



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Misturador Automático de Água Quente e Fria

Autor: Diogo Vinícius Campezzatto

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner

Porto Alegre, dezembro de 2014

Sumário

Sumário	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	viii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo Geral	1
1.2 Objetivos Específicos	1
1.3 Estrutura do Trabalho	2
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Controle de Temperatura em Fluxos D'Água	3
2.2 Teoria de Controle	4
2.2.1 O Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)	4
2.2.2 Sintonia de Controladores PID	5
2.2.2.1 Método do Ponto Crítico com Controle Proporcional	6
2.2.3 Identificação de Sistemas	6
3 Materiais e Métodos	8
3.1 Válvula de Controle	9
3.1.1 Calibração e Cálculo de Incertezas da Válvula Gaveta	10
3.2 Atuador	11
3.3 <i>Driver</i> de Potência	12
3.4 Sensor de Temperatura	13
3.4.1 Calibração e Cálculo de Incertezas do Sensor NTC	14
3.5 Plataforma Arduino Mega	18
4 MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA	19
4.1 Modelagem Analítica do Sistema	19
4.1.1 Balanço de Volume	19
4.1.2 Balanço de Energia	20
4.2 Identificação Experimental do Sistema	21
5 SINTONIA DO CONTROLADOR	24
5.1 Primeiro Experimento	24
5.2 Segundo Experimento	26
5.3 Terceiro Experimento	27
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	29
7 REFERÊNCIAS	30

Resumo

O presente trabalho propõe a implementação de um sistema de controle de temperatura automático para chuveiros residenciais, por meio do ajuste da vazão da água quente provida de aquecimento a gás ou painel solar. Como ponto de partida para a realização do trabalho, foi realizada a adaptação de uma bancada experimental no Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC). A modelagem do sistema foi realizada de forma analítica, onde considerou-se apenas o regime estacionário, bem como experimentalmente, através da identificação de parâmetros do sistema real com este operando em malha aberta e sem controle. Para o sistema de controle, foi utilizado um controlador PID, sendo o ajuste dos ganhos realizado através de métodos empíricos (Ziegler-Nichols). A vazão é regulada através de uma válvula de gaveta acionada por meio de um motor de passo, e a temperatura medida por um termistor NTC. Como resultado, obteve-se seguimento de referência com erro próximo de zero, e um tempo de assentamento de aproximadamente 25 segundos.

Palavras Chave: sistema de controle, temperatura, vazão.

Abstract

This work proposes the implementation of automatic temperature control system by hot water flow regulation, in gas or solar heating systems. As a starting point for carrying out the work, the adaptation of a testing bench in Mechatronics and Control Laboratory (LAMECC) was performed. The modeling of the system was performed analytically, which considered only the steady state as well as experimentally, by identifying real system parameters with this operating open loop and without control. For the control system, a PID controller was used, with adjustment of the gains realized by empirical methods (Ziegler-Nichols). A NTC thermistor was used as temperature sensor and a gate valve driven by step motor as a flow regulator. The controller was able to follow reference with null error in 25 seconds.

Keywords: control system, temperature, flow.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Sistema com controle PID [Fonte: Campos, 2010]	5
Figura 2: (a) Método do ponto crítico com controle proporcional e (b) Método do ponto crítico com controle <i>bang-bang</i> [Adaptado de Bazanella e Siva Jr, 2005].....	6
Figura 3.1: Bancada experimental implementada no LAMECC [Fonte: Autor]	9
Figura 3.2: Válvula gaveta utilizada [Fonte: Deca, 2014]	9
Figura 3.3: Incertezas da válvula de gaveta [Fonte: Autor]	11
Figura 3.4: Motor de passo utilizado [Fonte: Allegro MicroSystems, 2014].....	12
Figura 3.5: Sistema de redução 2x1 utilizado no sistema válvula + atuador [Fonte: Autor]	12
Figura 3.6: <i>Driver</i> de potência A4988 [Adaptado de Pololu Robotics e Electronics, 2014] 13	
Figura 3.7: Sensor NTC 10k [Fonte: ADD Therm, 2014]	14
Figura 3.8: Procedimento realizado para a calibração do sensor NTC [Fonte: Autor]	14
Figura 3.9: Curva medida x curva aproximada do sensor NTC [Fonte: Autor]	17
Figura 3.10: Tempo de resposta de sensores [Adaptado de ADD Therm, 2014]	17
Figura 4. 1: Volume de controle considerado [Fonte: Autor]	19
Figura 4. 2: Janela <i>Import Data</i> [Fonte: Autor]	21
Figura 4. 3: Janela <i>Process Models</i> [Fonte: Autor]	22
Figura 4.4: Ferramenta <i>System Identification</i> [Fonte: Autor].....	23
Figura 4.5: Modelo medido x modelo identificado [Fonte: Autor].....	23
Figura 5.1: (a) Resposta do sistema, (b) Sinal de controle e (c) Sinal de erro [Fonte: Autor]	25
Figura 5.2: (a) Resposta do sistema, (b) Sinal de controle e (c) Sinal de erro [Fonte: Autor]	26
Figura 5.3: Resposta do sistema, (b) Sinal de controle e (c) Sinal de erro [Fonte: Autor].	28

