instrumentos no controle de processos possibilita a existência de malhas complexas, seguras e precisas e interfere diretamente com aspectos relacionados à qualidade dos produtos. Entretanto, eles estão sujeitos a erros e requerem rotinas de calibração e manutenção para manter sua funcionalidade exata e precisa, de acordo com os limites estabelecidos pelo fabricante.

Sendo a instrumentação um dos fatores responsáveis pelo rendimento de um processo, é importante a compreensão das suas classificações conforme descrevem as seções seguintes.

2.1.1 Classificações

Uma medição pode ser realizada de duas formas:

- Direta: O instrumento tem relação direta com a variável medida.
- Indireta: A variável é obtida por meio de leitura de outra grandeza qualquer. Por exemplo, o nível pode ser determinado a partir de um valor de pressão.

As medições podem também ser do tipo contínua, que fornece informação proporcional ao ambiente em que está monitorando, ou discreta, em que tem-se apenas uma

indicação de faixa, por exemplo, nível em estado máximo ou mínimo. Existem ainda algumas variáveis usadas para classificação dos instrumentos, e dentre as principais estão a classificação por função e por sinal.

2.1.1.1 Classificação Por Função

Quanto a funcionalidade, segundo RIBEIRO (2002), os instrumentos podem ser classificados da seguinte forma:

- Sensor: Instrumento usado para detecção de alteração na variável do processo.
- Transmissor: Instrumento usado para transmissão de um sinal.
- Indicador: Instrumento que possui recurso de indicação visual da variável medida.
- Registrador: Instrumento que registra graficamente as variáveis medidas.
- Conversor: Instrumento que converte uma forma de sinal em outra para fins de transmissão e leitura.
- Controlador: Instrumento usado para fazer comparações entre valores medidos e desejados e, baseado na diferença entre eles, emitir um sinal de controle, com o propósito de eliminação da diferença.
- Elemento final de controle: Instrumento que tem a função de modificar uma variável de acordo com o comando do controlador.

Vale ressaltar que há instrumentos que são capazes de realizar mais de uma função.

2.1.1.2 Classificação Por Sinal

Os tipos mais comuns de sinal de transmissão e alimentação dos instrumentos são:

- Elétrico: É usada uma faixa padronizada de sinal em corrente contínua entre 4 a 20 mA, para curtas distâncias, e tensão contínua entre 1 a 5 V para longas distâncias.
- Pneumático: O padrão de transmissão e alimentação utilizado é o uso de gás comprimido entre 0,2 e 1 kgf/cm², que corresponde a aproximadamente 3 a 15 PSI no sistema inglês.

2.1.2 Simbologia

A norma S5.1 da International Society of Automation (ISA) estabelece a simbologia que deve ser utilizada para identificação dos instrumentos.

De acordo com as funções dos instrumentos, conforme descrito em 2.1.1.2, a letra que identifica cada uma delas são relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Funções dos instrumentos.

Função	Simbologia
Sensor	E
Transmissor	T
Indicador	I
Registrador	R
Relé ou Conversor	Y
Controlador	C
Elemento final de controle	Z

Fonte: Da autora.

Cada instrumento da malha deve ser referenciado por um conjunto de letras e números, em que a primeira letra indica a variável controlada e a segunda a função, isto para casos em que há apenas duas letras.

Quando há mais de duas letras, a primeira indica a variável controlada e as outras a função e um modificador da função. Para ambos os casos, os números são usados para identificar a malha à qual o instrumento pertence. As letras mais comuns são apresentadas na Tabela 7, contida no Anexo A1.

2.2 Especificações

Essa seção é destinada a apresentar especificações sobre alguns dos principais instrumentos usados nas malhas de controle que operam com grandezas de nível e temperatura. Também são relacionados alguns modelos de válvulas, que são elementos finais de controle fundamentais nos processos. Por fim, são introduzidos conceitos sobre os controladores, que são responsáveis pela gestão das malhas.

2.2.1 Sensores de Nível

A medição de nível é normalmente feita por sensores mecânicos e elétricos e algumas técnicas comuns são:

1. Medição de Nível por Boia

Técnica de medição direta baseada na mudança da altura de uma boia colocada sobre o líquido a ser monitorado e que, normalmente, é combinada com uma régua para possibilitar a visualização numérica da medição. Para tal, um contrapeso é fixado a um ponteiro, conforme mostra a Figura 1. Este método de medição se destaca pela sua simplicidade e por ser muito usado para proteção da malha.

2. Medição de Nível por Célula de Pressão

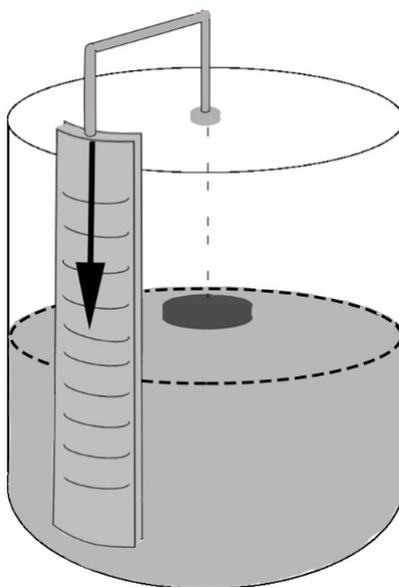


Figura 1 – Medição de nível por boia.

Fonte: Da autora.

Essa técnica usa um sensor constituído por duas câmaras, uma de alta e outra de baixa pressão. É feita a instalação de um sensor na parte mais baixa do reservatório e outra na parte mais alta e a diferença de pressão entre eles é usada como referência para se ter o nível correspondente.

Para aplicação desta técnica de medição é necessário que seja conhecida a densidade do líquido e então pode-se calcular o nível por

$$P_H = P_L + (h \times \rho) \quad (2.1)$$

em que P_H é a pressão medida na parte baixa do tanque, P_L a pressão medida na parte alta (igual à atmosférica se o tanque estiver aberto), h é o nível do líquido e ρ é a densidade do líquido.

É importante que o ponto de entrada da câmara na parte baixa esteja no mesmo nível do tanque, ou então que seja descontada a diferença de altura entre eles. A Figura 2 ilustra a estrutura de um tanque em que é aplicado o método de medição de nível por célula de pressão.

Algumas vantagens da técnica estão no fato de haver grande variedade de materiais para construção das câmaras, que podem ser aplicadas em variáveis corrosivas, e por apresentarem bom desempenho para amplas faixas de medição. Por outro lado, a variação de densidade do material causa erros na medição e exige nova calibração do instrumento.

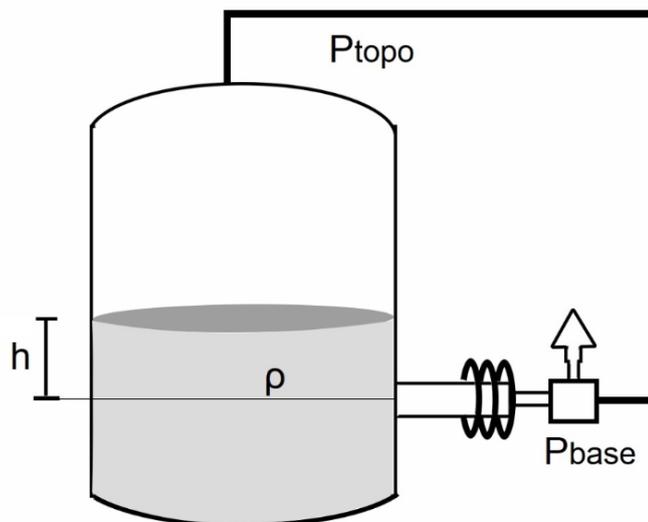


Figura 2 – Medição de nível por célula de pressão.

Fonte: Da autora.

3. Medição de Nível por Sensor Ultrassônico

Nesta técnica de medição são emitidos pulsos, com frequência de oscilação maior de 20 kHz, que são gerados por um material piezoelétrico a partir de sua excitação por tensão elétrica. Os pulsos são direcionados para o material a ser medido, que faz com que eles sejam refletidos à fonte de emissão. Assim, o cálculo de nível é feito com base no tempo em que os pulsos demoram para retornar.

Neste método a medição não é afetada pela variação de composição do material, entretanto deve-se ter atenção com a superfície, de forma que ela seja plana e não interfira na reflexão dos pulsos.

Os sensores podem ser instalados no interior (A) ou exterior (B) do reservatório, permitindo sua aplicação em processos em que não pode haver contato com a variável, como são mostradas na Figura 3 as duas formas de instalação.

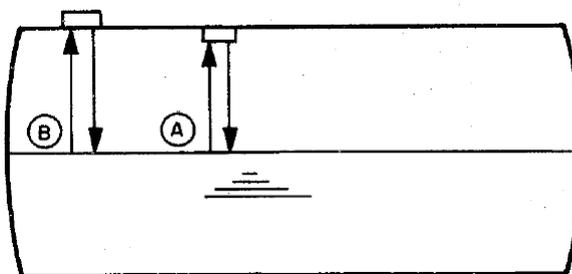


Figura 3 – Medição de nível por sensor ultrassônico.

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2002).

4. Medição de Nível por Capacitância

Essa técnica de medição se baseia no funcionamento de um capacitor. O sensor capacitivo é montado na parte superior do reservatório, dirigido para dentro, e consiste em uma das placas do capacitor e a própria estrutura do reservatório é a segunda placa. À medida em que o nível aumenta ou diminui, o valor da capacitância é alterado, pois o material medido passa a fazer parte em maior ou menor proporção do dielétrico do capacitor. Esse princípio de medição é robusto e seguro, mesmo em materiais em que há incrustação. Por outro lado, em casos em que há presença de bolhas de ar, a medição será afetada.

2.2.2 Sensores de Temperatura

É muito comum fazer a medição indireta de temperatura por meio da variação das características de materiais condutores. Algumas das técnicas são:

1. Medição de Temperatura por Bimetal

Dois metais com diferentes coeficientes de dilatação são unidos para formar uma única haste que, ao ser exposta a uma variação de temperatura, sofre dilatação, produzindo um movimento que é usado em um sistema de indicação, conforme mostra a Figura 4, ou ainda combinado com um sensor de deformação. O instrumento apresenta baixo custo e largas faixas de medição, entretanto, tem facilidade de perda de calibração e precisão ruim.

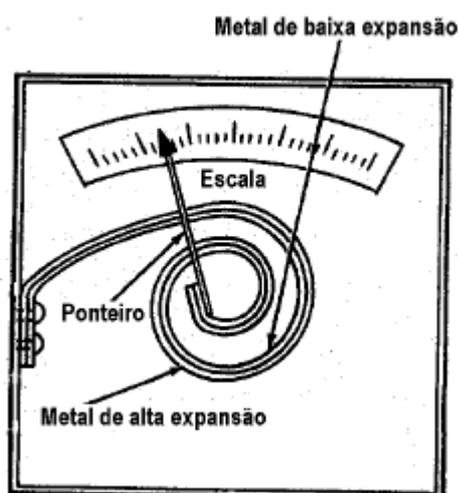


Figura 4 – Medição de temperatura por bimetal.

Fonte: RIBEIRO (2002).

2. Medição de Temperatura por Termopar

Termopares são instrumentos usados para transformar calor em eletricidade a partir da combinação de dois metais, sendo um de medição e outro de referência. Mede-se então a tensão entre os dois materiais, que é uma consequência da diferença de temperatura entre eles. Existem vários tipos de termopares, que são classificados de acordo com a combinação de metais, sendo: (i) tipo J: ferro e constantan, (ii) tipo K: cromel e alumel, (iii) tipo T: cobre e constantan, (iv) tipo S: platina e ródio e; (v) tipo R: também platina e ródio, porém em proporção diferente. Os termopares apresentam grande precisão e menor tempo de atraso.

3. Medição de Temperatura por Termoresistor

Tendo em vista que a resistência dos materiais depende da temperatura a que estão submetidos, este princípio é usado para medição indireta de temperatura. Os principais materiais utilizados no mercado são a platina, o níquel e o cobre, por apresentarem linearidade entre a variação da resistência *versus* temperatura. A Figura 5 mostra a relação entre a resistência e a temperatura para os materiais citados.

Estes sensores possuem maior precisão quando comparados aos citados anteriormente, maior alcance e têm boas características de reprodutibilidade. No entanto, são mais caros e deterioram com mais facilidade.

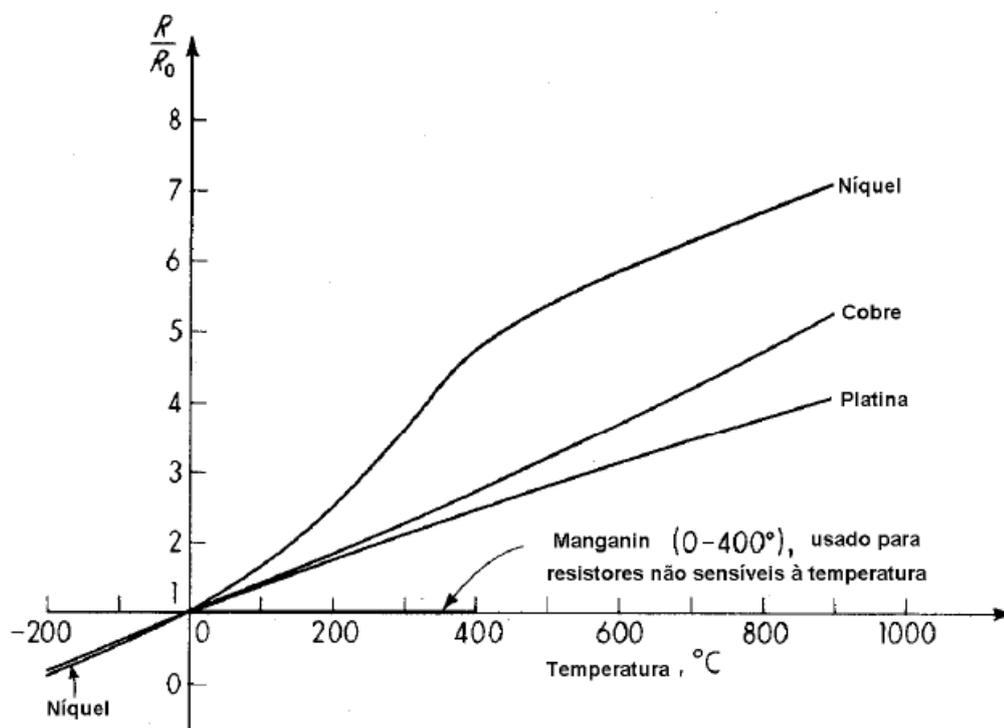


Figura 5 – Curva de temperatura \times resistência dos principais termoresistores.

Fonte: RIBEIRO (2002).

2.2.3 Válvulas de Controle

Segundo RIBEIRO (2002), cerca de 5% dos custos de uma indústria química estão relacionados a válvulas, cujas principais funções são:

- Conter ou liberar a passagem de fluido em um processo;
- Responder aos comando impostos pelo controlador do sistema;
- Absorver ou fornecer quedas de pressão no processo.

Existem vários tipos de válvulas, com diferentes tamanhos, pressão de trabalho, tipo de fluido manipulado, dentre outros fatores importantes que devem ser observados na hora de se escolher a válvula adequada ao projeto.

A seguir, são apresentadas algumas das estruturas de válvulas mais usadas e que, segundo RIBEIRO (2002), representam 90% do uso em uma indústria petroquímica.

1. Válvula Gaveta

É constituída por uma porta deslizante que se move de acordo com especificação imposta pelo controlador. A válvula gaveta corresponde a cerca de 70% a 80% do total de válvulas da indústria petroquímica (RIBEIRO, 2002). Elas possuem grande desempenho para selagem, no entanto, não são indicadas para aplicações de controle contínuo e em processos de alta velocidade. A Figura 6 mostra uma exemplo de válvula gaveta, onde é possível ver a porta deslizante perpendicular ao sentido do fluxo.

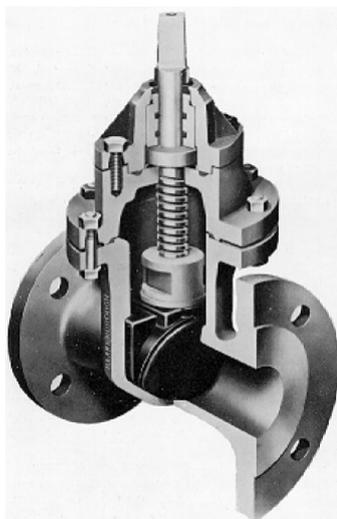


Figura 6 – Modelo de válvula gaveta.

Fonte: RIBEIRO (2002).

2. Válvula Esfera

Esse tipo de válvula possui uma esfera alojada em seu invólucro. A esfera, ao ser rotacionada de 90 graus, muda a posição de fechada para aberta e vice-versa. São indicadas para circuitos de controle discreto e de altas pressões. Tem como vantagem o fato de não precisar de espaço para deslocamento de haste, uma vez que a esfera é capaz de rotacionar 90 graus. Na Figura 7, é possível ver o estágio em que a esfera está em posição de abertura.

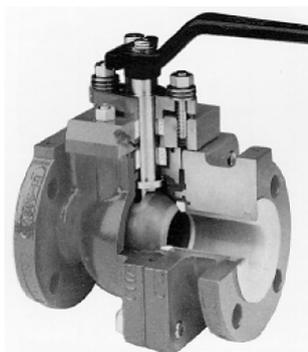


Figura 7 – Modelo de válvula esfera.

Fonte: RIBEIRO (2002).

3. Válvula Borboleta

A válvula borboleta é formada por um disco que gira em torno de um eixo e perpendicular à direção do fluxo. Ela pode efetuar controle contínuo ou discreto de grandes vazões, seja de líquidos com ou sem partículas sólidas. A Figura 8 mostra as posições de comportamento de uma válvula borboleta, sendo, respectivamente, aberta, intermediária e fechada.

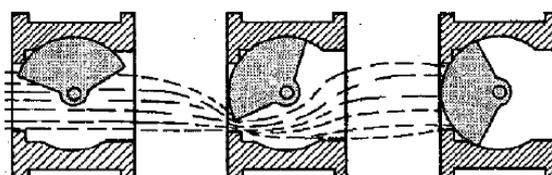


Figura 8 – Posições da válvula borboleta.

Fonte: RIBEIRO (2002).

4. Válvula Globo

Este tipo de válvula possui corpo esférico e um elemento de abertura, ou sede, que é movido por uma haste perpendicular ao seu corpo, conforme mostra a Figura 9. Tem a vantagem de apresentar resposta rápida e ser menos sujeita a desgastes,

entretanto, ela provoca grande perda de pressão na linha, o que pode prejudicial a alguns sistemas.

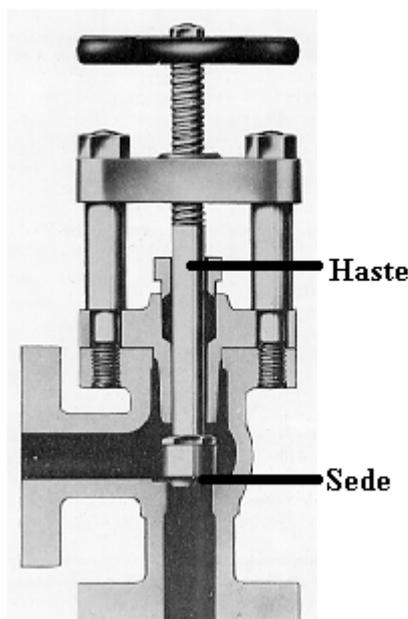


Figura 9 – Modelo de válvula globo.

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2002).

Sobre a característica de vazão das válvulas definem-se dois tipos: a inerente e a instalada. A característica inerente é a relação entre a vazão da válvula, sob pressão constante, e o sinal do controlador. Enquanto que a característica instalada corresponde a real característica de vazão, ou seja, sob condições reais, em que a pressão não é mantida constante. A característica de vazão inerente é a teórica, enquanto a instalada é a prática.

Existem quatro tipos de características de vazão inerente:

- Linear: iguais incrementos do controlador resultam em iguais variações de vazão.
- Igual porcentagem: acréscimos iguais na válvula produzem porcentagem iguais ao acréscimo em relação à vazão momentânea.
- Parabólica: característica de vazão entre linear e de igual porcentagem.
- Abertura rápida: produz máxima variação de vazão de acordo com o comando do controlador.

A característica de vazão instalada depende do processo e sofre alteração com quedas de pressão provocadas pelo próprio sistema.

2.2.4 Controladores

Nos processos industriais implementados quando ainda eram poucos os recursos de automação e controle, as variáveis eram controladas de forma manual, mas a complexidade das malhas atuais, seja por questões de segurança ou economia e pelo interesse em desempenho ótimo, tornou-se necessária a substituição da ação humana por equipamentos capazes de executar as tarefas de controle de forma automática.

Os equipamentos responsáveis pelas tarefas anteriormente citadas são chamados de controladores. Esses instrumentos recebem uma informação de entrada a respeito da variável medida, processam um valor de saída (baseado na diferença entre o valor de operação desejado (*setpoint*) e o valor lido) e determinam um sinal para corrigir ou limitar os desvios.

Além da ação do controlador, a arquitetura da malha é determinante para estabelecer a relação entre entrada e saída e, juntamente com o controlador e os demais instrumentos, compõe o sistema de controle. Segundo DORF e BISHOP (1998), "um sistema de controle é uma interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzirá um resposta desejada ao sistema". A arquitetura de uma malha de controle pode ocorrer de duas formas: em malha aberta ou em malha fechada. O sistema em malha aberta utiliza um atuador para interferir diretamente na variável. Enquanto que o sistema em malha fechada faz uso do estado atual da variável que se deseja controlar para compará-lo ao valor desejado, resultando em um erro e , então, emitir um sinal de controle, permitindo aprimorar o desempenho do sistema. As figuras 10 e 11 mostram, respectivamente, o fluxograma de um sistema de controle em malha aberta e em malha fechada.

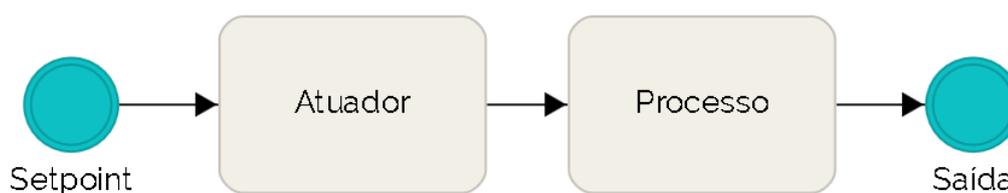


Figura 10 – Sistema de controle em malha aberta.

Fonte: Da autora.

Os controladores podem operar com diversas características de ação, sendo que as principais são as ações de controle proporcional, integral e derivativo. Segundo SOUZA (2007), 90% dos controladores utilizados na indústria são do tipo PID, mesmo em casos em que outras ações seriam mais apropriadas.

Os detalhes sobre as consequências de atuação de cada uma destas ações em uma malha de controle são apresentadas nas seções a seguir.

1. Controle Proporcional

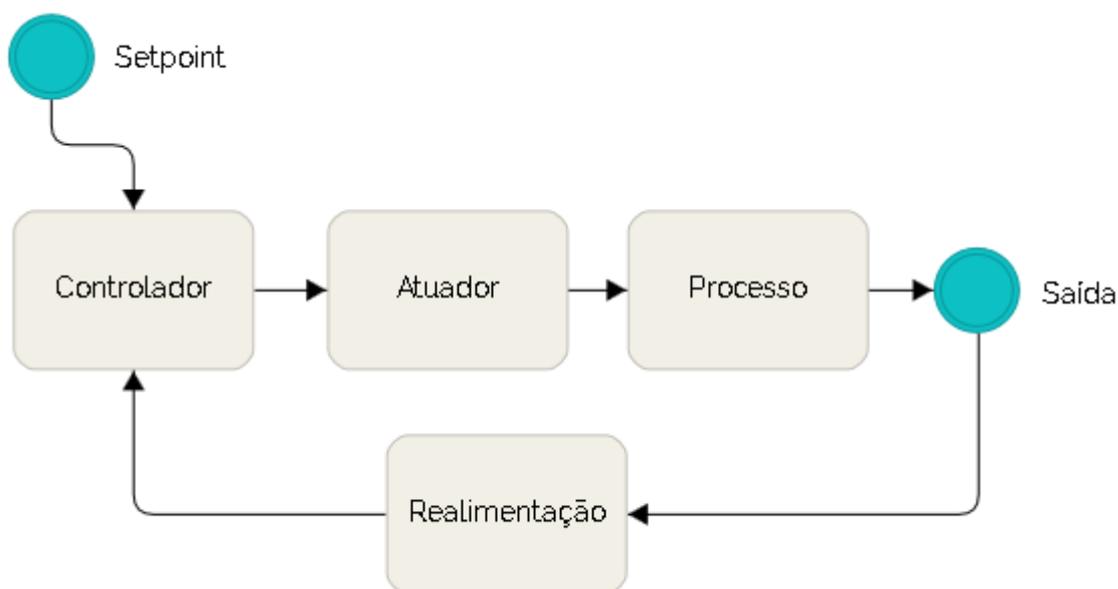


Figura 11 – Sistema de controle em malha fechada.