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Fórmulas de Ziegler-Nichols [Fonte: Bazanella e Silva Jr, 2005]	6
Tabela 4.1: Média dos valores e incerteza tipo A [Fonte: Autor]	10
Tabela 4.2: Incerteza do sensor NTC 10k utilizado [Fonte: Autor]	16

Lista de Símbolos

θ	Vetor de parâmetros
$\Phi^T(t)$	Vetor de regressão
K_C	Ganho crítico [%]
K_P	Ganho proporcional [%]
T_I	Tempo integral
T_D	Tempo derivativo
T_C	Período crítico [s]

Lista de Abreviaturas e Siglas

DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica

LAMECC – Laboratório de Mecatrônica e Controle

LIT – Linear e Invariante no Tempo

MIMO – *Multiple Input Multiple Output*

MV – *Manipulated Variable*

P – Controlador Proporcional

PD – Controlador Proporcional-Derivativo

PI – Controlador Proporcional-Integral

PID – Controlador Proporcional-Integral-Derivativo

PV – *Process Variable*

PVC – *Polyvinyl Chloride*

RP – Regime Permanente

RT – Regime Transitório

SISO – *Single Input Single Output*

SP – *Set Point*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 Introdução

Segundo recente debate ecológico promovido pela UNESCO (2014), com a crescente demanda por água e energia elétrica, se tornam cada vez mais necessários estudos a respeito de alternativas para um melhor aproveitamento dos recursos hídricos e energéticos disponíveis na natureza. Um setor que ainda carece de evolução tecnológica nesse sentido são os chuveiros domésticos.

Dentre os sistemas de aquecimento de água para chuveiros residenciais, os mais usuais são os chuveiros elétricos, que dissipam energia através de uma resistência elétrica, os chuveiros aquecidos por queima de gás e, finalmente, os chuveiros aquecidos por placas de captação de energia solar. Este trabalho trata da implementação de um misturador automático de água quente e fria, que consiste basicamente em um sistema de controle de temperatura para chuveiros aquecidos por queima de gás ou painel solar.

O projeto do controlador de temperatura possui as seguintes motivações principais: conforto e segurança, menor desperdício de água e de energia, e diminuição da demanda de energia elétrica nos horários de pico.

- O conforto e a segurança são proporcionados pelo ajuste automático da temperatura da água, que além de tornarem o banho mais adequado às necessidades do usuário, evitam acidentes e queimaduras indesejadas, comuns durante o ajuste manual nos registros.
- A economia de energia e de água é obtida pelo fato do controle agir rapidamente no sistema, evitando o tempo que seria gasto no ajuste manual de temperatura.
- A diminuição da demanda de energia elétrica, por sua vez, poderá ocorrer através da substituição de chuveiros elétricos por aquecedores de água a gás ou solares.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é implementar um sistema de controle de temperatura para chuveiros aquecidos por queima de gás ou painel solar, possibilitando um controle rápido e preciso da temperatura da água de chuveiros instalados em banheiros de apartamentos e residências onde sua distribuição é encanada.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Adaptação de uma bancada experimental em uma bancada de testes já existente no Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC), o que corresponde à instalação de válvulas e de elementos sensores e atuadores, bem como da tubulação de PVC;
- Modelagem do sistema, a qual será realizada de forma analítica, através dos balanços de volume e energia do sistema em regime permanente (RP), bem como de forma experimental, através da identificação dos parâmetros do sistema através do método dos mínimos quadrados;
- Ajuste do controlador PID, que será realizada de forma empírica, através do método de Ziegler-Nichols;
- Análise dos resultados obtidos, com o intuito de validar o sistema de controle implementado, o que será realizado através de gráficos contendo a resposta do sistema de controle frente a diversas condições de operação pré-estabelecidas pelo usuário.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 é feito um levantamento bibliográfico sobre controle em fluxos d'água, teoria de controle, instrumentação e fenômenos de transporte. No Capítulo 3 é feita uma breve descrição da bancada experimental, assim como os materiais e métodos empregados neste trabalho. No Capítulo 4, por sua vez, são descritos os passos para a obtenção dos modelos analítico e experimental do sistema, enquanto no Capítulo 5 aborda-se o ajuste dos parâmetros do controlador PID, bem como os resultados práticos obtidos na bancada experimental. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é feito um levantamento bibliográfico sobre controle de temperatura em fluxos d'água, assim como das estratégias de controle empregadas e os equipamentos comumente utilizados nesse tipo de aplicação. Em seguida, são abordados tópicos de controle clássico, como estratégias e ações básicas de controle, controladores PID, sintonia de controladores e identificação de sistemas. Por fim, é feita uma revisão sobre medição de incertezas, bem como de balanços mássicos e energéticos.

2.1 Controle de Temperatura em Fluxos D'Água

Nesta seção são apresentadas técnicas e estratégias de controle geralmente utilizadas e/ou desenvolvidas por pesquisadores no que diz respeito ao controle de temperatura em fluxos d'água.

Em Perondi et al. (2008a) e Perondi et al. (2008b), é apresentada uma nova proposta de aquecedores de passagem a gás, baseados no uso de chama modulante. Neste novo sistema proposto, a temperatura não é controlada através da variação da vazão de gás, mas sim, pelo acionamento de forma individual de cada queimador. Através dessa permite a obtenção de melhores desempenhos para o sistema, principalmente no caso de operação com baixas elevações de temperatura.

Yara (2010), por sua vez, propõe a utilização de um controlador PID para realizar o controle de temperatura para chuveiros aquecidos por queima de gás, sendo a lógica de controle e a aquisição de dados realizada através de um microcontrolador da família PIC. Como forma de atuação, o autor sugere o uso de um motor elétrico DC acoplado à válvula globo da linha de água fria, instalada na entrada de um misturador. Neste caso, as vazões de água e de gás que circulam pelo aquecedor são mantidas constantes, enquanto a temperatura da água de saída do misturador depende da relação entre as vazões de água quente e fria.

Uma estratégia de controle baseada em lógica *fuzzy* para realizar o controle da temperatura e da vazão de banho de um chuveiro elétrico é apresentada por Pilatti (2012). O conjunto de regras utilizado é do tipo SE <condição> ENTÃO <ação>. Para o controle da entrada de água, foi proposta a utilização de duas servoválvulas, e para o aquecimento da água uma resistência elétrica, similar a dos chuveiros tradicionais, sendo a lógica de controle implementada em um microcontrolador de 8 bits. Os resultados obtidos pelo controlador, segundo o autor, mostraram um bom desempenho, sendo possível manter as variáveis controladas (temperatura e vazão) próximas aos valores desejados. Contudo, os atrasos de transporte presentes no sistema não puderam ser eliminados, uma vez que se tratam de parâmetros intrínsecos a este. Além disso, as respostas para todos os ensaios realizados apresentaram pequenos valores de sobressinal e poucas oscilações.

Já em Henz (2013), é proposta uma estratégia de controle com compensação de tempo morto, de forma a realizar o controle de temperatura em aquecedores baseados no princípio de chama modulante, onde cada conjunto de queimadores pode ser acionado de

forma individual. Como resultados, obteve uma resposta mais rápida do que em malha aberta e robusta perante variações dos parâmetros da planta e erros de modelagem, porém, oscilatória na presença de erros de identificação de tempo morto.

Gutterres (2014), por fim, apresenta a segmentação de um sistema de controle de temperatura em dois controladores PI, que entram em ação alternadamente. Na sua proposta, o primeiro controlador controla a temperatura variando o número de queimadores acesos, e opera apenas durante o regime transiente. O segundo controlador PI opera quando a temperatura de saída está em uma faixa próxima da referência, sendo responsável pela variação da posição do obturador da servoválvula de gás, diminuindo a sua vazão até que a temperatura da água de saída atinja o valor de referência. De acordo com o autor, os resultados obtidos comprovam que o aquecedor da bancada foi capaz de elevar a temperatura de saída da água, fazendo-a convergir para uma temperatura de referência, sendo apresentado, na maioria dos casos, um comportamento estável e com oscilações de no máximo 0,2 °C de temperatura.

2.2 Teoria de Controle

O objetivo de um sistema de controle consiste em aplicar sinais adequados na entrada de controle a fim de fazer com que o sinal de saída apresente um comportamento pré-especificado, e que o efeito da ação das perturbações sobre este comportamento seja minimizado ou completamente eliminado. Desta forma, pode-se dizer, em resumo, que o problema de controle é determinar os sinais adequados a serem aplicados na entrada de controle, a partir do comportamento desejado para a saída do processo.