Fonte: Da autora.

A função de controle proporcional produz um valor de saída proporcional ao erro, sendo descrita matematicamente por

$$P = K_p \times e(t) \quad (2.2)$$

em que K_p é a constante proporcional e $e(t)$ o erro.

A partir de (2.2) nota-se que quanto maior for o valor de K_p maior será a ação de controle, entretanto, devido à lei de controle, o sistema se torna mais instável. Os efeitos da variação de K_p podem ser observados na Figura 12, que descreve a resposta de um sistema para uma entrada em degrau.

2. Controle Integral

A função de controle integral soma todos os erros instantâneos do sistema, então sua função matemática tem a forma

$$I = K_i \times \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

em que K_i é a constante integral e $e(t)$ o erro.

Assim ela consegue eliminar o erro em regime permanente. Por ser feita a soma instantânea, o resultado obtido pode ultrapassar o ponto desejado, ocasionando o *overshoot*, ou sobressinal. Na Figura 13 é possível observar o efeito da lei de controle integral com a variação dos valores de K_i para uma entrada degrau no sistema. Vê-se também que maiores valores de K_i implicam em maior instabilidade.

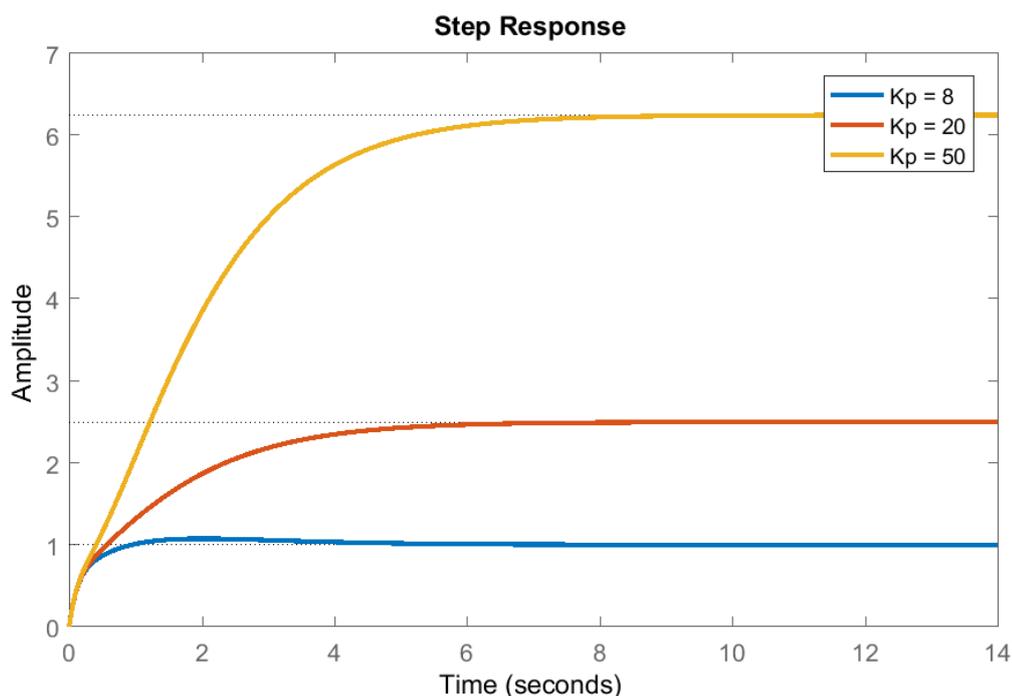


Figura 12 – Efeitos de variação do ganho K_p .

Fonte: Da autora.

3. Controle Derivativo

Esta função é usada para eliminar as variações da saída do controlador e também diminuir o efeito de *overshoot* provocado pelo controle integral, com isso há melhoria da estabilidade do sistema. Entretanto, para a presença de ruídos, que têm grande taxa de variação, a função derivativa amplifica os sinais ruidosos, podendo levar o sistema a instabilidade. A verificação é feita pela função matemática

$$D = K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

em que K_d é a constante derivativa e $e(t)$ o erro.

Por isso, em alguns casos, a ação derivativa é aplicada somente sobre a referência, ou aplicada de forma filtrada sobre o sinal medido. A Figura 14 mostra que menores valores de K_d tornam o sistema menos sensível aos ruídos ou à variação dos sinais de controle.

Sobre os gráficos apresentados, se trata de um sistema de controle PID (ver detalhes no Anexo 6) em que, para a variação de um dos ganhos, os dois outros são mantidos constantes. Por exemplo, para observação dos efeitos de variação de K_p , manteve-se os ganhos K_i e K_d constantes.

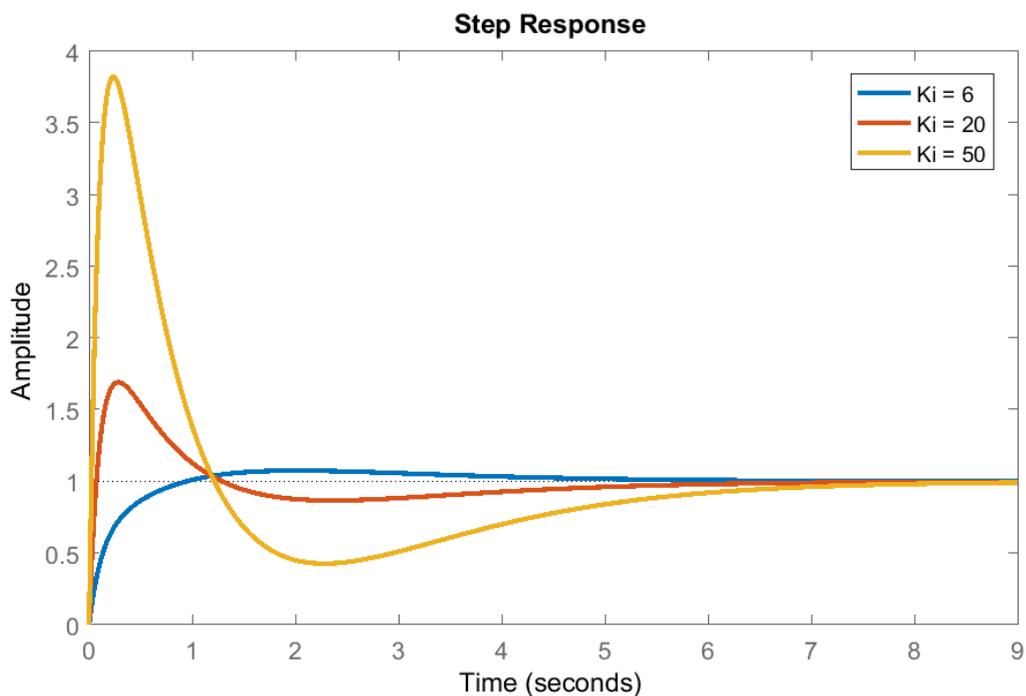


Figura 13 – Efeitos de variação do ganho K_i .

Fonte: Da autora.

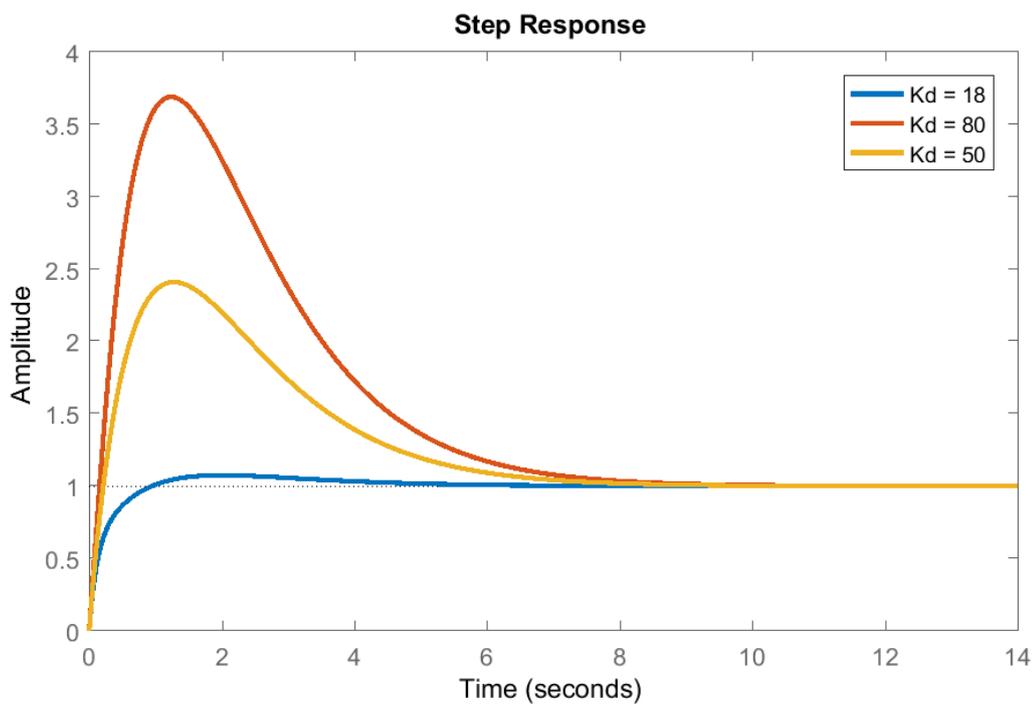


Figura 14 – Efeitos de variação do ganho K_d .

Fonte: Da autora.

Capítulo 3

DESEMPENHO DE INSTRUMENTOS

A finalidade deste capítulo é apresentar os pontos que devem ser observados para a verificação do desempenho de sensores, válvulas de controle e controladores. São apresentados também índices e procedimentos de teste que permitem a identificação de condições não ideais de funcionamento dos instrumentos.

3.1 Desempenho de Sensores

Um histograma é normalmente utilizado para representar a ocorrência de erros de uma variável do processo e se trata de um gráfico cujo eixo horizontal aponta os valores do conjunto e o eixo vertical o número de ocorrências do evento. A Figura 15 mostra um exemplo de valores de erros de medição de um voltímetro, representados em forma de histograma.

Uma alternativa para tornar a representação mais suave, possibilitando uma leitura de ocorrências relativas dos eventos, é tornar cada vez menores a largura das faixas e cada vez maiores o número de observações. Para alcançar tal objetivo, usa-se uma função densidade de probabilidade, sendo mais comumente usada a função gaussiana, que tem a forma

$$f_p(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1)$$

em que σ é o desvio padrão e μ é a média.

A Figura 16 mostra três situações hipotéticas de curvas gaussianas, cada uma obtida por instrumentos diferentes, mas observando a mesma variável, que nos permitem a observação de características importantes. Considerando que o valor real da variável seja 0, podemos concluir:

- Curva vermelha: O instrumento utilizado tem pequena taxa de dispersão e está centrado em torno do valor real, desta forma, seu uso implica em grande probabilidade de leitura correta.

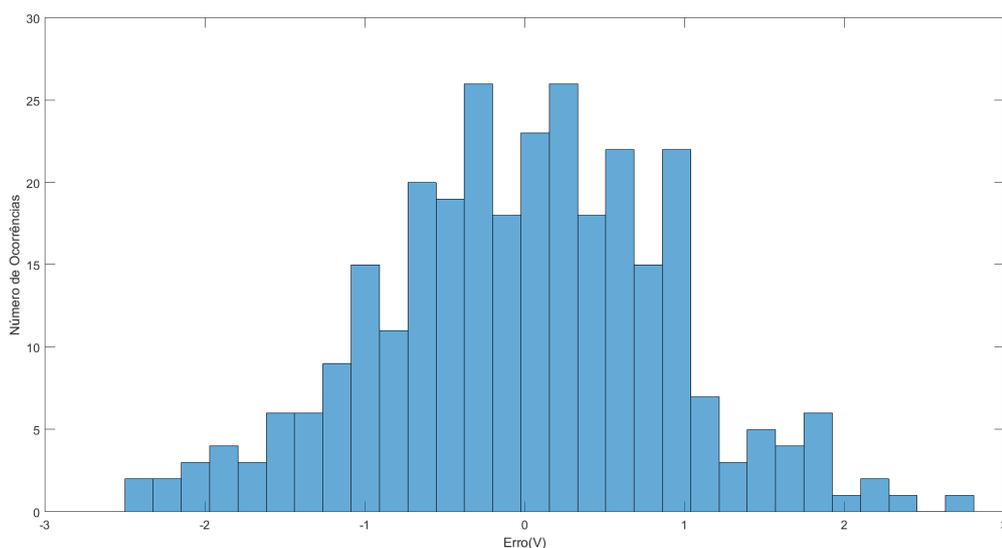


Figura 15 – Histograma de erros de medição de tensão.

Fonte: Da autora.

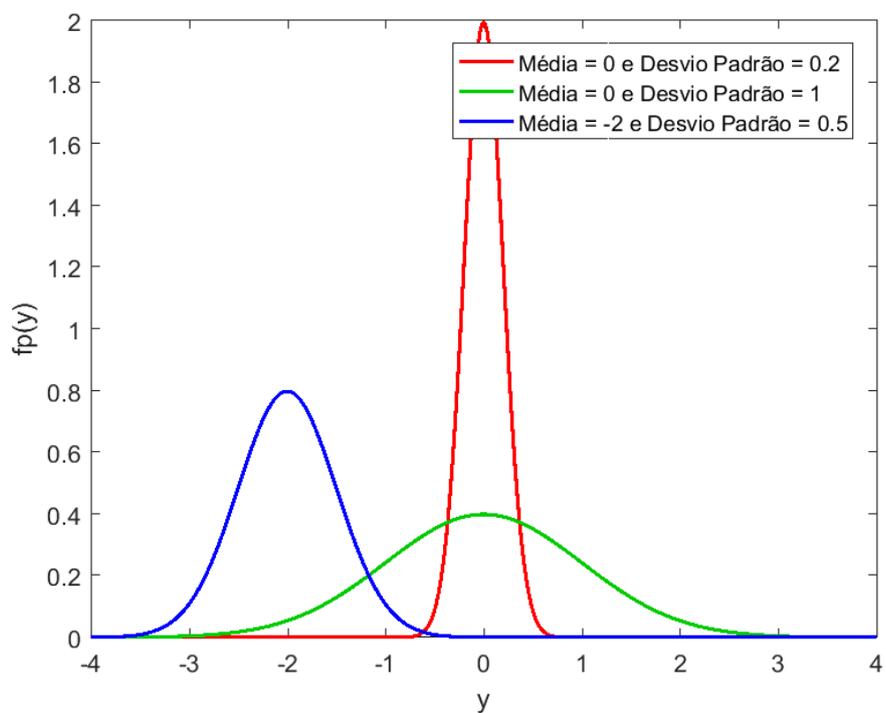


Figura 16 – Curvas de densidade de probabilidade hipotéticas.

Fonte: Da autora.

- Curva verde: Apesar de estar centrado em torno do ponto real, este instrumento apresenta alta taxa de dispersão, diminuindo a probabilidade de leitura correta da

variável caso seja utilizado.

- Curva azul: O instrumento elimina qualquer chance de leitura correta, pois, mesmo não tendo taxa de dispersão tão alta, está totalmente deslocado em relação ao valor real.

As observações feitas a partir da Figura 16 permitem a introdução dos conceitos de exatidão e precisão dos instrumentos, que são características usadas para análise estática de desempenho.

A exatidão de um instrumento é determinada pelo desvio máximo observado durante testes de medição. Para garantia da exatidão, é preciso que haja calibração periódica. A precisão é o grau de concordância entre várias medições realizadas e garante a indicação de um valor verdadeiro da variável. Quando a precisão do instrumento atinge valores não aceitáveis pelo processo é preciso efetuar manutenção.

Segundo AGUIRRE (2013), "[...] exatidão é um conceito relacionado a erros sistemáticos. Um instrumento que comete esses erros é inexato. No entanto, a precisão é uma característica diretamente relacionada aos erros de caráter aleatório."

Justifica-se então a importância das rotinas de auditoria para verificar estados de calibração e manutenção dos sensores e, conseqüentemente, obter de forma confiável a medição da variável. Alguns parâmetros que devem ser observados para análise de precisão dos instrumentos são descritos na seções seguintes.

3.1.1 Zona Morta

A zona morta é a faixa de valores da entrada que correspondem a um mesmo valor de saída. Observe a Figura 17, com dados obtidos em teste de laboratório, que descrevem a geração de tensão em função da variação de ângulo dos terminais de um potenciômetro. Nela é possível ver que para valores de entrada entre 0 e 20 graus não houve alteração da tensão gerada, sendo esta a região de zona morta.

3.1.2 Range e Span

O *range* é a faixa entre os valores máximo e mínimo de capacidade de medição do instrumento, enquanto que a diferença entre eles é o *span*. Esses parâmetros são importantes observações a serem feitas durante a fase de projeto, de modo a se escolher um instrumento adequado as faixas de medição exigidas. É importante também estar atento a eles para observar casos de saturação do instrumento.

A saturação implica em incapacidade do instrumento aumentar ou diminuir sua saída e, conseqüentemente, em ação de controle errada.

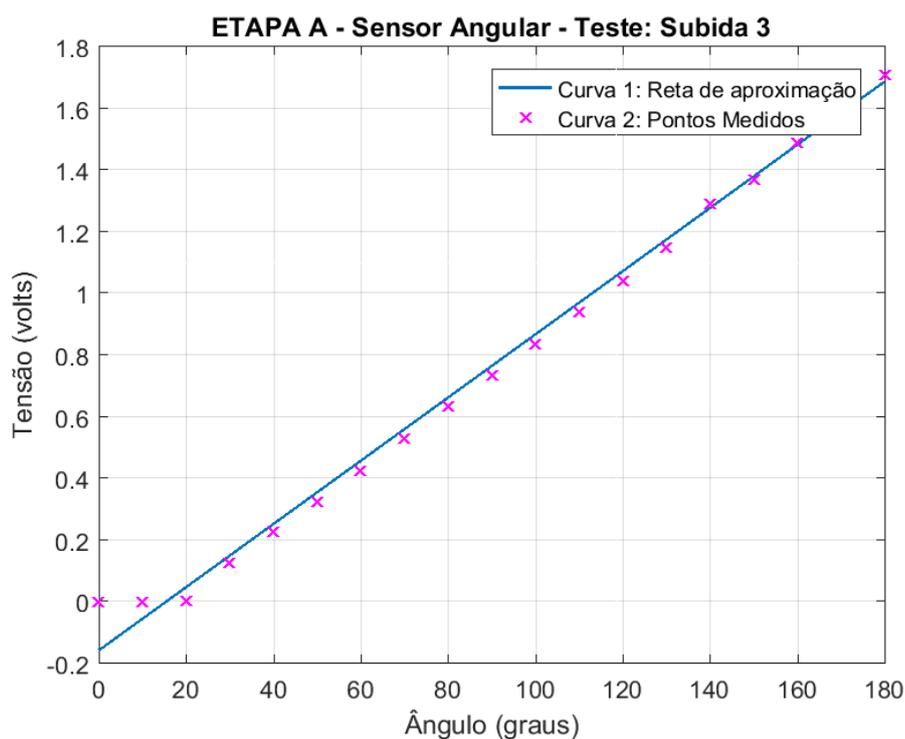


Figura 17 – Variação de ângulo *versus* geração de tensão.

Fonte: Da autora.

3.2 Desempenho de Válvulas de Controle

O bom desempenho de uma válvula de controle indica que ela, dentre outros fatores, possui estabilidade em toda faixa de operação do processo e tempo de resposta suficientemente rápido para correção dos desvios. Para alcance do bom desempenho é importante a observação e correção das seguintes falhas:

1. Folga

Ocorre devido à interrupção de movimentos da válvula em um ou mais intervalos de tempo. Este efeito é provocado pela frouxidão entre partes mecânicas do instrumento. Como consequência, a folga provoca o surgimento da zona morta, acarretando em atraso no tempo de resposta.

2. Saturação

A saturação ocorre quando o controlador exige abertura ou fechamento além do que a válvula é capaz de realizar. Esta ocorrência indica que o instrumento é limitado e não atende as especificações do processo ou ainda, pode indicar um problema no processo em si.

3. Agarramento

O agarramento, ou atrito, consiste na resistência que a válvula tem para iniciar um movimento. Segundo ATTOLINI (2014), este tipo de falha é a que tem maior ocorrência e, conseqüentemente, a que mais causa distúrbios na malha de controle. O agarramento também provoca a ocorrência de zona morta no sistema.

Sendo o agarramento o fator de falha predominante, é dado foco a ele para análise de desempenho das válvulas, sendo usados os testes de elevação e mudança de ganho do controlador para sua detecção.

3.2.1 Teste de Elevação

No teste de elevação, o objetivo é variar o sinal de entrada até o ponto em que o agarramento seja vencido, de modo a confirmar ou não sua presença. PAIOLA (2008) sugere uma seqüência de passos a serem seguidos para realização do teste:

- Passo 1: Colocar o controlador em modo de operação manual.
- Passo 2: Iniciar o armazenamento dos valores de saída do controlador associado a cada valor de saída do processo.
- Passo 3: Aumentar a saída do controlador até que a zona morta seja vencida, ou seja, até que a variável do processo sofra alteração.
- Passo 4: Aguardar a estabilidade do processo.
- Passo 5: Fazer pequenos incrementos na saída do controlador e aguardar o mesmo intervalo de tempo que no passo 4 para estabilidade da variável do processo.
- Passo 6: Repetir o passo 5 até que haja movimento da variável.

PAIOLA (2008) afirma que:

Uma vez executado o teste, deve ser possível identificar a existência do atrito e até mesmo quantificá-lo. O total de atrito estático existente na válvula pode ser obtido a partir da variação total necessária no sinal de saída do controlador para que a variável de processo seja movimentada.

3.2.2 Teste de Mudança de Ganho do Controlador

No teste de mudanças no ganho do controlador, o objetivo é a identificação de agarramento por meio de variação na saída do controlador. Quando há presença de atrito, ao ser variado o ganho do controlador haverá também grande variação da frequência de oscilação da saída. PAIOLA (2008) também sugere alguns passos que são necessários para execução do teste.

- Passo 1: Determinar tempo total de coleta de dados, nos passos 2 a 3, igual a T_t .
- Passo 2: Iniciar o armazenamento dos valores de saída do controlador associado a cada valor de saída do processo, com tempo total de 0 a T_t .
- Passo 3: Duplicar o ganho proporcional do controlador no instante de tempo T_t .
- Passo 4: Dividir pela metade o ganho proporcional do controlador no instante de tempo igual a $2T_t$.

Segundo PAIOLA (2008):

Uma vez que seja confirmada uma variação significativa na frequência do sinal da variável de processo para cada acréscimo do ganho do controlador, é possível confirmar a presença de atrito na válvula de controle desta malha.

3.3 Desempenho de Controladores

Sendo o controlador responsável pela gestão da malha, é necessário também avaliar sua eficiência, com o objetivo de verificar se ele está apto a desempenhar as funções exigidas pelo sistema. Segundo SOUZA (2007), a principal causa do fraco desempenho de uma malha de controle é a falta de adequação do controlador às mudanças impostas, tais como:

- Mudanças na produção: alteração das características dos materiais e/ou produtos utilizados na fase de projeto do controlador, ou até mesmo substituição do produto final.
- Mudanças operacionais: alteração da rotina de operação do sistema e também dos demais instrumentos que o compõe.
- Mudança de equipamentos: equipamentos substituídos na planta podem ter características diferentes dos anteriormente utilizados, o que exige avaliação de impactos de sua inserção no sistema.
- Outros fatores operacionais: falta de efetivo e qualificação de operadores, que são profissionais que atuam diretamente no sistema.

Assim, para manter o controle do sistema de forma eficiente, garantindo a qualidade do produto final, é necessário prestar atenção às condições do controlador, para que ele não perca suas características ideais. Para analisar as condições do controlador, alguns índices propostos na literatura podem ser utilizados conforme descrevem as seções seguintes.

3.3.1 Índice de Harris

O índice de Harris tem o objetivo de comparar a atuação do controlador do sistema com uma atuação em caso de variância mínima. O controlador de variância mínima é aquele em que a variável controlada alcança seu valor de *setpoint* com menor oscilação possível. Desta forma, o erro do sistema é proveniente apenas de possíveis ruídos, que são variáveis aleatórias.

Considere um sistema de controle descrito por

$$y(k+1) = a_1y(k) + b_1u(k) + \xi(k+1) \quad (3.2)$$

em que y representa o sinal de saída, u , o sinal de entrada e ξ , um ruído.

É possível observar que a saída terá a variação minimizada quando o sinal de entrada for igual ao descrito por

$$u(k) = \frac{y_{ref}(k+1) - a_1y(k)}{b_1} \quad (3.3)$$

em que y_{ref} representa o valor de *setpoint*.

Resultando em erro dependente apenas dos possíveis ruídos, conforme mostra o desenvolvimento

$$\begin{aligned} y(k+1) &= y_{ref} + \xi(k+1) \\ y(k+1) - y_{ref} &= e(k+1) \\ e(k+1) &= \xi(k+1) \end{aligned} \quad (3.4)$$

em que $e(k)$ é igual ao erro da saída.

Para aplicação do índice de Harris é preciso obter o modelo do processo e fazer uma razão entre a variância do erro produzido pelo controlador de variância mínima (simulação) e a variância do erro do controlador utilizado no processo, ou seja,

$$n = \frac{\sigma_{erro(MV)}^2}{\sigma_{erro(real)}^2} \quad (3.5)$$

em que $\sigma_{erro(MV)}^2$ é estimativa de variância mínima teórica e $\sigma_{erro(real)}^2$ é a variância real.

A partir de (3.5), pode-se observar que um valor próximo de 1 indica condições de controle eficientes e, de forma oposta, um valor próximo de 0 indica problemas de desempenho.

3.3.2 Média do Sinal de Saída

A média é um parâmetro usado para analisar o quanto a variável se dispersou do seu valor de *setpoint*. Segundo CARMO (2006), "[...] quanto maior for o valor da média do sinal de saída em relação ao valor de referência, menor a rastreabilidade que o sistema apresenta para a referência, podendo ainda a malha possuir características oscilatórias."

Em termos percentuais, o índice é descrito por

$$y_{méd}(\%) = \frac{y_{ref} - y_{méd}}{y_{ref}} \times 100 \quad (3.6)$$

em que $y_{méd}$ é o valor médio do sinal de saída.

Capítulo 4

PROPOSTA DE ROTINA DE AUDITORIA

Este capítulo é destinado a expor uma proposta de rotina de auditoria para verificação das condições de operação de sensores, válvulas de controle e controladores. São sugeridas sequências que levam à verificação e avaliação da eficiência de um sistema de controle composto por estes instrumentos.

4.1 Auditoria de Malha de Controle

O procedimento de auditoria de malha de controle tem como propósito analisar se os instrumentos estão exercendo suas funções conforme os parâmetros desejados para o processo. Portanto, é preciso que sejam conhecidas as potencialidades e limitações dos elementos do sistema.

O procedimento implementado como rotina de uma auditoria é descrito na Figura 18 e cada uma das fases propostas é discutida em detalhes nas seções seguintes.

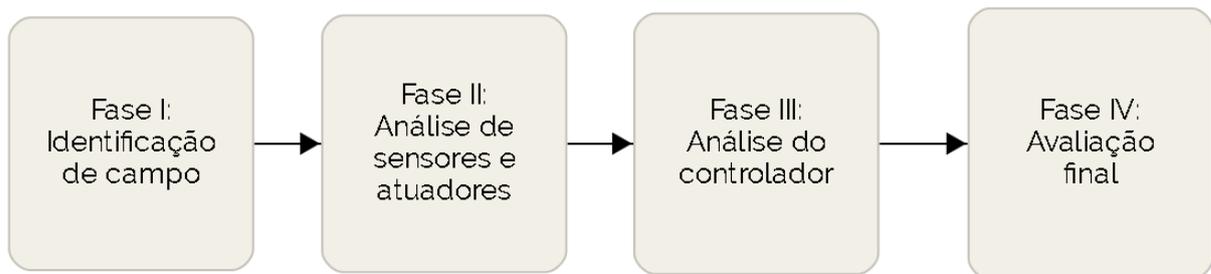


Figura 18 – Sequência para rotina de auditoria em malhas de controle.

Fonte: Da autora.

4.1.1 Fase I - Identificação de Campo

Na fase I é feito o procedimento de identificação dos elementos do sistema de controle e de seu propósito de operação. PASSOS (2009) sugere alguns documentos que podem ser confeccionados nesta etapa:

- Lista de malhas de controle: Relaciona as malhas contidas no processo e define os equipamentos que pertencem a cada uma delas.
- Lista de variáveis do processo: Relaciona as variáveis de cada malha do processo. Este documento é base fundamental para o processo de auditoria, pois as variáveis são utilizadas nos indicadores de desempenho.
- Memorial descritivo: Contém detalhes de funcionamento das etapas do processo, com definição da função de cada um dos equipamentos que o compõe.

4.1.2 Fase II - Análise de Sensores e Atuadores

Na fase II, o objetivo é obter as características de desempenho dos sensores e atuadores da malha de controle.

Inicialmente devem ser feitos testes nos instrumentos, com a injeção de sinais de entrada escolhidos aleatoriamente. Após os testes, para os sensores, basta verificar cada uma das condições apresentadas na Seção 3.1 e para os atuadores, as condições apresentadas na Seção 3.2.

A faixa de aceitação de desvios e erros dependem das condições de robustez da malha de controle analisada. Sendo importante observar também as condições impostas por órgãos de controle de qualidade de produtos, que são específicas para cada tipo de processo, por exemplo, alimentício, de saneamento e de metalurgia.

4.1.3 Fase III - Análise do Controlador

Após analisadas as condições de sensores e atuadores, o próximo passo é a verificação do nível de aceitação do controlador para a planta. Da mesma forma que na Seção 4.1.2, o primeiro passo consiste na simulação de sinais de entrada e verificação de saída.

A aplicação dos índices propostos na Seção 3.3 permitem a identificação de implementações indevidas nos blocos PID e mau dimensionamento dos demais instrumentos diretamente ligados ao controlador ou até mesmo do próprio controlador.

4.1.4 Fase IV - Avaliação Final

Por fim, os resultados obtidos nas fases de auditoria descritas nos tópicos 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 devem ser analisados de forma conjunta e sequencial.

Se identificadas irregularidades ou desvios acima do padrão permitido pelo sistema e órgãos de fiscalização competentes, devem ser feitas tarefas de manutenção e calibração dos sensores e atuadores. Em seguida, deve-se proceder nova análise, conforme descrevem os tópicos 4.1.2 e 4.1.3. Se os desvios persistirem com valores não ideais, deve-se considerar a substituição do equipamento.

Quando não são mais identificadas irregularidades com sensores e atuadores, devem ser feitas correções dos erros presentes no controlador.

As correções dos demais instrumentos podem ou não serem suficientes para que o controlador passe a funcionar de forma confiável. Então basta realizar novo teste, conforme descreve o item 4.1.3. Se os desvios persistirem, é necessário reavaliar as condições de lógica de controle e também a suportabilidade do controlador às necessidades do sistema.

Capítulo 5

ESTUDO DE CASO

Este capítulo tem por finalidade apresentar uma das malhas da planta didática Smar PD3, localizada no Laboratório de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto, Campus - João Monlevade, bem como a aplicação da rotina de auditoria proposta. Além disto, é feita a identificação do modelo matemático da malha, por meio de técnicas específicas que também são descritas neste capítulo.

5.1 Apresentação

A fim de verificar a eficiência da rotina de auditoria proposta, foi feita sua aplicação em uma das malhas da planta didática Smar PD3. A malha escolhida é ilustrada na Figura 19, cujo processo consiste no controle do nível e temperatura da água dentro do reservatório.

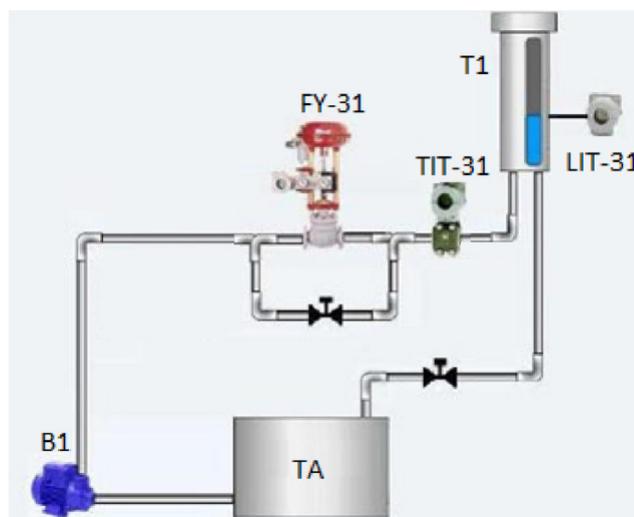


Figura 19 – Malha de controle de nível e temperatura.

Fonte: Adaptado de ??).

5.2 Modelagem da Malha de Controle

Para análise de desempenho do controlador e para realização dos testes de agarramento da válvula, é preciso que sejam determinados os ganhos proporcional, integral e derivativo da estratégia de controle tipo PID. Por se tratar de uma malha de controle didática, não existe um controlador específico aplicado a ela, ficando a disposição dos alunos a implementação desejada. Então, foi preciso inicialmente determinar os ganhos de um controlador para em seguida proceder a auditoria. Entretanto, para sintonia da estratégia PID, é preciso que seja conhecido o modelo matemático da malha, que também foi determinada na realização deste trabalho.

Por não serem o objetivo principal do processo de auditoria, as tarefas de identificação e sintonia da malha de controle não são detalhadamente expostas. Será feito apenas o desenvolvimento dos métodos específicos utilizados para tais tarefas.

5.2.1 O Modelo ARMAX

Segundo AGUIRRE (2007), o modelo geral de um sistema tem a forma descrita por

$$\begin{aligned} y(k) &= \frac{B(q)}{F(q)A(q)}u(k) + \frac{C(q)}{D(q)A(q)}v(k) \\ y(k) &= H(q)u(k) + G(q)v(k), \end{aligned} \quad (5.1)$$

sendo q^{-1} o operador de atraso, $v(k)$ um ruído branco e $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$, $D(q)$ e $F(q)$ os polinômios

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 - a_1q^{-1} - \dots - a_{n_y}q^{-n_y}; \\ B(q) &= b_1q^{-1} + \dots + b_{n_u}q^{-n_u}; \\ C(q) &= 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{n_v}q^{-n_v}; \\ D(q) &= 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_{n_d}q^{-n_d}; \\ F(q) &= 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{n_f}q^{-n_f}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

A função $H(q)$ é dita função do processo e $G(q)$ função do ruído.

O modelo ARMAX (*Autoregressive Moving Average with Exogenous Inputs*) é obtido a partir do modelo dado em (5.1), tomando-se $D(q) = F(q) = 1$, o que resulta em

$$\begin{aligned} y(k) &= \frac{B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{C(q)}{A(q)}v(k) \\ y(k) &= H(q)u(k) + e(k) \end{aligned} \quad (5.3)$$

sendo $e(k)$ um ruído não branco, conforme mostra a Figura 20, em que pode-se notar que o erro está contido na equação.

O método utilizado para estimar os polinômios A , B e C foi o de mínimos quadrados estendidos, por ser um método que inclui, além de regressores do processo, regressores de erros.

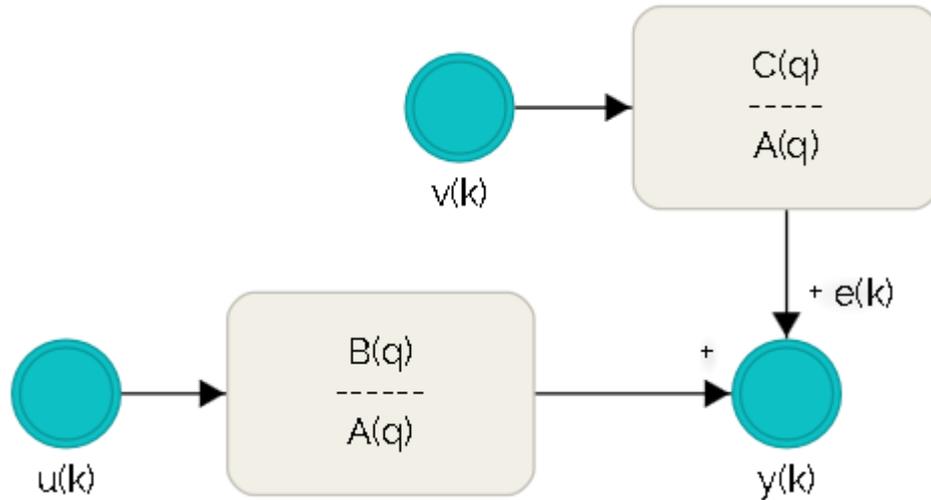


Figura 20 – Representação do modelo ARMAX.

Fonte: Da autora.

A aplicação do modelo ARMAX para a malha de controle escolhida resultou na função

$$y(k) = 1,1318y(k-1) - 0,1404y(k-2) + 0,0057u(k-1) + 0,0214u(k-2) + e(k) \quad (5.4)$$

O gráfico da resposta ao degrau unitário da função de transferência da malha, com tempo de amostragem igual a 5,16 segundos, apresentado na Figura 21, mostra que se trata de um sistema estável.

A partir do modelo obtido, é preciso determinar um controlador de variância mínima, para que seja calculada a variância de seu erro, a ser aplicada no índice de Harris. Considerando o polinômio B igual a

$$B(q) = b_1 + \dots + b_{n_u} q^{-n_u+1}; \quad (5.5)$$

pode-se reescrever a equação geral do modelo ARMAX da forma

$$\begin{aligned} A(q^{-1})y(k) &= q^{-1}B(q^{-1})u(k) + C(q^{-1})v(k) \\ y(k) &= q^{-1}\frac{B}{A(q^{-1})}u(k) + \frac{C}{A(q^{-1})}v(k) \end{aligned} \quad (5.6)$$

De acordo com a teoria do controlador de variância mínima, o que se deseja é eliminar erros que não sejam provenientes de possíveis ruídos, pois são variáveis aleatórias. Então, pode-se reescrever a dinâmica do erro como composta por duas parcelas

$$C(q^{-1}) = AJ + q^{-1}G \quad (5.7)$$

em que J representa a parcela do ruído que o controlador não é capaz de anular, enquanto G representa a parcela do ruído que pode ser cancelada pelo controlador.

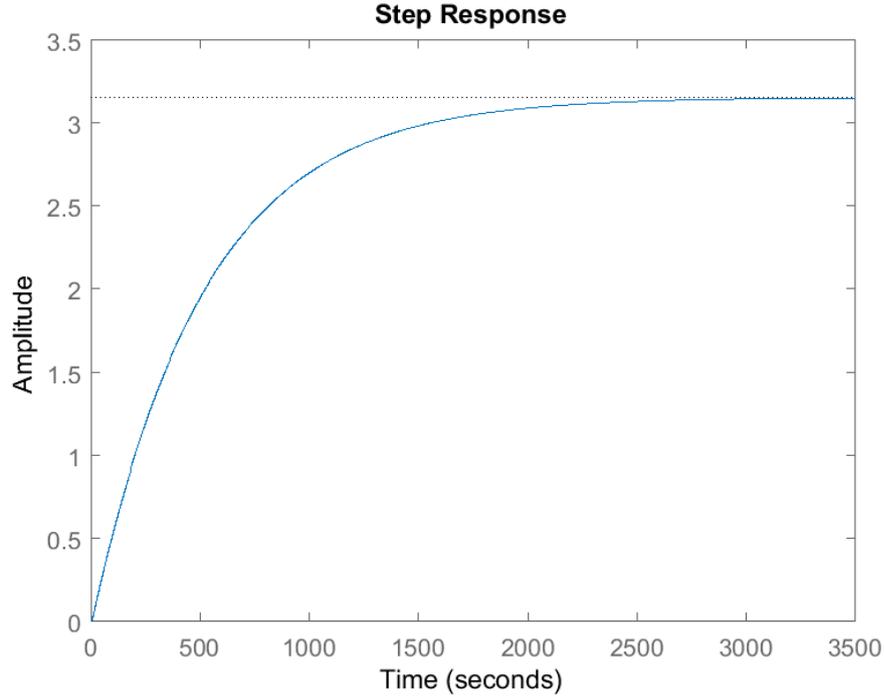


Figura 21 – Resposta ao degrau da equação da malha de controle de nível e temperatura.

Fonte: Da autora.

De (5.6) tem-se que

$$v(k) = \frac{Ay(k) - q^{-1}Bu(k)}{C}, \quad (5.8)$$

que resulta na equação geral do modelo igual a

$$y(k) = q^{-1}\frac{B}{A}u(k) + q^{-1}\frac{G}{A}\frac{Ay(k) - q^{-1}Bu(k)}{C} + Jv(k). \quad (5.9)$$

Sabendo que

$$e(k) = r(k) - y(k), \quad (5.10)$$

em que r é o sinal de *setpoint*, pode-se reescrever (5.10) na forma

$$\begin{aligned} e(k) &= r(k) - q^{-1}\frac{G}{C}y(k) - Jv(k) - u(k)\left(q^{-1}\frac{B}{A} - q^{-2}\frac{GB}{AC}\right) \\ e(k) &= -Jv(k) + q^{-1}\left(qr(k) - \frac{G}{C}y(k) - u(k)\left(\frac{B}{A} - q^{-1}\frac{GB}{AC}\right)\right). \end{aligned} \quad (5.11)$$

Para que os erros no sistema de controle sejam provenientes apenas de possíveis ruídos, é preciso que a parcela

$$qr(k) - \frac{G}{C}y(k) - u(k)\left(\frac{B}{A} - q^{-1}\frac{GB}{AC}\right), \quad (5.12)$$

seja nula, ou seja,

$$e(k) = -Jv(k) \quad (5.13)$$

Assim, é possível mostrar que, a variância mínima pode ser calculada como

$$\sigma_{erro(MV)}^2 = \sigma_v^2(j_0^2 + j_1^2 + \dots + j_n^2) \quad (5.14)$$

em que j_k são os termos que compõem o polinômio J .

Na prática, a implementação do controlador de variância mínima não é conveniente, por exigir um esforço de controle muito grande. Para exemplificar, pode-se considerar a função

$$y(k) = 0,9144y(k-1) - 0,1013u(k-1) + 0,0034u(k-1)u(k-1) \quad (5.15)$$

que foi obtida por ??) e descreve o comportamento da malha de controle apresentada na Seção 5.1. Para efeitos de comparação da aplicação do controlador de variância mínima com um outro controlador, escolhido de forma empírica, foi feita uma simulação, cujos resultados são mostrados na Figura 22. Vale ressaltar que a parcela $0,0034u(k-1)u(k-1)$ da função da malha foi suprimida por apresentar valor bem pequeno.

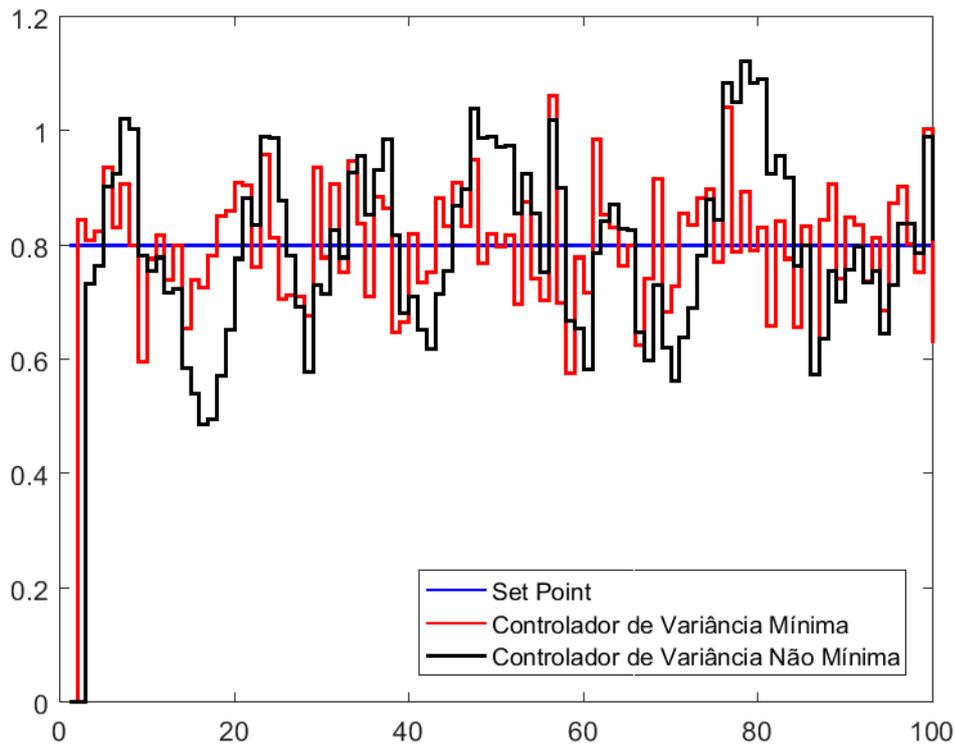


Figura 22 – Comparação entre controladores.

Fonte: Da autora.

Os resultados confirmam a teoria de que a aplicação de um controlador de variância mínima provoca menor variação do sinal de saída em torno do valor de referência, por outro lado, ao sinal de entrada é exigido um esforço maior, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Variâncias dos sinais de entrada e saída.

Controlador	Variância de Saída	Variância de Entrada
Variância Não Mínima	4.396332e-02	8.612504e-02
Variância Mínima	1.040860e-02	8.629373e-01

Fonte: Do Autor.

Note que foi exigido ao controlador de variância mínima uma variação do sinal de entrada de cerca de dez vezes maior que ao sinal de entrada do controlador de variância não mínima.

5.3 Projeto de Controlador PID via *Sisotool*

O projeto do controlador PID foi feito diretamente na plataforma Sisotool do Matlab, com a escolha das condições (em relação a resposta entrada *versus* saída):

- Tempo de assentamento entre 10 e 15 minutos.
- Sobressinal máximo de 10%.
- Resposta ao degrau típica de um sistema de primeira ordem, por apresentar menor oscilação.

Desta forma, os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 3 – Ganhos do controlador PID da malha.

Ganho	Valor
K_p	1,94
K_d	0,0086
K_i	4,95

Fonte: Da autora.

A resposta ao degrau para este controlador é apresentada na Figura 23. A Figura 24 mostra que o diagrama de Bode para a relação entrada-saída apresenta margens de fase e ganho positivas, confirmando a estabilidade do controlador.

5.4 Aplicação da Rotina de Auditoria Proposta

A rotina de auditoria proposta foi aplicada à malha de controle apresentada na Seção 5.1, e foram obtidos os resultados apresentados nas seções a seguir.