2.2.1 O Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

O controlador PID é aquele que gera a sua saída proporcionalmente ao erro, à integral do erro e à derivada do erro [Campos, 2010]. O sinal de controle deste controlador é dado pela soma das três ações básicas de controle, e pode ser expresso de acordo com a Equação (2.1) a seguir:

$$u_{PID}(t) = u_P(t) + u_I(t) + u_D(t) = K_P[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (2.1)$$

Na Figura 2.1 a seguir, é apresentada a ilustração do diagrama em blocos de um sistema com controle PID, conforme segue:

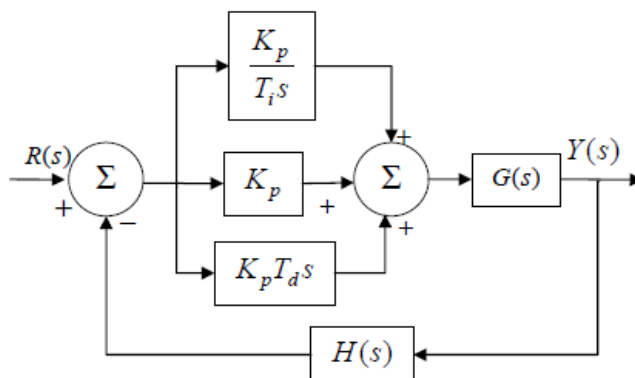


Figura 2.1: Sistema com controle PID [Fonte: Campos, 2010]

Graças a essa combinação das ações básicas de controle, o sistema assume um comportamento mais robusto, ou seja: a ação proporcional garante ao sistema a capacidade de reação rápida ao erro presente ou mesmo à presença de perturbações e variações bruscas na magnitude de referência, ao passo que as ações integral e derivativa garantem tanto a eliminação de erros de regime permanente, quanto a antecipação do comportamento do processo, respectivamente.

2.2.2 Sintonia de Controladores PID

São muitos os métodos existentes para a sintonia de controladores P, PD, PI e PID, ou seja, para o ajuste dos ganhos desses controladores. Os mais encontrados na literatura são: métodos de Ziegler-Nichols, método da resposta ao salto, método da realocação de polos e método dos relés em malha fechada.

De acordo com Perondi (2010), devido a problemas encontrados na prática, como erros de modelagem, não-linearidades, erros paramétricos e ruídos provenientes de instrumentos de medição, muitas vezes estes métodos não são suficientes para o ajuste dos parâmetros destes controladores. Desta forma, técnicas e ferramentas mais avançadas podem vir a ser utilizadas, tais como: controle adaptativo, controle ótimo, controle robusto, controle por linearização ou por realimentação e controle por modos deslizantes.

Devido ao fato do sistema a ser controlado ser do tipo SISO (*Single Input Single Output*), optou-se pela utilização do método heurístico de Ziegler-Nichols, também conhecido como método do ponto crítico, que de acordo com Perondi (2010), consiste na determinação dos ganhos K_p , K_i e K_D dos controladores a partir de parâmetros obtidos através de testes experimentais realizados na planta a ser controlada. Os dois métodos propostos por Ziegler-Nichols para a determinação do ponto crítico são chamados de método do ponto crítico com controle *bang-bang* e método do ponto crítico com controle proporcional, sendo o último o método utilizado neste trabalho.

2.2.2.1 Método do Ponto Crítico com Controle Proporcional

Consiste na realização de um ensaio com o sistema operando em malha fechada com controle proporcional, no qual o valor do ganho K é aumentado lentamente até que apareça uma oscilação sustentada na saída do processo. O mínimo valor do ganho do controlador proporcional para o qual esta oscilação apareça é chamado de ganho crítico do processo (K_c), enquanto ao período da oscilação observada dá-se o nome de período crítico do processo (T_c). De posse destes parâmetros, o projeto do controlador se resume à utilização da Tabela 2.1.

Na Figura 2.2 a seguir são apresentados os dois métodos de Ziegler-Nichols propostos para a determinação do ponto crítico de um processo.