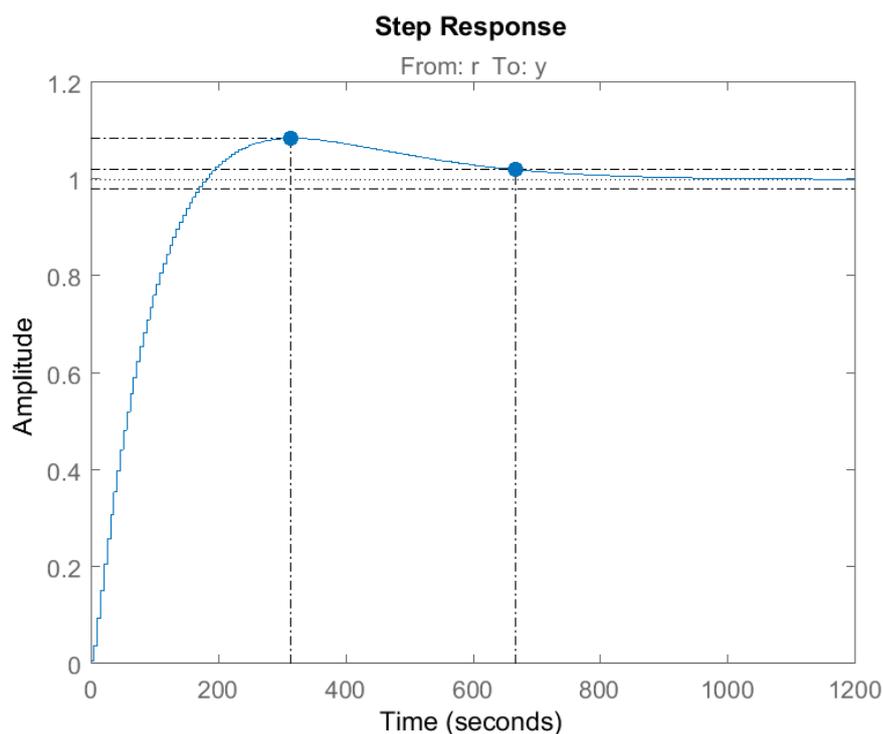


Figura 23 – Resposta ao degrau do controlador.

Fonte: Da autora.

Por falta de recursos, não foi possível efetuar a correção dos problemas detectados nos sensores para, em seguida, proceder a análise de desempenho do controlador, conforme propõe a rotina de auditoria apresentada no capítulo anterior.

5.4.1 Fase I - Identificação de Campo

Conforme proposto na Seção 4.1.1, os documentos confeccionados descrevem:

- Lista de malhas de controle

Como já apresentado na Seção 5.1, o sistema escolhido para aplicação da rotina de auditoria proposta possui apenas uma malha de controle, cujos instrumentos auditados estão descritos na Tabela 4.

- Lista de variáveis do processo

As variáveis contidas na malha auditada são nível e temperatura. O nível é medido em porcentagem, 0 a 100% do reservatório, e a temperatura da água em graus Celsius, com *range* de -40 a 85 graus.

- Memorial descritivo

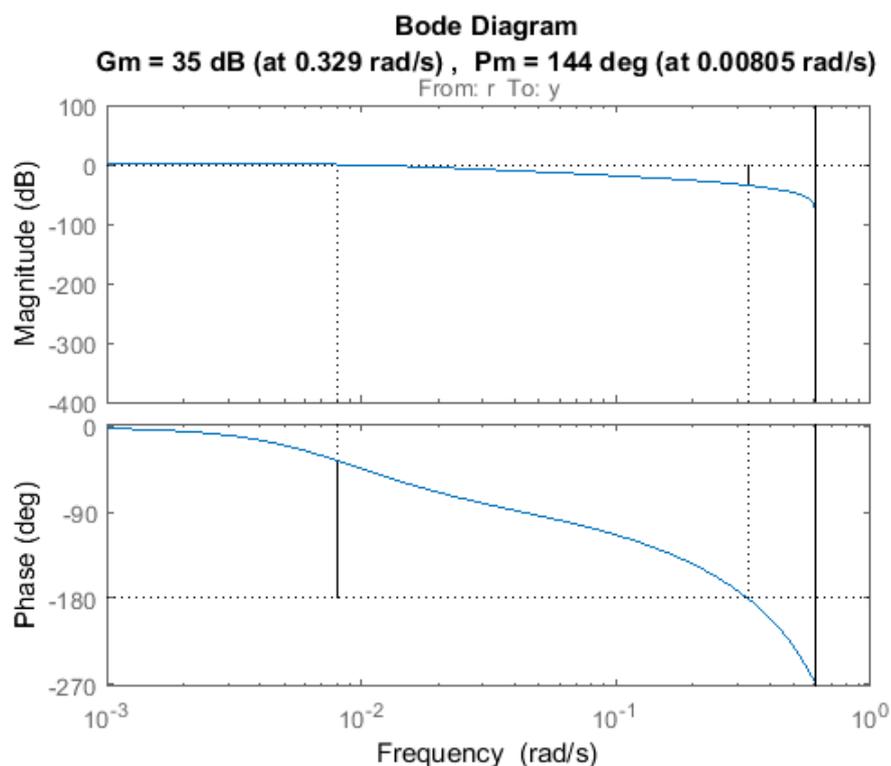


Figura 24 – Diagrama de Bode do controlador.

Fonte: Da autora.

Tabela 4 – Instrumentos da malha de controle auditada.

Instrumento	Descrição
Controlador DF75 - HSE Logic Processor	Controlador utilizado para associar o controle discreto ao controle contínuo, utilizando blocos funcionais, e permitir comunicação entre os dispositivos de campo.
Instrumento de nível	Transmissor indicador de nível do tipo célula de pressão.
Instrumento de temperatura	Transmissor indicador de temperatura que utiliza como sensor um termoresistor de platina (Pt100).
Válvula de controle	Tipo globo com atuador pneumático.

Fonte: Da autora.

A bomba (B1) retira água do tanque (TA) e manda ao reservatório (T1), que possui duas alternativas de entrada, pela válvula (FY-31) ou direta (*bypass*). Quando escolhida a passagem pela válvula, é possível limitar a entrada de água no reservatório, de acordo com as restrições impostas pelo controlador. O comando de controle para a válvula ocorre em porcentagem de abertura, com valores de 0 a 100%. O transmissor indicador de nível (LIT-31) faz a medição do nível instantâneo no reservatório, que

comumente é a medição usada para limitar a abertura da válvula. O transmissor indicador de temperatura (TIT-31) tem a função de medir a temperatura da água do reservatório.

5.4.2 Fase II - Análise de Sensores e Atuadores

Na segunda fase são analisadas as características impostas na Seção 3.1 para os sensores de nível e temperatura e na Seção 3.2 para a válvula de controle.

Vale ressaltar que, por se tratar de uma malha projetada para fins de estudo, os parâmetros *range* e *span* atenderam aos limites desejados, não acarretando em empecilhos para as faixas dos testes realizados. Normalmente, o *range* e o *span* devem ser verificados quando há necessidade de alteração na produção de uma malha, em que seja preciso aumentar quantidades de materiais.

Para os sensores de nível e temperatura, considera-se tolerância do desvio padrão aceitável igual a 2%, para análise de precisão. Quanto à exatidão, os instrumentos são considerados exatos, quando o desvio da média em relação ao valor real é de 0,1%. Para o sensor de temperatura, a média considerada é a do sensor de referência.

Para a avaliação do instrumento de temperatura, o sensor de referência utilizado deveria ter sido submetido a condições de calibração que garantissem sua exatidão e precisão, entretanto, não houve disponibilidade de recursos para tal procedimento. Desta forma, neste trabalho, foi realizada uma adaptação, considerando que o instrumento de referência fornece uma medição bem próxima ao valor real.

5.4.2.1 Sensor de Nível

No sensor de nível foram realizados seis testes, tendo como valores de *setpoint* escolhidos 15%, 35%, 40%, 65%, 80% e 95%. Para cada teste são apresentados três gráficos diferentes. O primeiro mostra o valor das medições instantâneas, o segundo o módulo da diferença entre o valor instantâneo e o valor médio da amostra e, no terceiro, têm-se o histograma, juntamente com a distribuição gaussiana.

Como referência para o *setpoint*, a medição foi feita na régua paralela ao reservatório, conforme mostra a Figura 25, em que pode-se observar a medição para 80% do reservatório cheio. Ainda nesta figura, paralela ao tanque e a régua, pode-se notar uma mangueira preta, que foi usada para introdução do sensor de referência nos testes de temperatura, cujos detalhes ainda serão tratados.

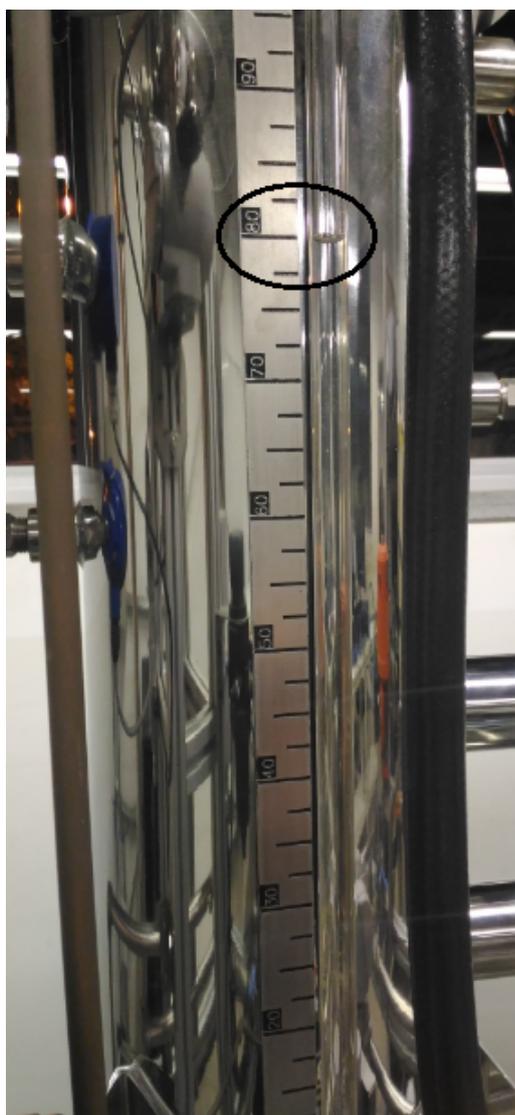


Figura 25 – Detalhe da régua paralela ao reservatório.

Fonte: Da autora.

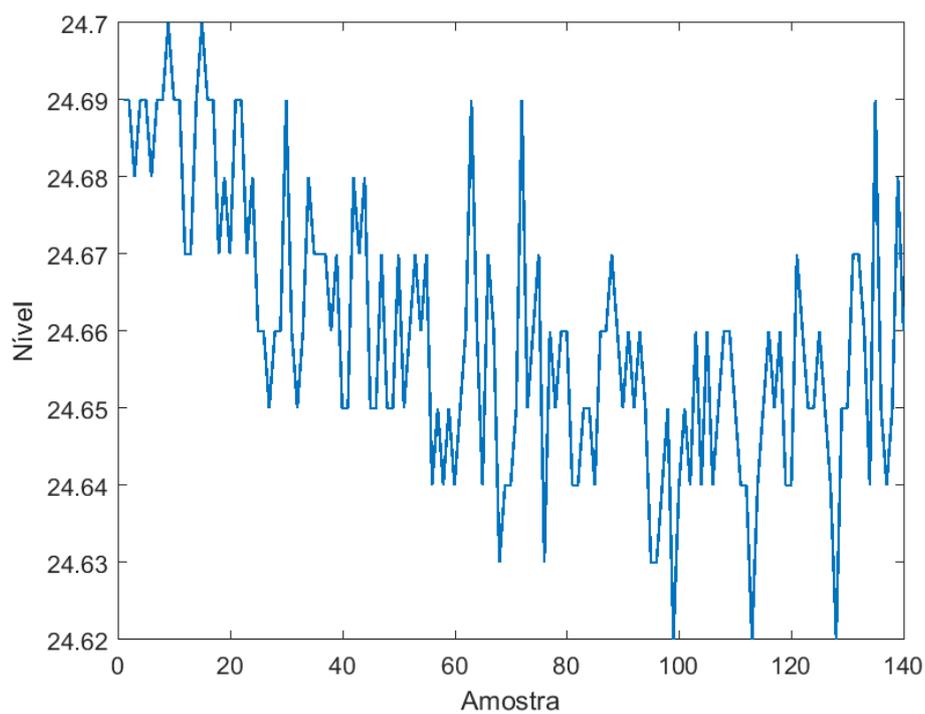


Figura 26 – Medição de nível com *setpoint* de 15%.

Fonte: Da autora.

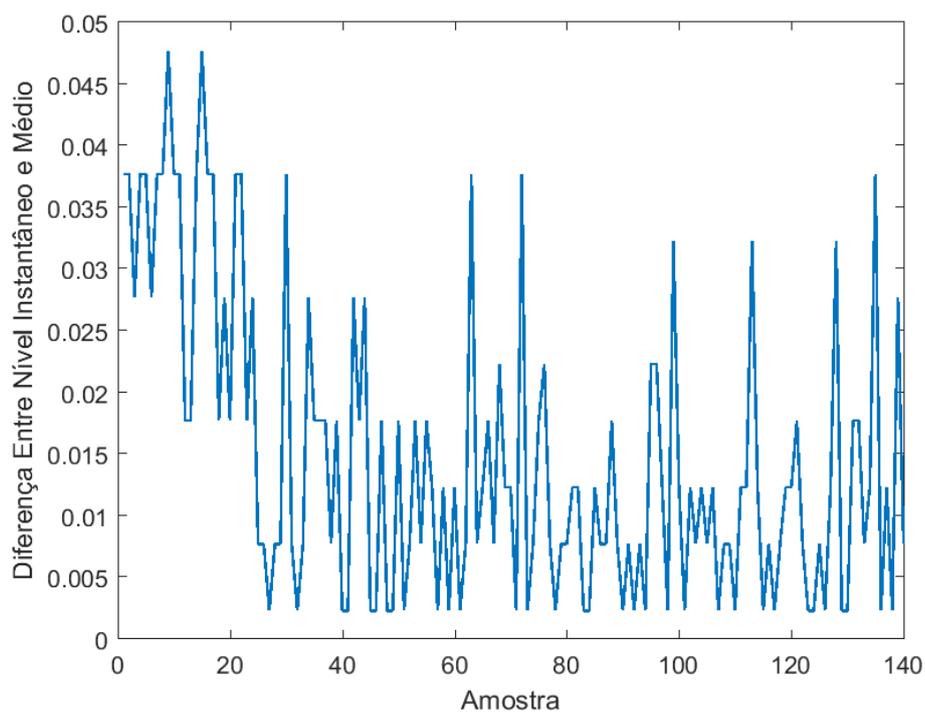


Figura 27 – Diferença entre nível instantâneo e médio com *setpoint* de 15%.

Fonte: Da autora.

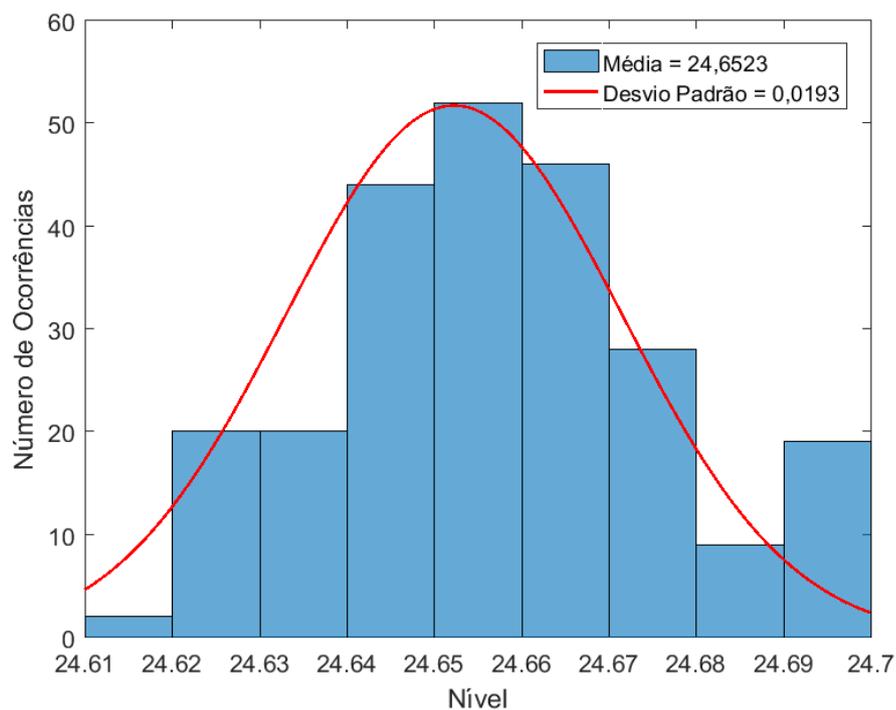


Figura 28 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com *setpoint* de 15%.

Fonte: Da autora.

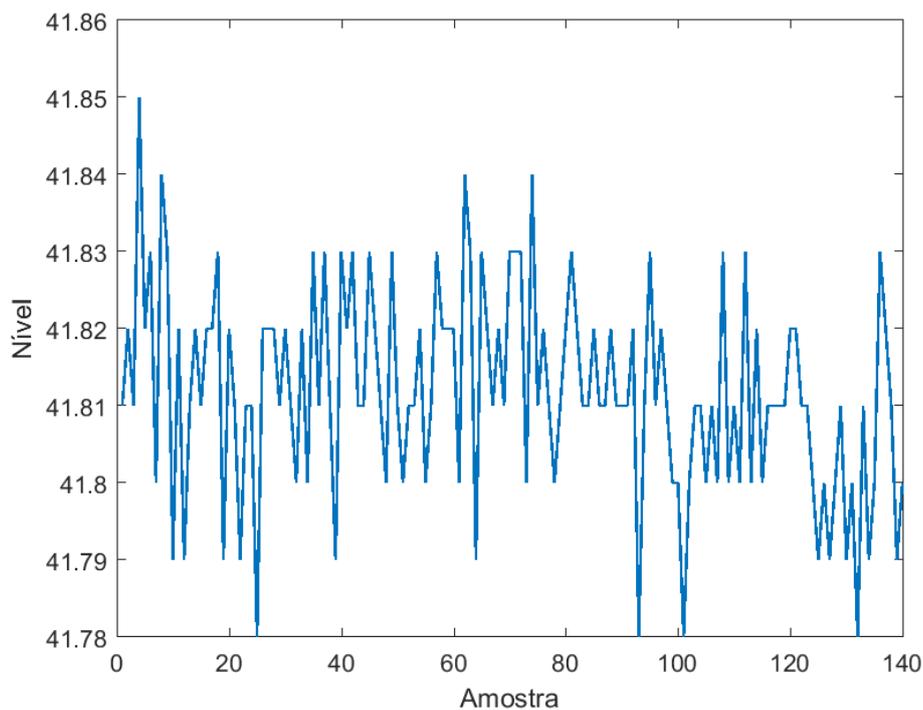


Figura 29 – Medição de nível com *setpoint* de 35%.

Fonte: Da autora.

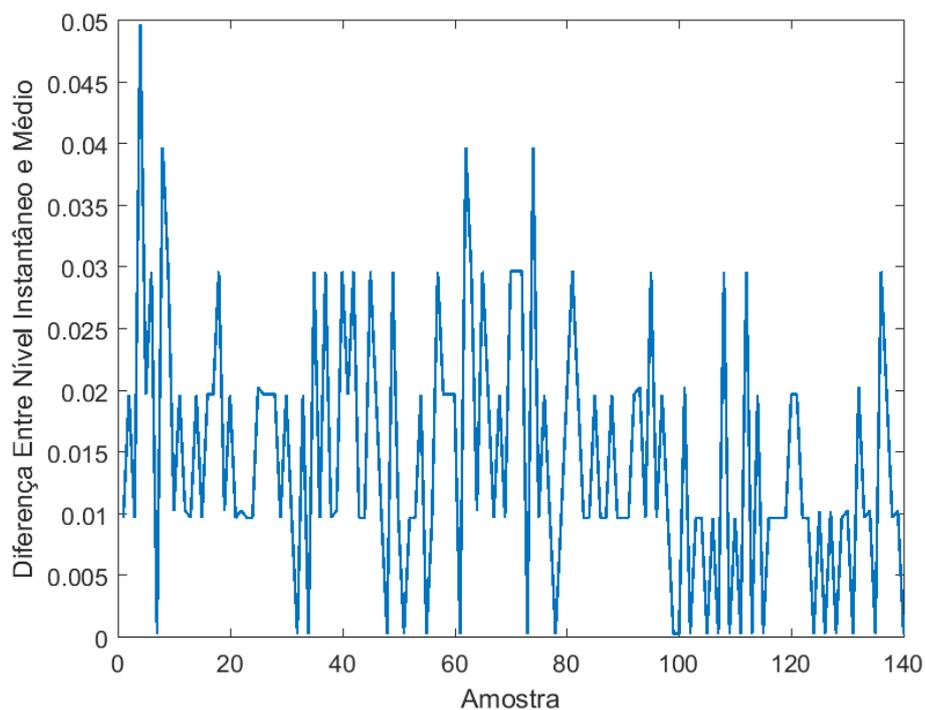


Figura 30 – Diferença entre nível instantâneo e médio com *setpoint* de 35%.

Fonte: Da autora.

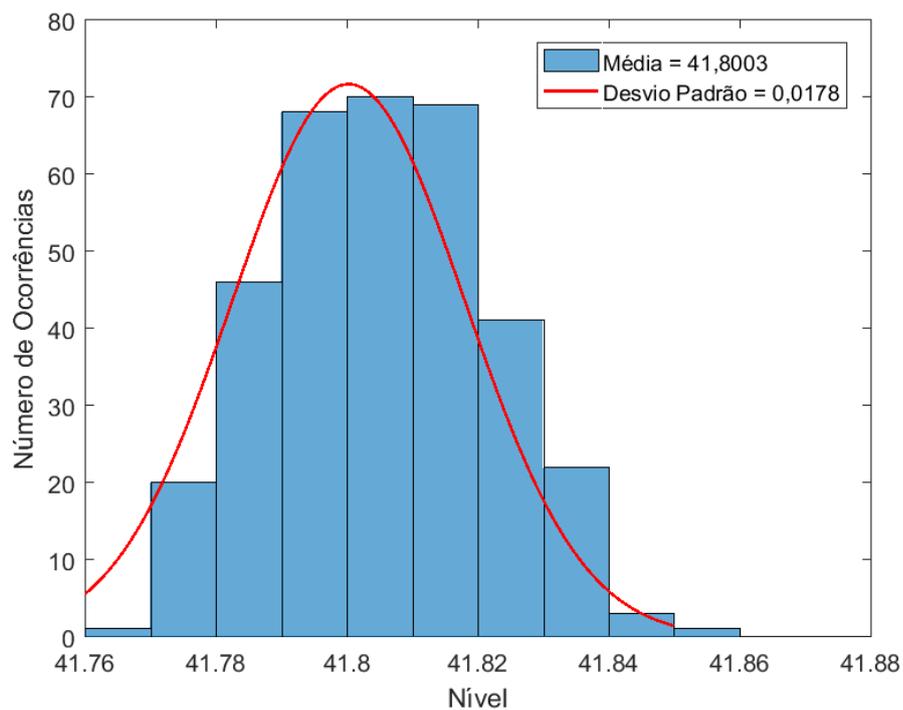


Figura 31 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com *setpoint* de 35%.

Fonte: Da autora.

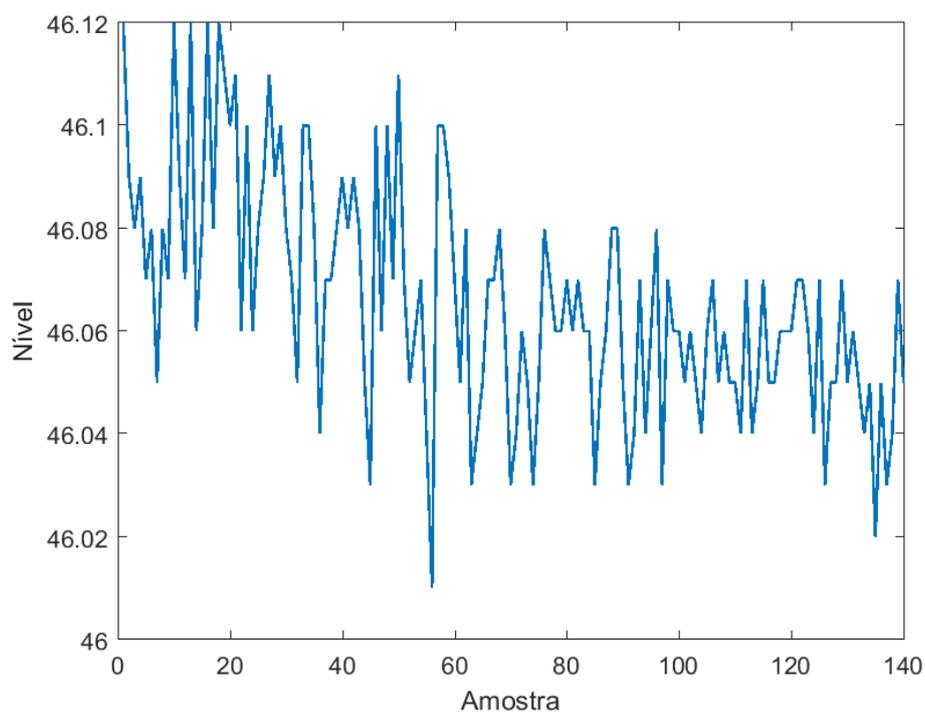


Figura 32 – Medição de nível com *setpoint* de 40%.

Fonte: Da autora.

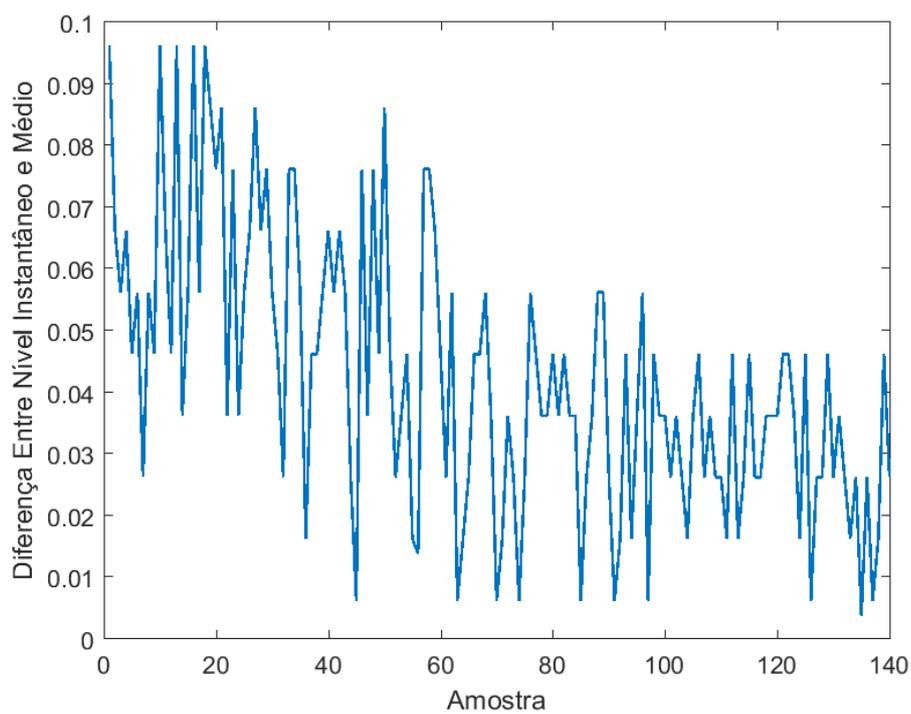


Figura 33 – Diferença entre nível instantâneo e médio com *setpoint* de 40%.

Fonte: Da autora.

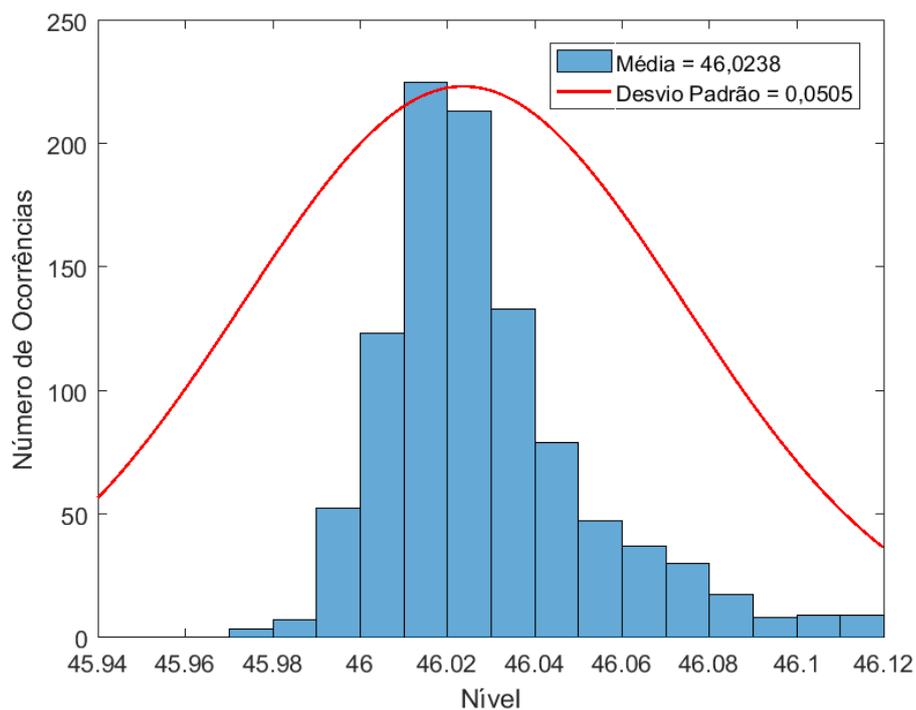


Figura 34 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com *setpoint* de 40%.

Fonte: Da autora.

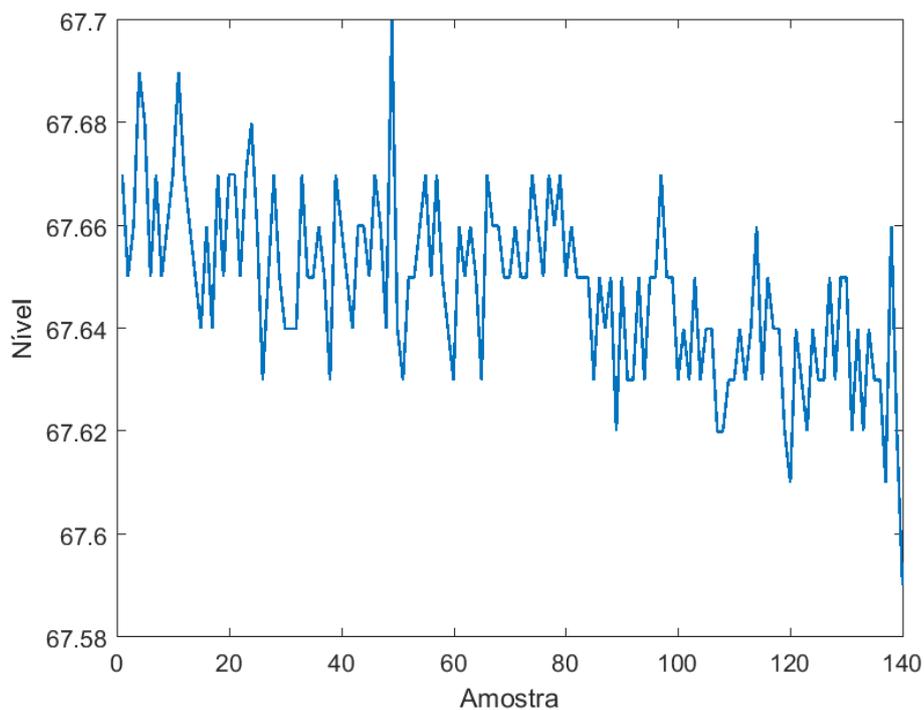


Figura 35 – Medição de nível com *setpoint* de 65%.

Fonte: Da autora.

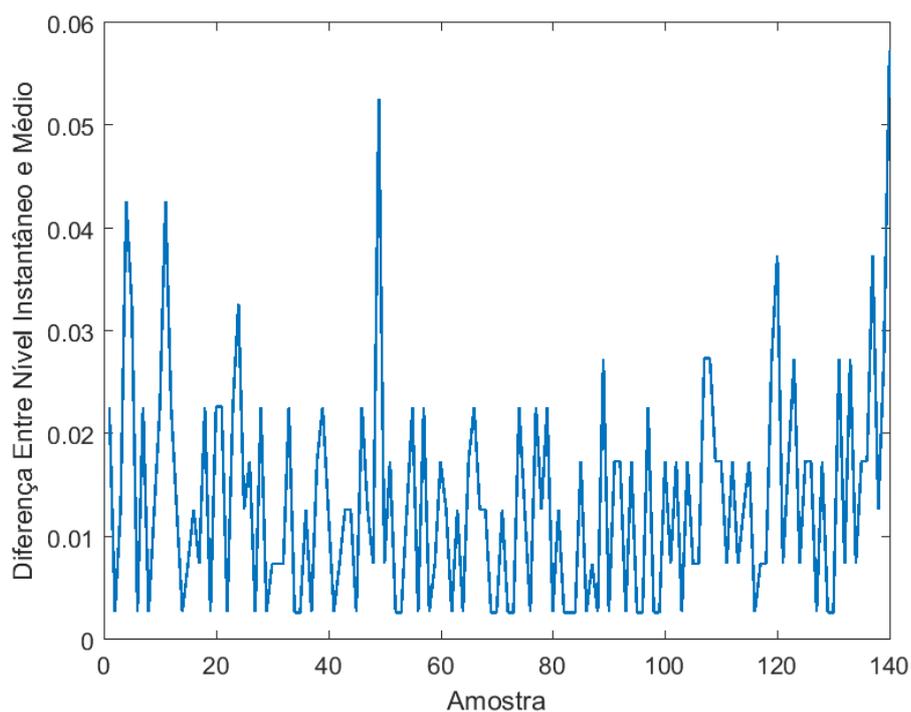


Figura 36 – Diferença entre nível instantâneo e médio com *setpoint* de 65%.

Fonte: Da autora.

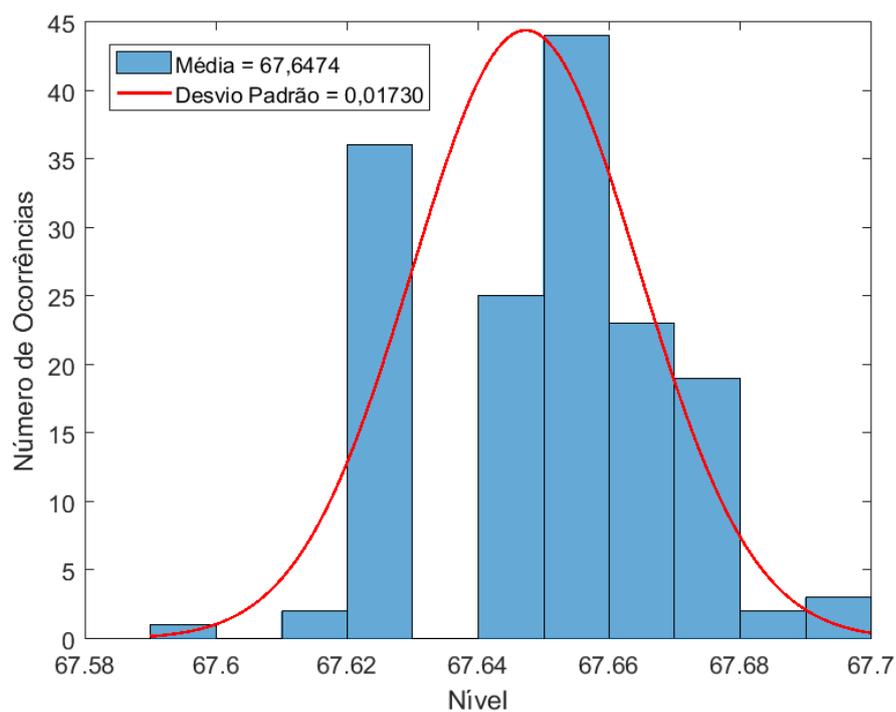


Figura 37 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com *setpoint* de 65%.

Fonte: Da autora.

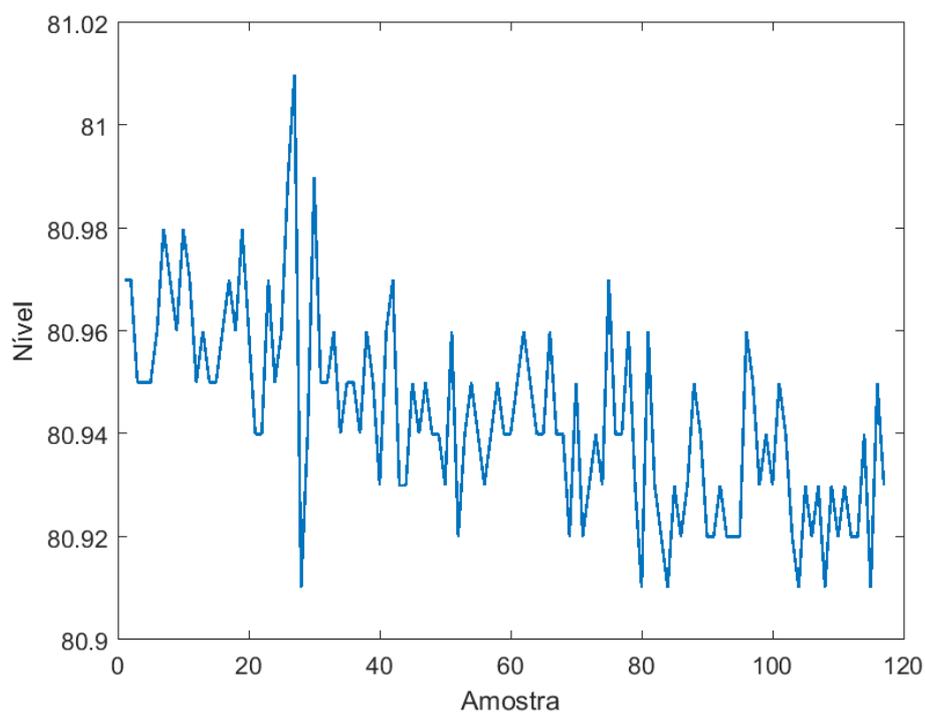


Figura 38 – Medição de nível com *setpoint* de 80%.

Fonte: Da autora.

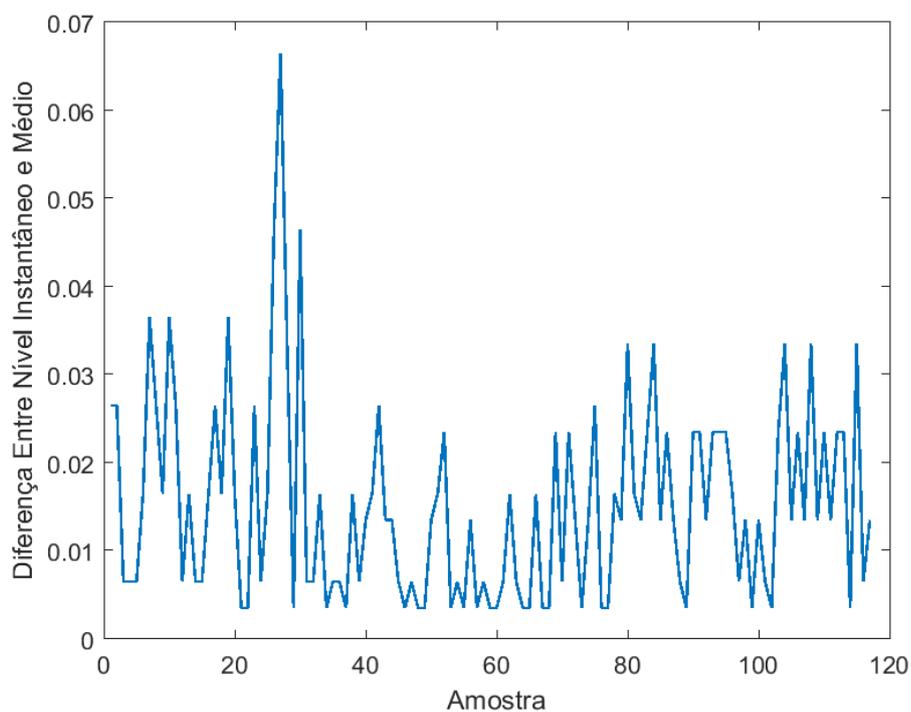


Figura 39 – Diferença entre nível instantâneo e médio com *setpoint* de 80%.

Fonte: Da autora.

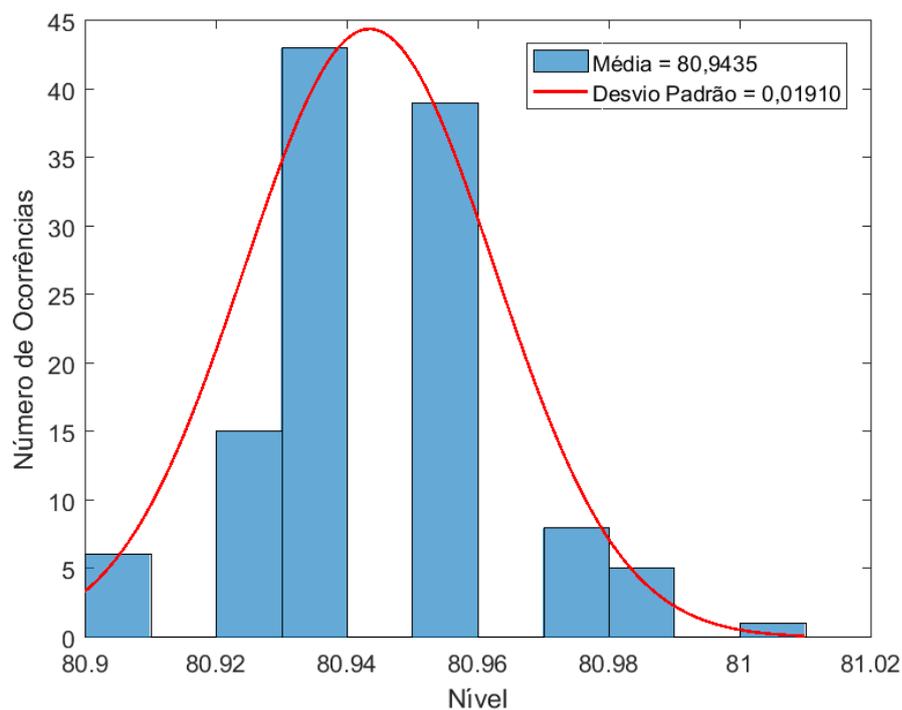


Figura 40 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com *setpoint* de 80%.

Fonte: Da autora.

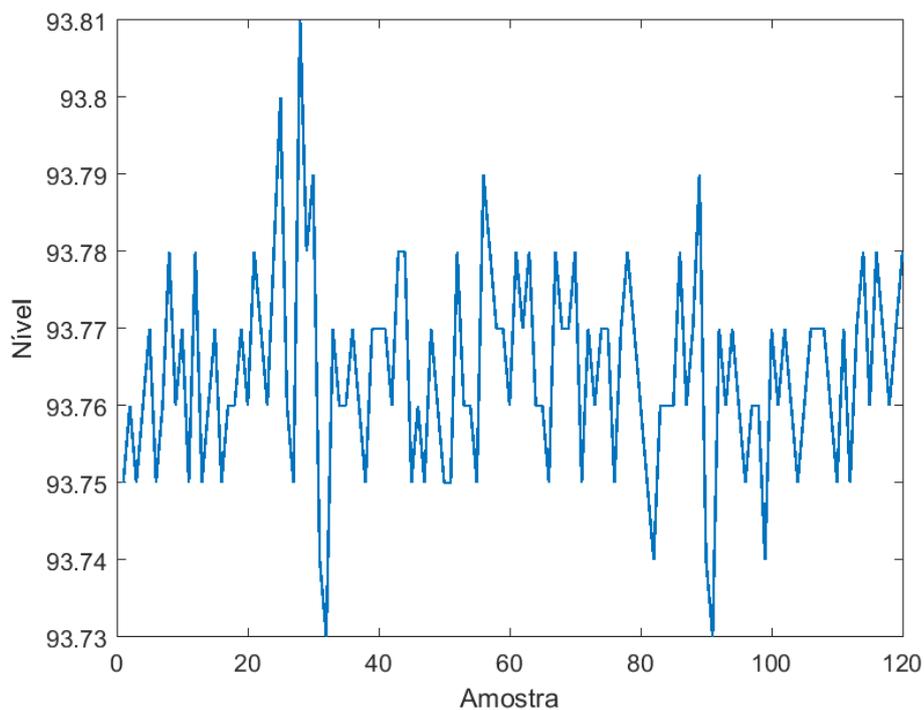


Figura 41 – Medição de nível com *setpoint* de 95%.

Fonte: Da autora.

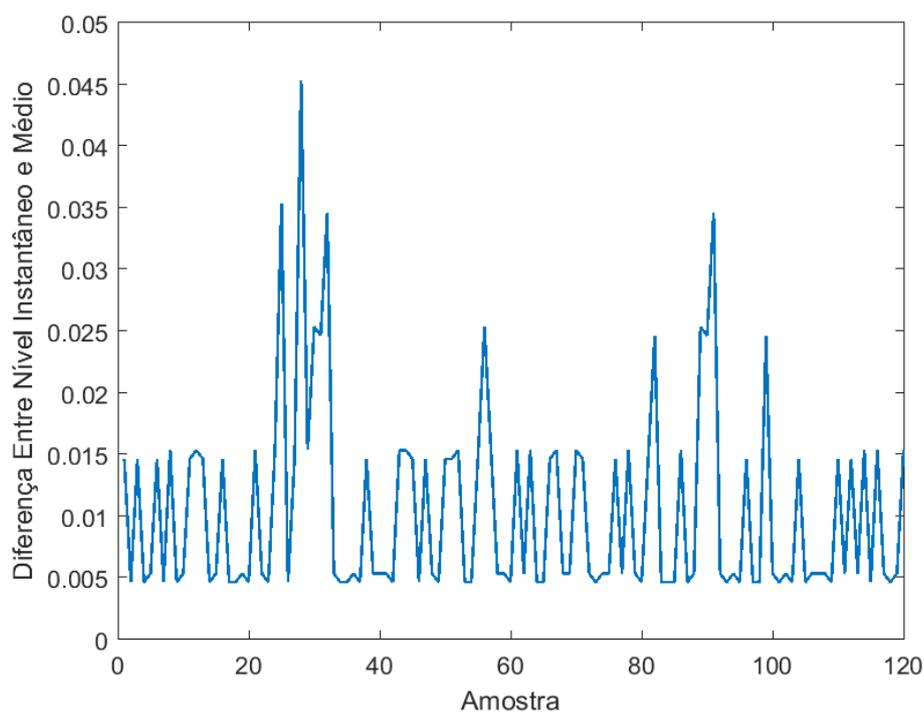


Figura 42 – Diferença entre nível instantâneo e médio com *setpoint* de 95%.

Fonte: Da autora.

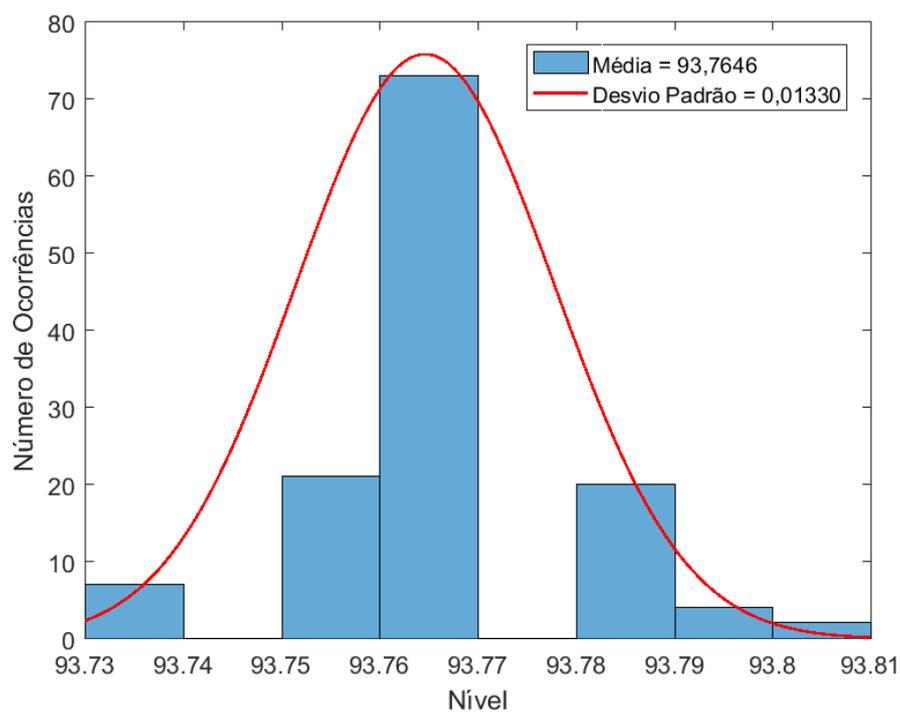


Figura 43 – Histograma e distribuição para o sensor de nível com *setpoint* de 95%.

Fonte: Da autora.

Para facilitar a interpretação dos resultados, eles são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados dos testes de medição de nível.

Parâmetro	Setpoint de Teste					
	15%	35%	40%	65%	80%	95%
É exato?	Não	Não	Não	Não	Não	Não
É preciso?	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Range e Span atenderam?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Possui zona morta?	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Desvio padrão (%)	1,93%	1,78%	4,82%	1,73%	1,91%	1,33%

Fonte: Da autora.

O instrumento auditado não apresentou valor exato para todos os valores de *setpoint* testados, eliminando assim a chance de ser classificado como um sensor capaz de fornecer resultados adequados para o sistema de controle. Pode-se notar também que valores menores de *setpoint* implicaram em valores maiores de desvio padrão, com exceção ao *setpoint* de 80%, e que, para quase todas as medições, com exceção a de 40%, o instrumento apresentou boa precisão. Portanto, a conclusão final é que, como há boa precisão e não há zona morta, falta calibração ao sensor.

5.4.2.2 Sensor de Temperatura

Da mesma forma que para o sensor de nível, foram realizados seis testes no sensor de temperatura. Neste caso, não houve a determinação de um *setpoint* específico, mas sim a comparação com um sensor de referência externo. O sensor escolhido foi o DS18B20, que possui *range* de -55 a 125 graus Celsius, cujo detalhe e esquema de ligação é mostrado na Figura 44.

A Figura 45 mostra o detalhe da introdução do sensor referência na mangueia paralela ao reservatório, cuja leitura foi feita com uso do microcontrolador Arduíno Nano. A Figura 46 tem o objetivo de mostrar que foi preciso manter o circuito de medição ligado a um computador para armazenar os valores de temperatura lidos pelo sensor de referência.

Para este instrumento não é conveniente a avaliação quanto a presença de zona morta, pois, apesar de estar no mesmo nível do reservatório, a água contida na mangueira em que foi introduzido o sensor de referência apresenta um pequeno gradiente de temperatura em relação à interna do reservatório. Portanto, considera-se que para a faixa de testes realizados, em todos os ensaios, não há presença de zona morta.

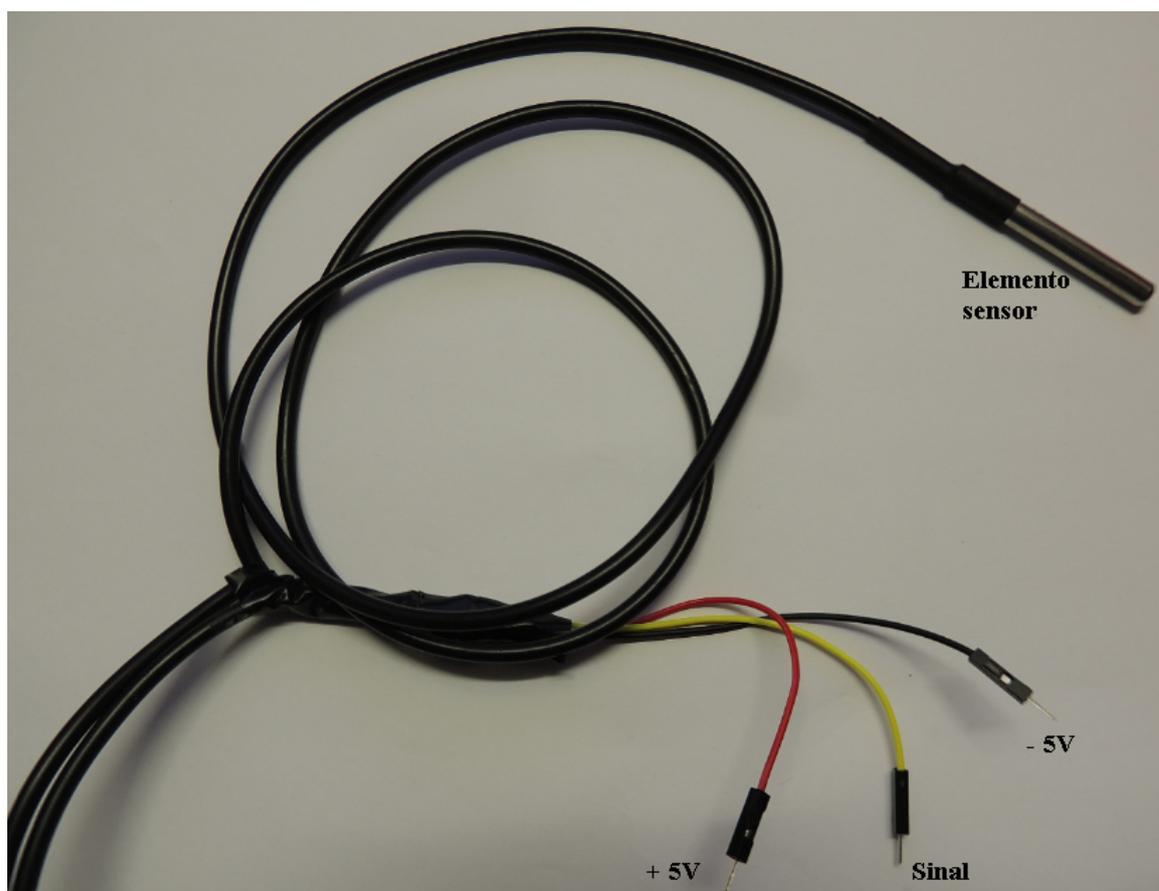


Figura 44 – Sensor de referência usado nos testes de temperatura.

Fonte: Da autora.

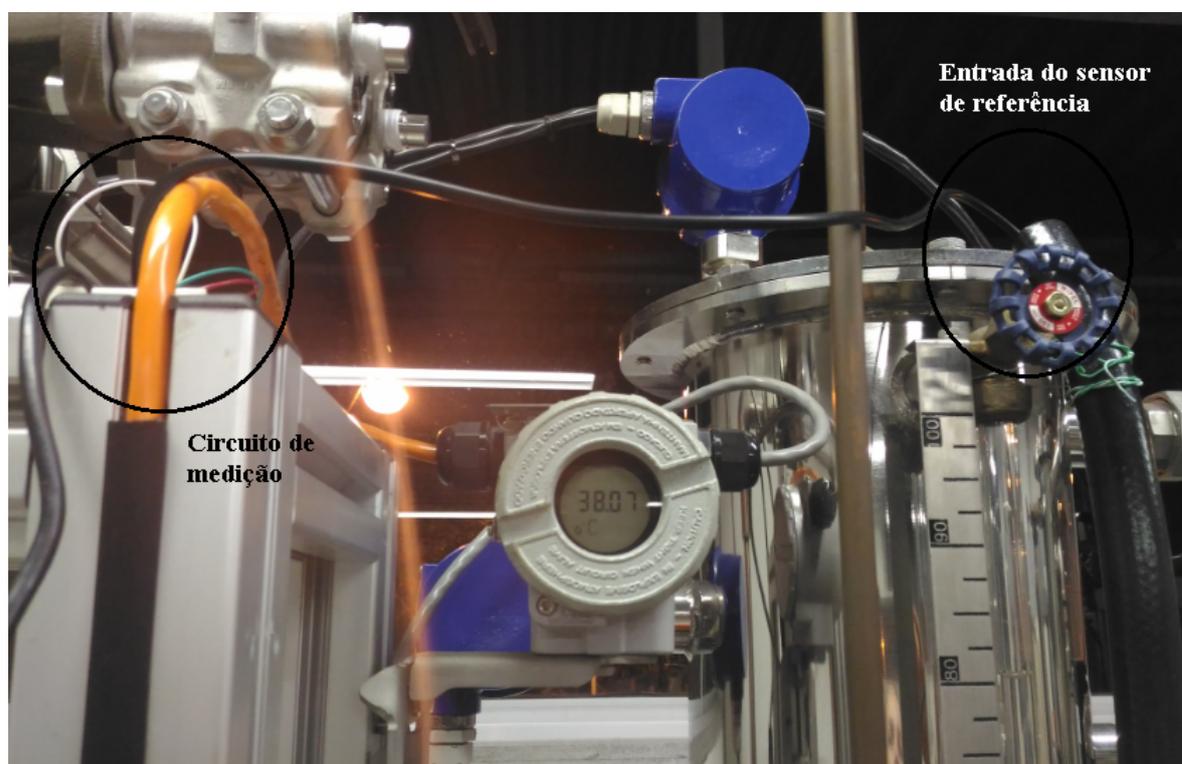


Figura 45 – Introdução do sensor de referência na malha.

Fonte: Da autora.

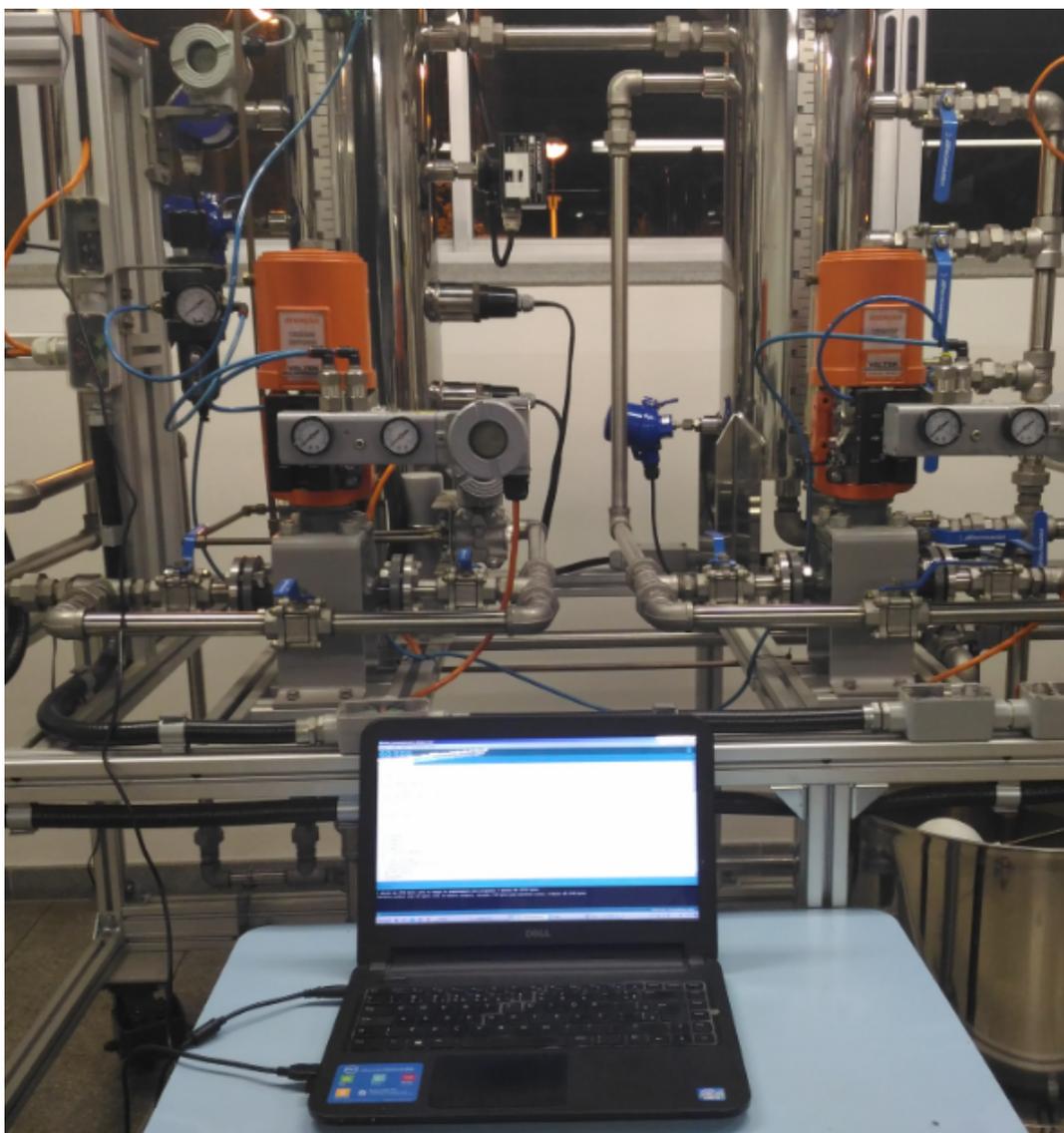


Figura 46 – Armazenamento dos dados de medição de temperatura feita com o Arduino Nano

Fonte: Da autora.

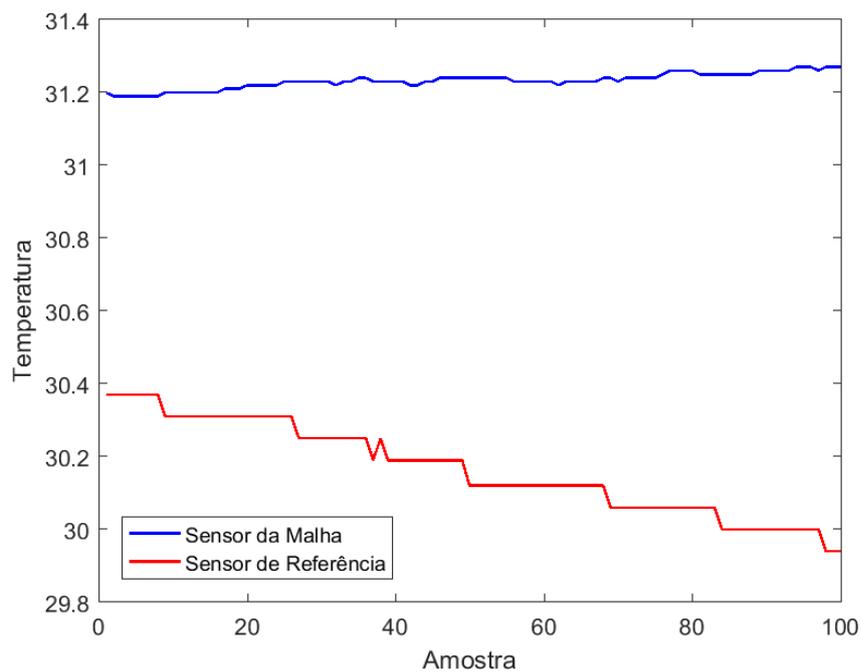


Figura 47 – Primeiro teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

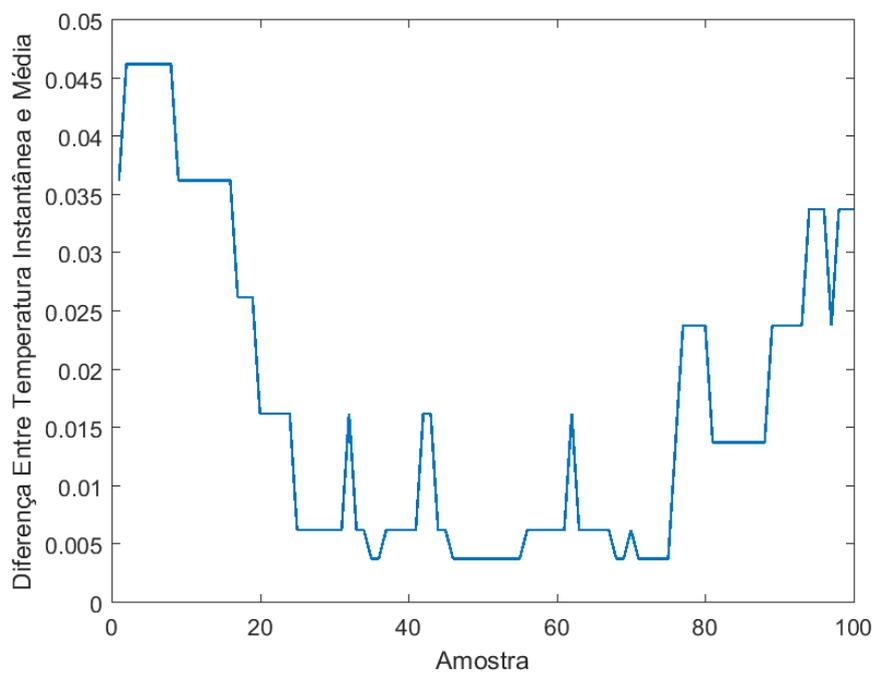


Figura 48 – Diferença entre temperatura instantânea e média no primeiro teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

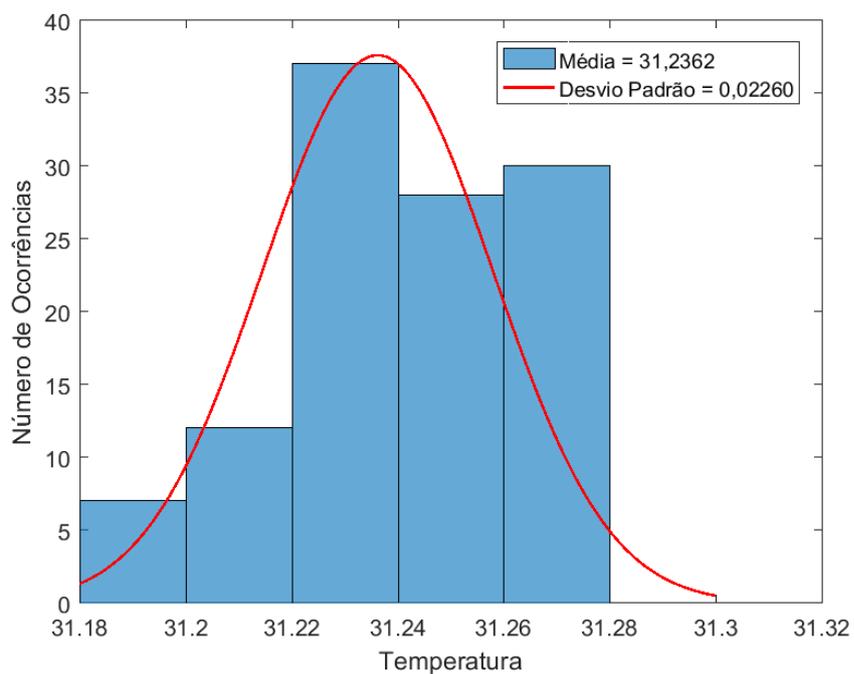


Figura 49 – Histograma e distribuição do primeiro teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

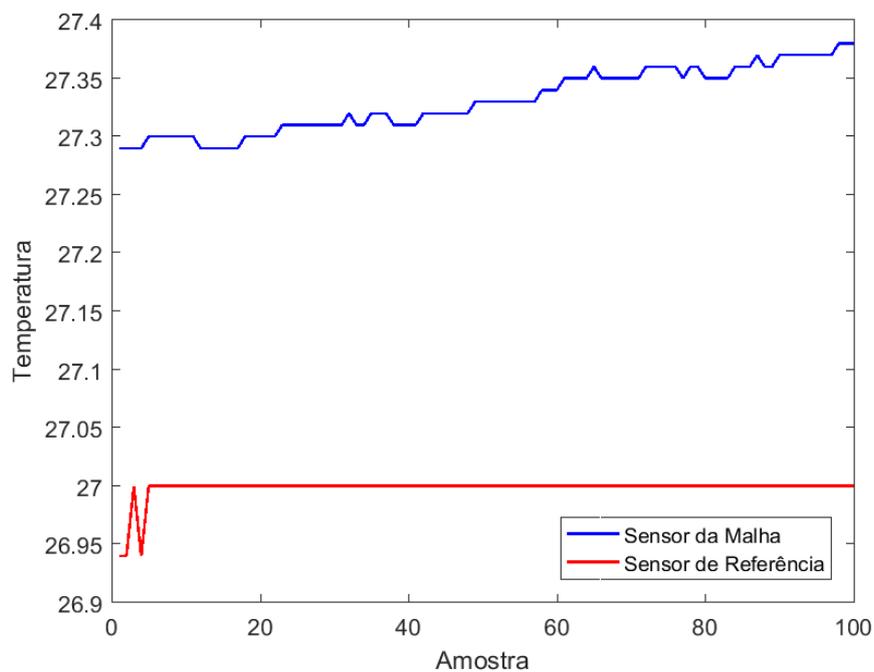


Figura 50 – Segundo teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

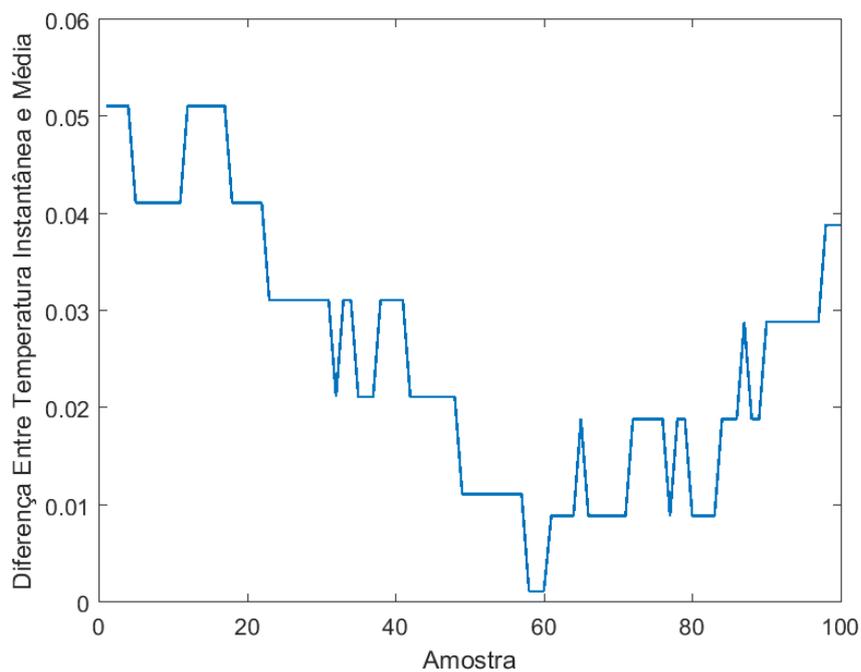


Figura 51 – Diferença entre temperatura instantânea e média no segundo teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

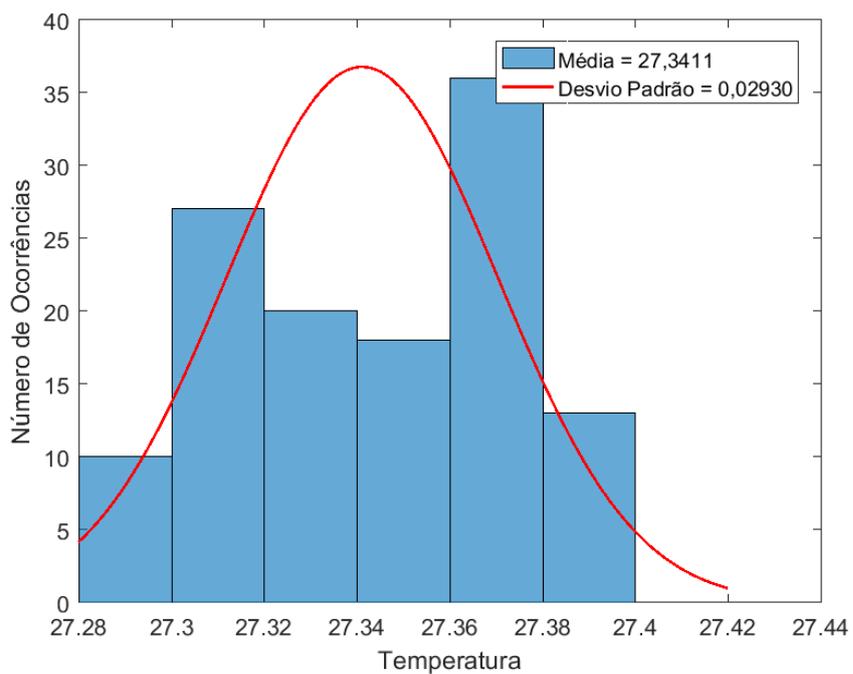


Figura 52 – Histograma e distribuição do segundo teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

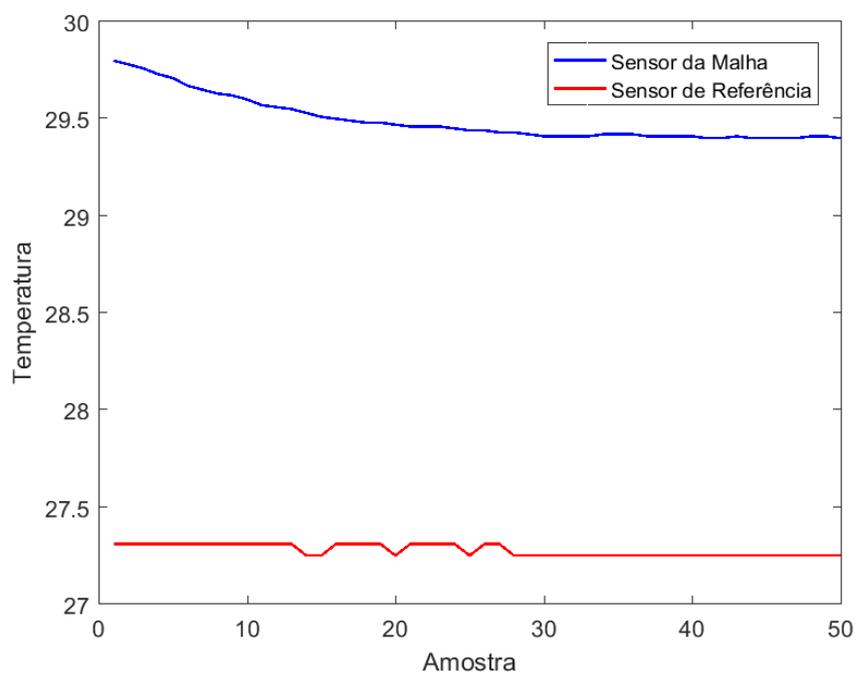


Figura 53 – Terceiro teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

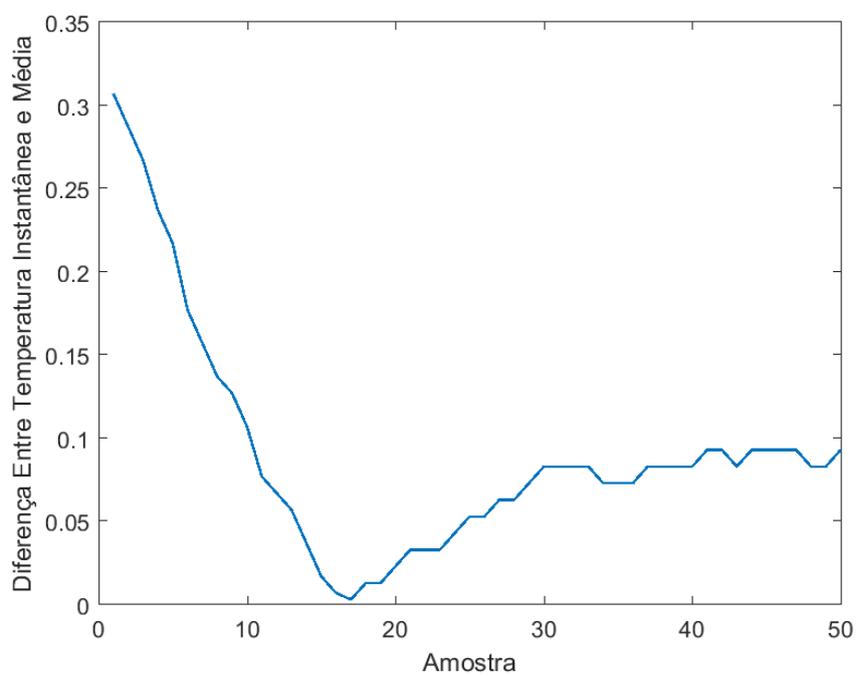


Figura 54 – Diferença entre temperatura instantânea e média no terceiro teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

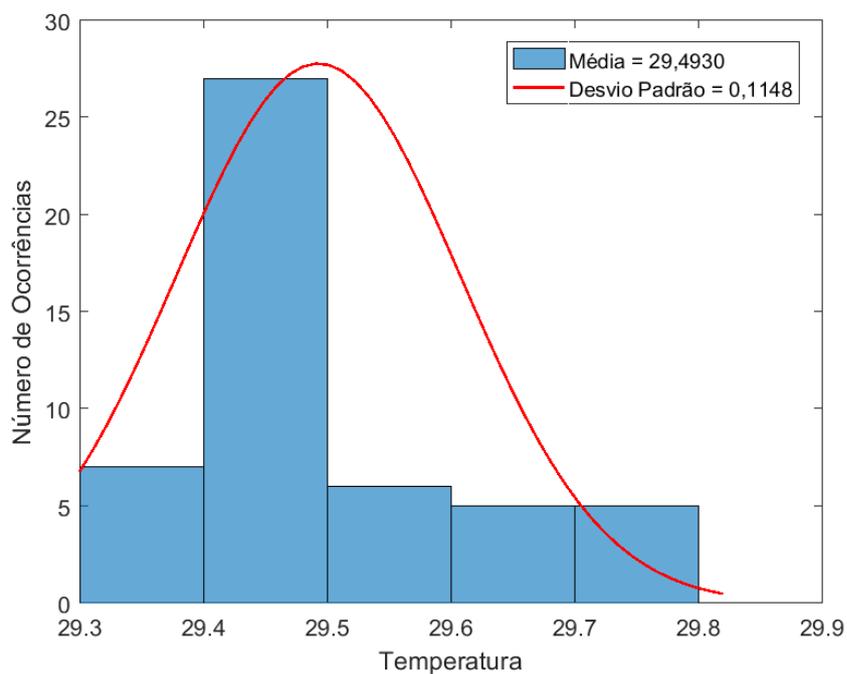


Figura 55 – Histograma e distribuição do terceiro teste de temperatura de temperatura.

Fonte: Da autora.

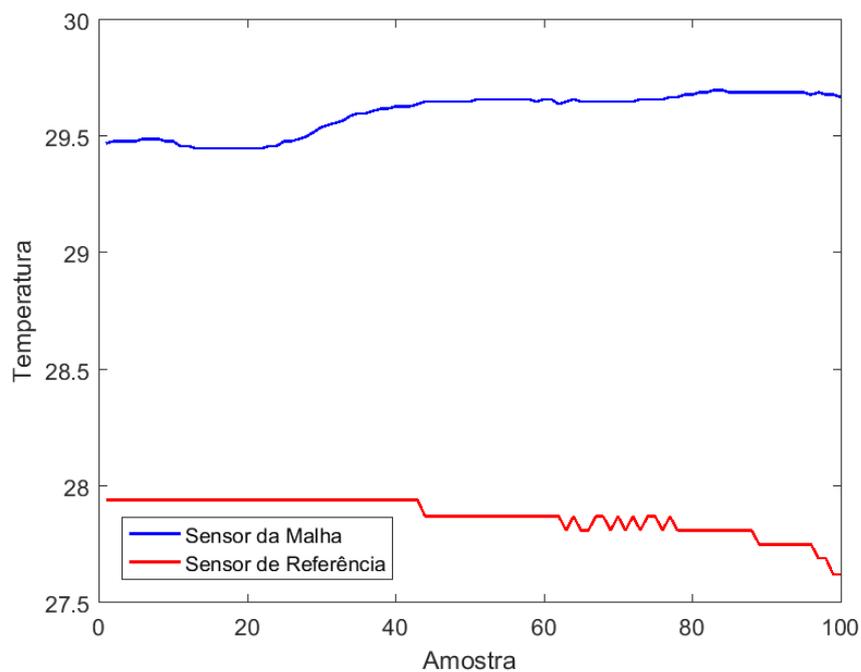


Figura 56 – Quarto teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

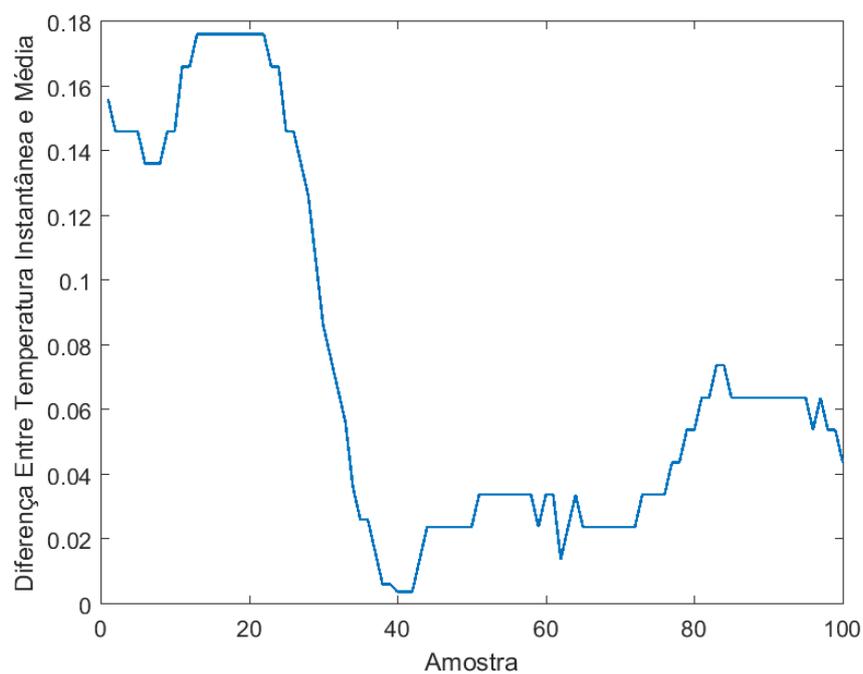


Figura 57 – Diferença entre temperatura instantânea e média no quarto teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

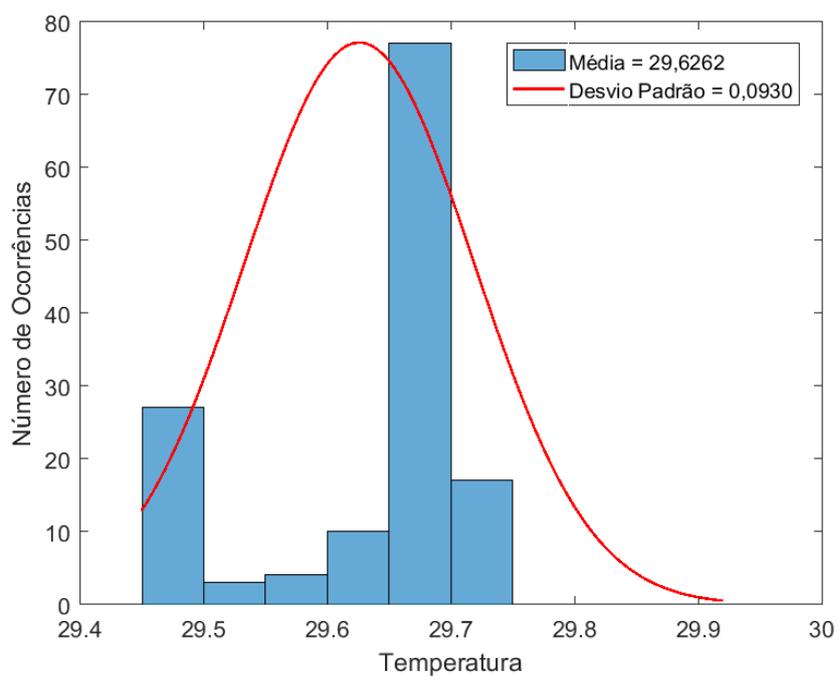


Figura 58 – Histograma e distribuição do quarto teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

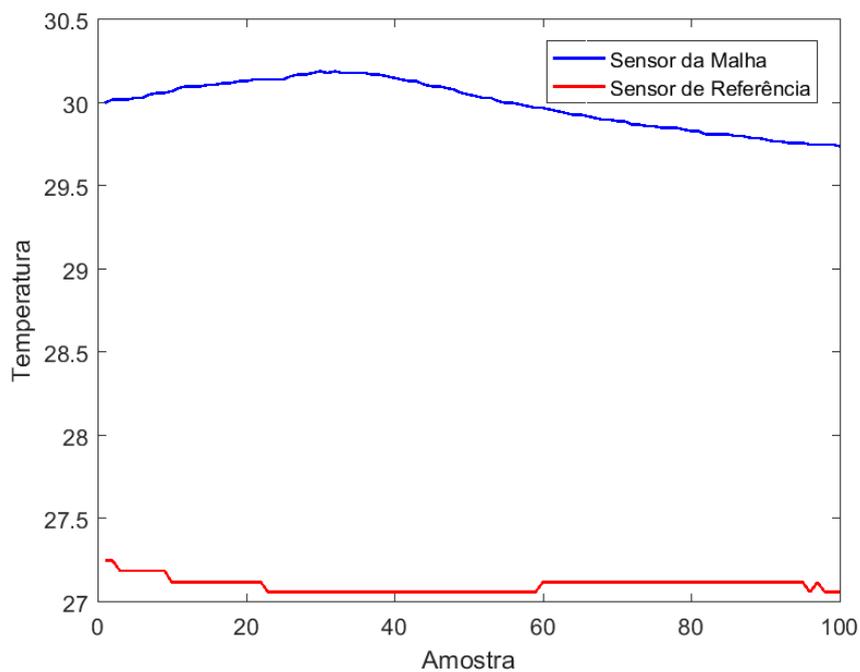


Figura 59 – Quinto teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

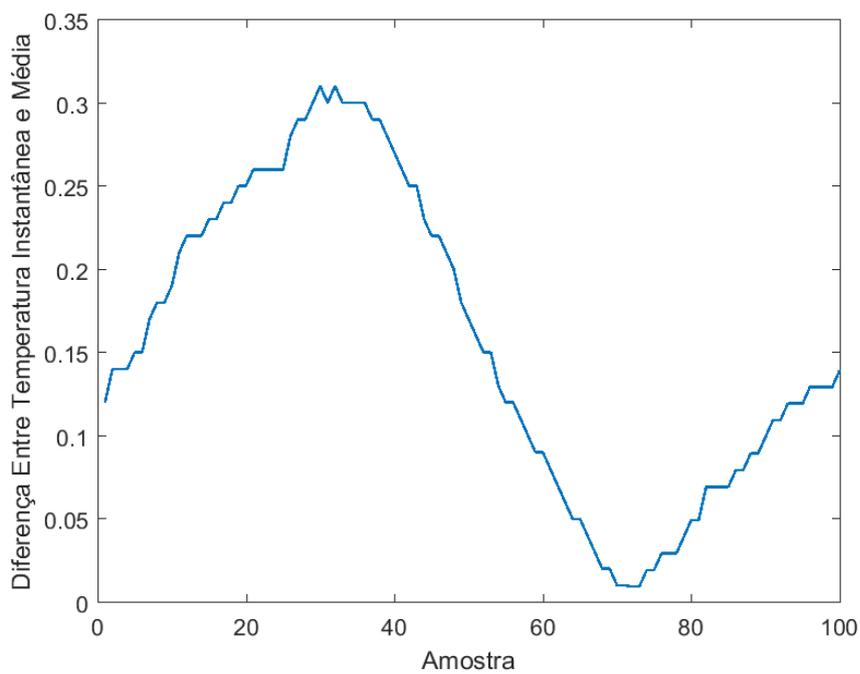


Figura 60 – Diferença entre temperatura instantânea e média no quinto teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

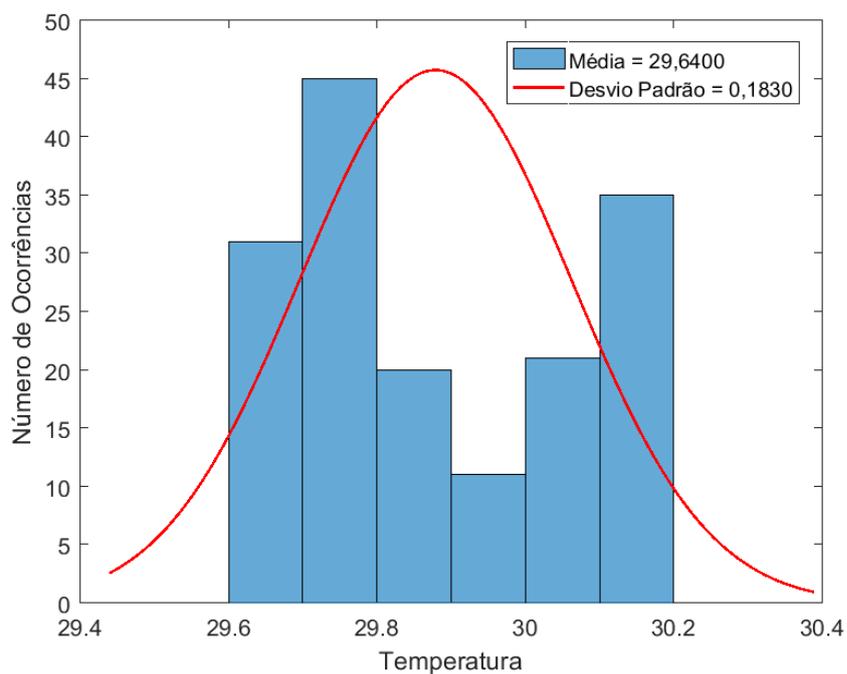


Figura 61 – Histograma e distribuição do quinto teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

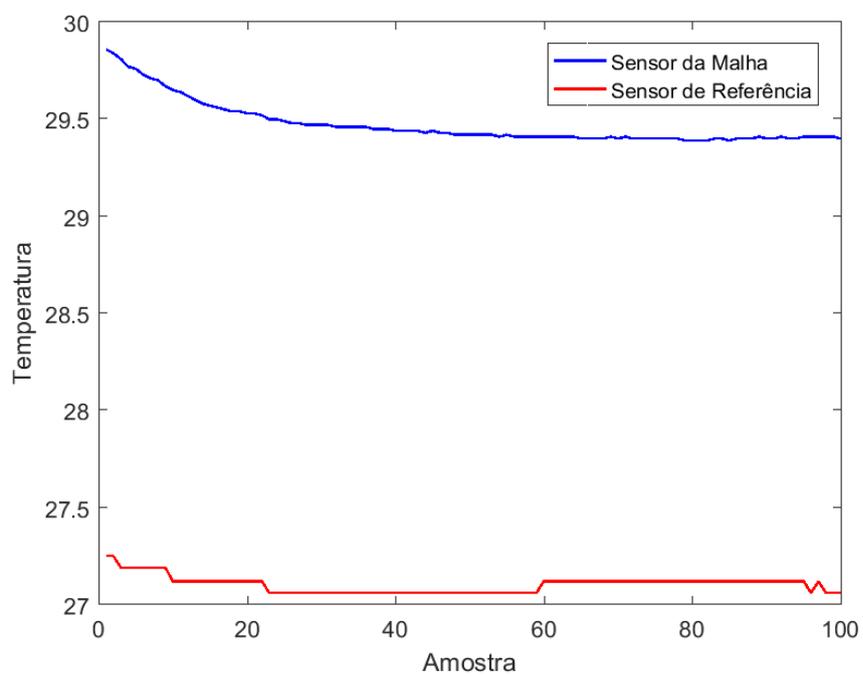


Figura 62 – Sexto teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

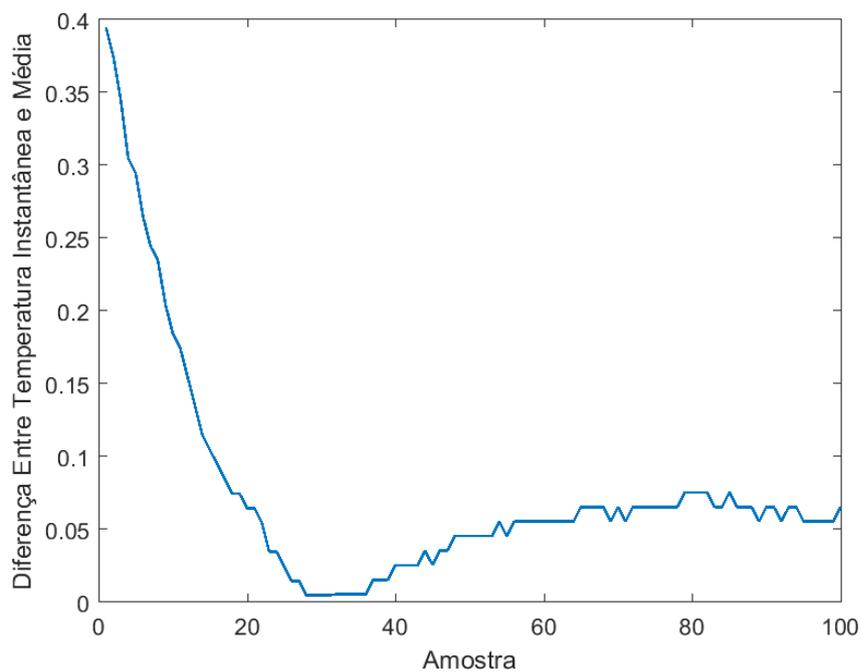


Figura 63 – Diferença entre temperatura instantânea e média no sexto teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

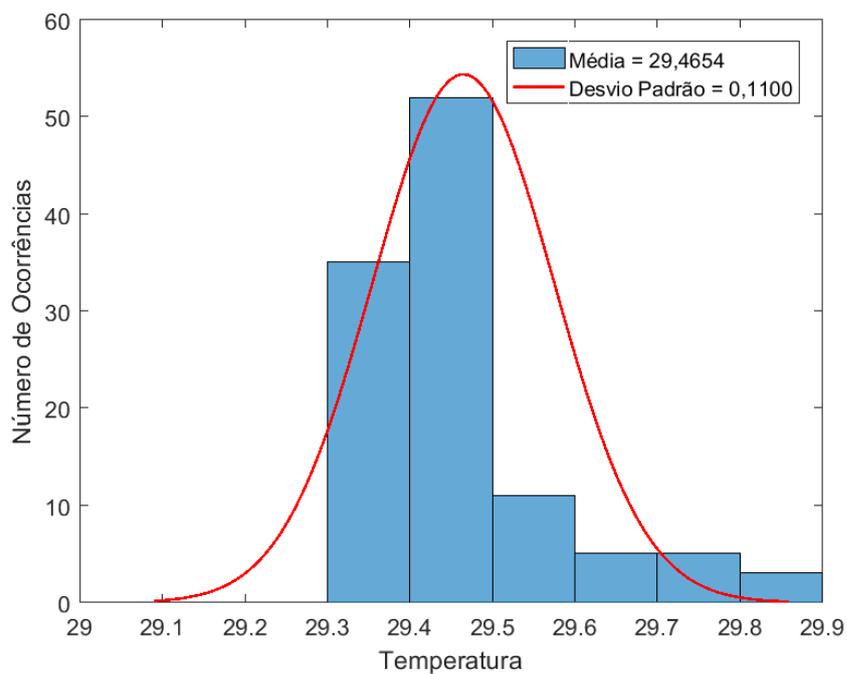


Figura 64 – Histograma e distribuição do sexto teste de temperatura.

Fonte: Da autora.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos com os testes no sensor de temperatura da malha de controle.

Tabela 6 – Resultados dos testes de medição de temperatura.

Parâmetro	Teste					
	1	2	3	4	5	6
É exato?	Não	Não	Não	Não	Não	Não
É preciso?	Não	Não	Não	Não	Não	Não
<i>Range e Span</i> atenderam?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Média da referência	30,1509	26,9983	27,2653	27,8371	27,0769	27,0769
Desvio padrão (%)	2,26%	2,93%	11,48%	9,30%	18,3%	11,00%

Fonte: Da autora.

O instrumento apresentou valor inexato para todos os teste efetuados, logo, pode-se classificá-lo como um sensor ruim, inadequado para uso nesta malha de controle. Outro fator que chama a atenção é a alta taxa de desvio padrão nos testes três a seis, além de não atender a tolerância especificada para todos os testes, mostrando que se trata de instrumento com precisão ruim. Portanto, a conclusão final é que há necessidade de calibração do sensor, além de efetuar manutenção, no sentido de identificar possíveis pontos de folga que sejam suficientes para perda de calor ou mesmo a incapacidade do instrumento, por motivo de tempo de vida útil, de realizar medições corretas.

5.4.2.3 Válvula de Controle

Para o teste de elevação na válvula de controle, durante um tempo total de dez minutos, foi feito, a cada minuto, o incremento de 0,1 na porcentagem de abertura, partindo do ponto de 40%. Conforme mostra a reta do gráfico apresentado na Figura 65, o instrumento apresentou resposta imediata a cada incremento, permitindo a conclusão de que, de acordo com este teste, não há agarramentos.

Para o teste de mudança de ganho do controlador, o tempo T_t definido foi de 20 minutos. O tempo de mudança do ganho nos passos 3 e 4 é marcado pela linha vertical, em cor vermelha, na Figura 66, que apresenta o resultado do teste. Pode-se notar que a variação da posição da válvula no instante da mudança foi menor que 1% e que a frequência de oscilação se manteve, pois, em cada passo, a porcentagem da abertura da válvula sofreu 99 variações, para 100 amostras coletadas.

5.4.3 Fase III - Análise do Controlador

Para determinação do índice de Harris, não foi possível a implementação do controlador de variação mínima na malha de controle auditada, pois a lei de controle é

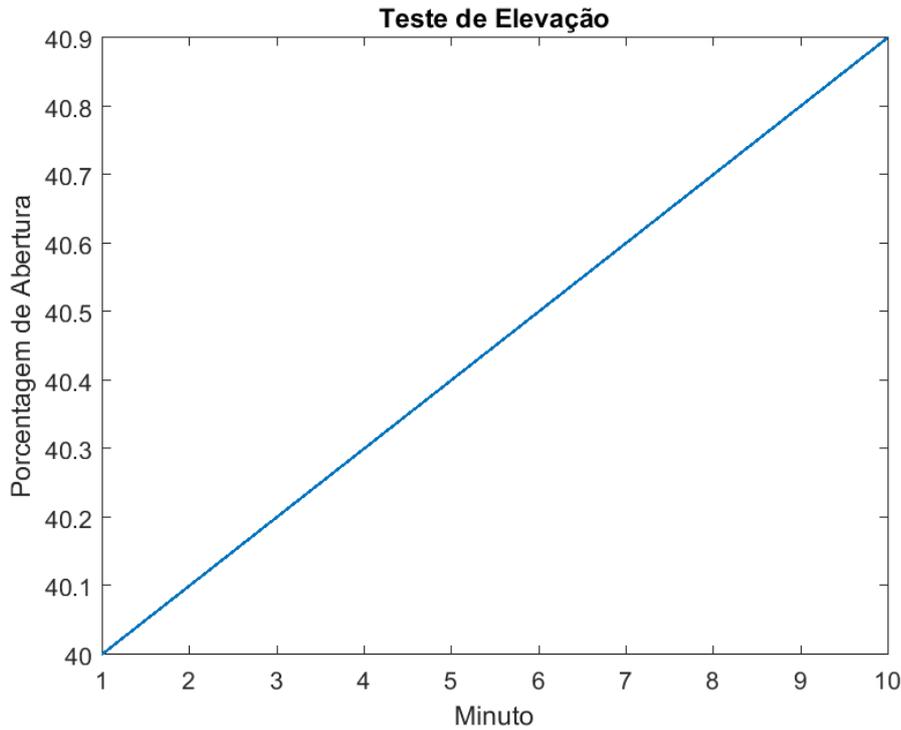


Figura 65 – Resultado do teste de elevação na válvula de controle.

Fonte: Da autora.

instável, conforme pode ser confirmado analisando o diagrama de Bode apresentado na Figura 67. A função de transferência do controlador é

$$C_{MV} = \frac{174,42(z - 0,99)(z - 0,1418)(z - 0,0006225)(z + 0,0006224)}{(z + 3,733)(z - 0,99)(z - 0,1418)}, \quad (5.16)$$

em que C_{MV} é a função de transferência na forma de zeros, polos e ganho do controlador de variância mínima.

Pode-se observar que há um número maior de zeros em relação ao de polos e que há um polo fora do círculo de raio unitário, caracterizando a instabilidade do controlador.

Desta forma, para a aplicação do índice de Harris, foi considerado como erro mínimo do processo de controle da malha, a diferença entre o sinal de saída coletado para identificação e o sinal de saída estimado pelo método dos mínimos quadrados estendidos, quando houve convergência na estimação dos parâmetros.

A Figura 68 mostra o comportamento do erro mínimo do processo ($erro_{MV}$), que apresentou valor máximo de 0,1533 e variância de 0,2108. A Figura 69 mostra o comportamento do erro do processo ($erro_{real}$) obtido com operação do controlador PID, que apresentou valor máximo de 0,26 e variância de 0,7819.

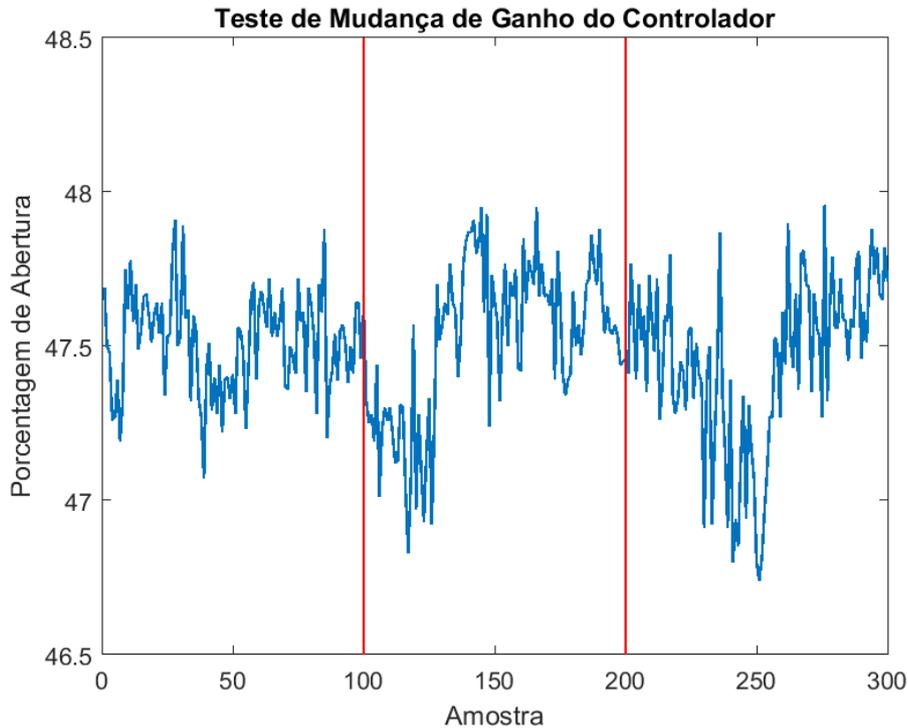


Figura 66 – Resultado do teste de mudança de ganho do controlador na válvula de controle.

Fonte: Da autora.

Portanto, o índice da Harris é igual a

$$n = \frac{0,2108}{0,7819} = 0,2695 \quad (5.17)$$

indicando que o desempenho do controlador PID pode ser melhorado, por meio da definição de novos valores dos ganhos. No entanto, apesar do índice de Harris indicar condição de obtenção de melhores resultados, na prática, o controlador implementado apresentou resultado satisfatório para a aplicação.

Para a análise do índice médio do nível, com valor de *setpoint* de 50% e média de 49,9966%, tem-se

$$y_{méd}(\%) = \frac{50 - 49,9966}{50} \times 100 = 0,0068\% \quad (5.18)$$

indicando que, na média, o sinal de saída se comportou próximo ao valor especificado.

5.4.4 Fase IV - Avaliação Final

Para a válvula de controle, a aplicação do testes provou que o instrumento não apresenta agarramento, estando apto para uso em qualquer processo e, conseqüentemente, não exigindo que seja feita sua manutenção antes da análise de desempenho do controlador.

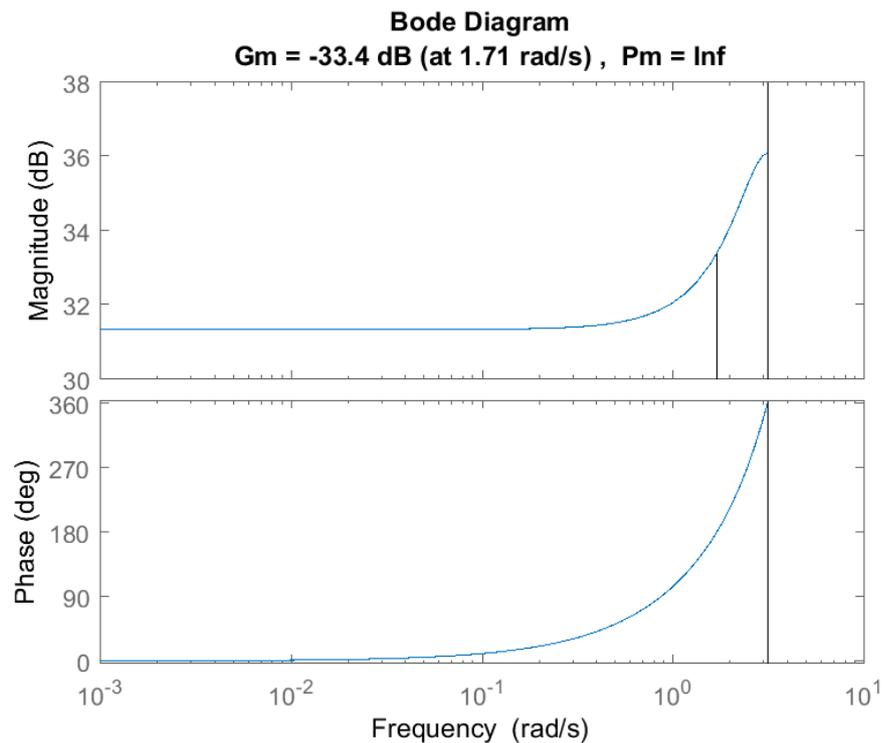


Figura 67 – Diagrama de Bode do controlador.

Fonte: Da autora.

Para os instrumentos de nível e temperatura, foi detectada a falta de calibração e manutenção, sendo a última especificamente para o sensor de temperatura, entretanto, como mencionado, não houve recursos para essa etapa exigida na rotina de auditoria.

O controlador, na média, se comportou bem, mas sua taxa de erro se mostrou distante da taxa de variância mínima, considerada a ideal em um sistema de controle. Portanto, é necessário reavaliar os ganhos K_p , K_i e K_d , com o intuito de diminuir a variância do erro. Ou ainda, os problemas de desempenho podem ser justificados pelos erros contidos no sensores.

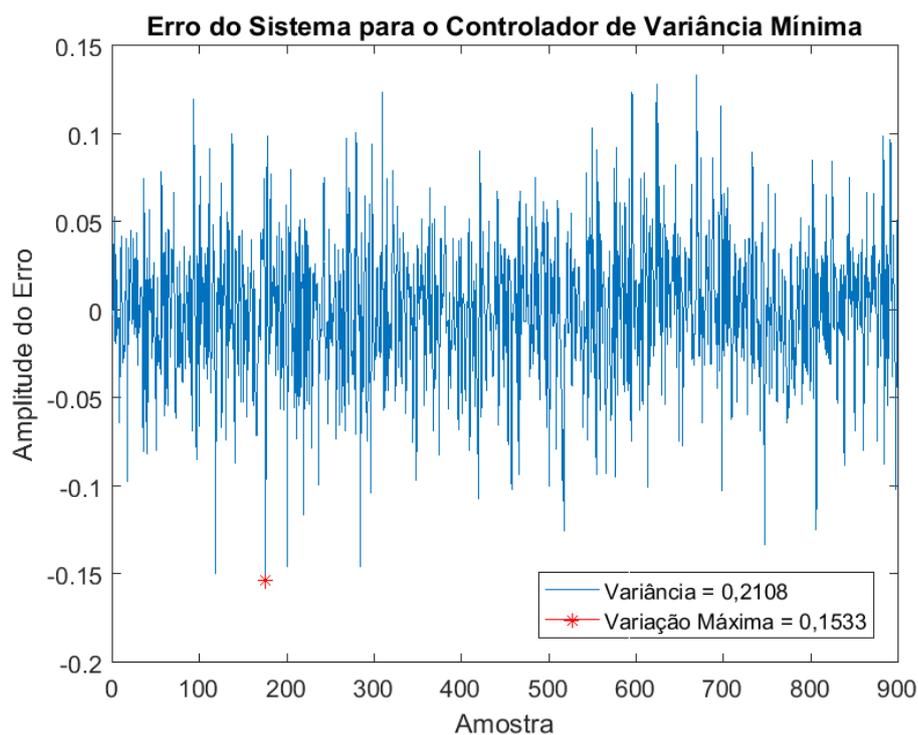


Figura 68 – Erro do nível com controlador de variância mínima.

Fonte: Da autora.

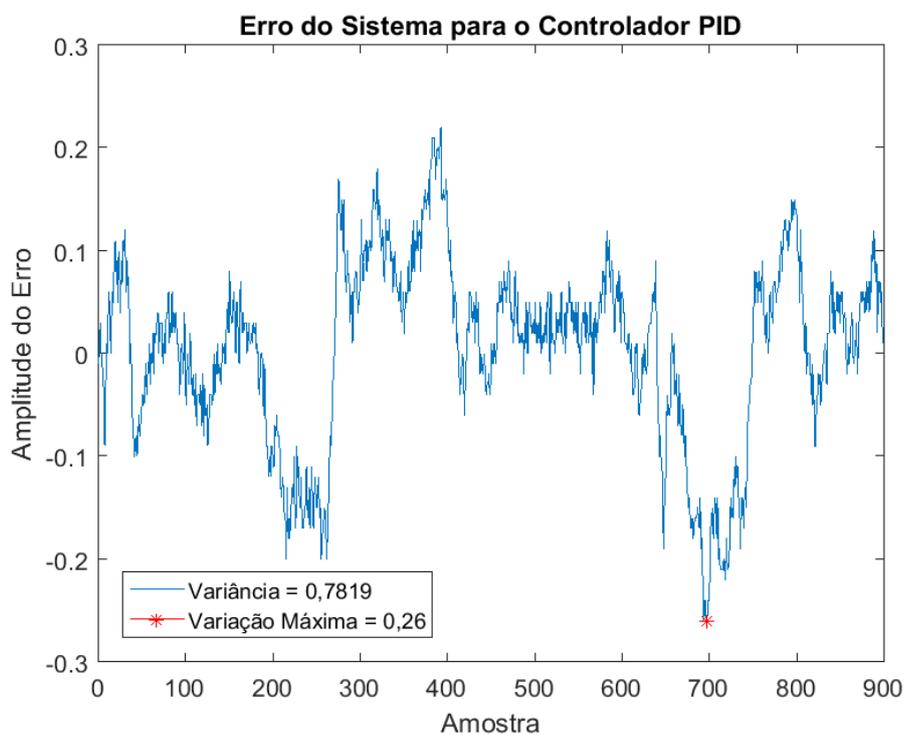


Figura 69 – Erro do nível com controlador PID.

Fonte: Da autora.

Capítulo 6

Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

Quanto ao trabalho elaborado, os resultados obtidos mostraram que a malha de controle necessita de calibração dos sensores de nível e temperatura, além da manutenção do sensor de temperatura, por apresentar precisão ruim.

A válvula de controle, instrumento atuador do processo, apresentou resultados satisfatórios para os dois testes ao qual foi submetida, não sendo evidenciada a presença de agarramento.

O controlador PID implementado na malha, apresentou resultados satisfatórios, com resposta dentro dos parâmetros exigidos no projeto. No entanto, o índice de Harris mostrou que os ganhos podem ser modificados para alcance de resultados que sejam ainda melhores.

Para elaboração de trabalhos futuros que tenham o objetivo de analisar o desempenho de sistemas de controle, eis algumas sugestões:

- Ser fiel a aplicação da rotina de auditoria proposta, trabalhando com processos em que seja possível efetuar a correção de problemas detectados em sensores e atuadores para, em seguida, analisar o desempenho do controlador.
- Implementar na rotina de auditoria técnicas de validação do modelo do sistema, considerando que a identificação errada pode levar a ações de controle equivocadas.
- Para análise de sensores e atuadores, analisar desempenho em relação aos parâmetros de linearidade e repetitividade.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Introdução a Identificação de Sistemas*. 3. ed. Belo Horizonte, 2007. 30
- AGUIRRE, L. A. *Fundamentos de Instrumentação*. 1. ed. Belo Horizonte, 2013. 20
- ATTOLINI, M. *Detecção e Identificação de Falhas em Válvulas de Controle*. Monografia (graduação em engenharia química). Porto Alegre, 2014. 22
- CARMO, M. J. *Ambiente Educacional Multifuncional Integrado para Sintonia e Avaliação do Desempenho de Malhas Industriais de Controle*. Dissertação (mestre em ciências e engenharia elétrica). Juiz de Fora, 2006. 25
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Moderno*. 8. ed. Rio de Janeiro, 1998. 14
- HARRIS, T.; SEPPALA, C.; DESBOROUGH, L. *A Review of Performance Monitoring and Assessment Techniques for Univariate and Multivariate Control Systems*. 9. ed. Journal of Process Control, 1999. 1
- PAIOLA, C. E. G. *Técnicas Intrusivas de Detecção e Atrito em Válvulas de Controle*. Dissertação (mestre em engenharia de sistemas). São Paulo, 2008. 22, 23
- PASSOS, L. F. D. *Metodologia Para Auditoria e Validação Ampla de Malhas de Controle - Estudo de Caso Para Uma Caldeira Industrial*. Dissertação (mestre em engenharia elétrica). Belo Horizonte, 2009. 2, 27
- RIBEIRO, M. A. *Instrumentação*. 9. ed. Belo Horizonte, 2002. 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 68
- SOUZA, D. L. *Análise do Desempenho de Sistemas de Controle*. Dissertação (mestre em engenharia química). Uberlândia, 2007. 14, 23

ANEXOS

A1: Nomenclatura de Instrumentos

A Tabela 7 para identificação de instrumentos de acordo com a ISA 5.1 de 2009 é apresentada juntamente com orientações para as notas nela contidas, conforme descreve RIBEIRO (2002).

Tabela 7 – Simbologia de instrumentos.

Letra	Primeira Letra		Letras Subsequentes		
	Variável	Modificador	Função Display	Função Saída	Modificador
A	Análise(5,19)		Alarme		
B	Queimador		Escolha(1)	Escolha(1)	Escolha(1)
C	Escolha(1)			Controle(13)	
D	Escolha(1)	Diferencial			
E	Tensão		Elemento sensor		
F	Vazão	Fração(4)			
G	Escolha(1)		Visor local(9)		
H	Manual				Alto(7, 15, 16)
I	Corrente		Indicação(10)		
J	Potência	Varredura(7)			
K	Tempo	Tempo(4, 21)			
L	Nível		Lâmpada(11)		Baixo(7, 15, 16)
M	Escolha(1)	Momentâneo			Médio(7, 15)
N	Escolha(1)		Escolha(1)	Escolha(1)	Escolha(1)
O	Escolha(1)		Restrição		
P	Pressão		Ponto de teste		
Q	Quantidade	Total(4)			
R	Radiação		Registro(17)		
S	Velocidade	Segurança(8)		Chave(13)	
T	Temperatura			Transmissão(18)	
U	Multivariável(6)		Multifunção(12)	Multifunção(12)	Multifunção(12)
V	Vibração			Válvula(13)	
W	Peso ou Força		Poço		
X	Não definido(2)	Eixo X	Não definido(2)	Não definido(2)	Não definido(2)
Y	Á definir	Eixo Y		Relé(13, 14, 18)	
Z	Posição	Eixo Z		Elemento final	

Fonte: Da autora.

Notas:

1. Uma letra de escolha do usuário tem o objetivo de cobrir significado não listado porém necessário em determinada aplicação. A letra pode ter significado como de primeira letra ou de letras subsequentes.
2. A letra X não classificada é usada cobrir significado não listado. Se usada, a letra pode ter número de significados como primeira letra ou como letra subsequente.
3. A forma das letras subsequentes pode ser modificada livremente. Por exemplo, I pode significar indicador, ou indicação.
4. Tendo uma primeira letra combinada com as letras modificadoras D, F, M, K ou Q, ela passa a representar uma variável nova e separada e a combinação é tratada como uma entidade de primeira letra.
5. A letra A cobre todas as análises não descritas como uma escolha do usuário.
6. O uso de U como primeira letra é opcional.
7. O uso dos termos modificadores H, L, M e J é opcional.
8. O termo segurança se aplica a elementos tanto primários quanto finais que têm função de proteção de emergência.
9. A função G se aplica a instrumentos que fornecem uma indicação não calibrada, como visor de vidro ou monitores.
10. A indicação normalmente se aplica a displays.
11. Toda lâmpada piloto deve ser designada por uma primeira letra seguida pela letra subsequente L.
12. O uso da letra U para multifunção deve ser usado raramente, apenas quando o número de letras for muito grande.
13. Um instrumento que liga/desliga pode ser uma chave, um relé, um controlador on-off ou uma válvula.
14. Quando a função executada por Y é evidente a definição pode não ser obrigatória.
15. Os termos modificadores alto, baixo, médio ou intermediário correspondem aos valores da variável medida e não aos de sinal.
16. Os termos alto e baixo aplicados a posições de válvulas e outros dispositivos de abrir e fechar são definidos como: (i) alto significa totalmente aberto; (ii) baixo significa totalmente fechado.
17. O termo registrador se aplica a qualquer meio de armazenar permanentemente informação.
18. Elemento sensor, transdutor, transmissor e conversor são dispositivos que têm funções diferentes.
19. A primeira letra V, destina-se a executar tarefas em monitoração de máquinas e a letra A executa em uma análise mais geral.
20. Y como primeira letra se destina ao uso quando as respostas de controle ou monitoração são acionadas por evento e não acionadas pelo tempo.

21. A letra modificadora K, em combinação com uma primeira letra como L, T ou W, significa variação de tempo da quantidade medida ou de inicialização.

22. A letra K como modificador é uma opção para designar uma estação de controle, enquanto a letra C seguinte é usada para descrever se o controle é automático ou manual.

A2: Algoritmo para Simulação de Efeitos do Controlador PID

O algoritmo usado para ilustrar os efeitos das variações dos parâmetros KP, KI e KD de um controlador PID foi implementado no Matlab e é apresentado a seguir.

```
%% EFEITOS DAS VARIAÇÕES DAS CONSTANTES KP, KI E KD
```

```
% Variações em KP
```

```
YR = tf([6 18 8],[1 11 18 8]);
```

```
YR2 = tf([6 18 20],[1 11 18 8]);
```

```
YR3 = tf([6 18 50],[1 11 18 8]);
```

```
figure
```

```
grid on
```

```
step(YR);
```

```
hold on
```

```
step(YR2)
```

```
hold on
```

```
step(YR3)
```

```
legend ('Kp = 8', 'Kp = 20', 'Kp = 50')
```

```
% Variações em KI
```

```
YRI = tf([6 18 8],[1 11 18 8]);
```

```
YR2I = tf([20 18 8],[1 11 18 8]);
```

```
YR3I = tf([50 18 8],[1 11 18 8]);
```

```
figure
```

```
grid on
```

```
step(YRI)
```

```
hold on
```

```
step(YR2I)
```

```
hold on
```

```
step(YR3I)
```

```
legend ('Ki = 6', 'Ki = 20', 'Ki = 50')
```

```
% Variações em KD
```

```
YRD = tf([6 18 8],[1 11 18 8]);
```

```
YR2D = tf([6 80 8],[1 11 18 8]);
```

```
YR3D = tf([6 50 8],[1 11 18 8]);
```

```
figure
```

```
grid on
step(YRD)
hold on
step(YR2D)
hold on
step(YR3D)
legend ('Kd = 18', 'Kd = 80', 'Kd = 50')
```