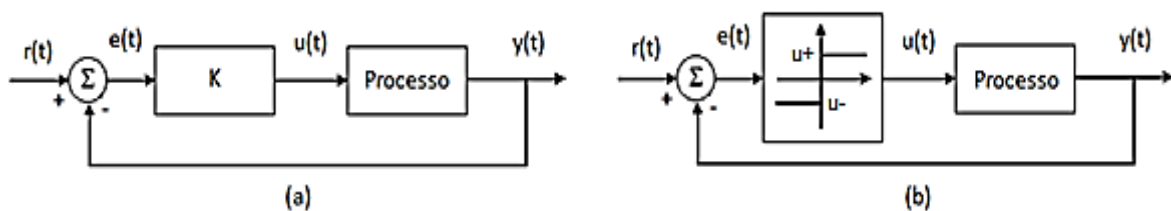


Figura 2: (a) Método do ponto crítico com controle proporcional e (b) Método do ponto crítico com controle *bang-bang* [Adaptado de Bazanella e Siva Jr, 2005]

As fórmulas propostas por Ziegler-Nichols para a realização do ajuste dos ganhos de controladores P, PI e PID são apresentadas na Tabela 2.1 a seguir.

Tabela 2.1: Fórmulas de Ziegler-Nichols [Fonte: Bazanella e Silva Jr, 2005]

Tipo de Controlador	K_P	T_I	T_D
P	$0,5K_c$	-	-
PI	$0,4K_c$	$0,8T_c$	-
PID	$0,6K_c$	$0,5T_c$	$0,125T_c$

2.2.3 Identificação de Sistemas

Segundo Aguirre (2004), a identificação de sistemas consiste em um procedimento alternativo que objetiva a obtenção de um modelo matemático que relacione causa e efeito presente nos dados. As principais etapas de um processo de identificação são:

1. Testes dinâmicos e aquisição de dados;
2. Escolha da representação matemática a ser usada;
3. Determinação da estrutura do modelo;

4. Estimação de parâmetros;
5. Validação do modelo.

No presente trabalho, optou-se pela utilização de um método baseado em regressão linear, denominado estimador de mínimos quadrados, uma vez que este é o método mais utilizado na identificação de parâmetros de funções de transferência em modelos discretos, sendo a base para o desenvolvimento de outros métodos de identificação. Segundo este método, modelos de sistemas físicos podem ser representados pela seguinte função de transferência discreta:

$$P(z) = G(z)z^{-d} = \frac{B(z^{-1})z^{-1}}{A(z^{-1})} z^{-d} \quad (2.2)$$

Onde:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{na}z^{-na} \quad (2.3)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{nb}z^{-nb} \quad (2.4)$$

Deseja-se determinar os parâmetros a_i e b_i , bem como o tempo morto d . A saída $y(t)$ do modelo descrito pela Equação (2.2) pode ser expressa por:

$$y(t) = -a_1y(t-1) - a_2y(t-2) - \dots - a_{na}y(t-na) + b_0u(t-d-1) + b_1u(t-d-2) + \dots + b_{nb}u(t-d-nb-1) + e(t)$$

que pode ser escrita na forma vetorial como:

$$y(t) = \Phi^T(t)\theta + e(t) \quad (2.5)$$

onde $\Phi^T(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-na)u(t-d-1) \dots u(t-d-nb-1)]$ é chamado de vetor de regressão e $\theta = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{na} \ b_0 \ b_1 \ b_{nb}]$ é o vetor de parâmetros. Considerando uma sequência de $y(t)$ para $t = 1, 2, \dots, N$, a Equação (2.5) pode ser expressa da seguinte forma:

$$Y = \Phi\theta + \epsilon \quad (2.6)$$

onde $Y = [y(1) \ y(2) \ \dots \ y(N)]^T$, $\Phi(t) = [\phi(1) \ \phi(2) \ \dots \ \phi(N)]^T$, $\epsilon = Y - \Phi\theta$. O objetivo é encontrar uma estimação para o vetor de parâmetros ($\hat{\theta}$) utilizando os dados de $y(t)$ e Φ^T , de tal forma que o erro de identificação $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ seja minimizado. O estimador de mínimos quadrados é definido como sendo o vetor $\hat{\theta}$ que minimiza o erro quadrático e é definido por:

$$\hat{\theta} = (\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^TY \quad (2.7)$$

3 Materiais e Métodos

Como ponto de partida para este trabalho, e com o intuito de simular o sistema real, optou-se pela utilização da infraestrutura do Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC) para a adaptação de uma bancada experimental.

A bancada é constituída por uma plataforma Arduino Mega, um sensor de temperatura NTC, duas válvulas de gaveta, sendo uma para a linha de água fria e outra para a linha de água quente, um motor de passo NEMA17, um *driver* de potência A4988 DMOS, um sistema de redução, composto por um par de engrenagens, um reservatório de água quente, um reservatório para a água de saída do misturador e canos de PVC.

O reservatório de água quente é utilizado para armazenar a água quente proveniente de um aquecedor a gás. O reservatório de água de saída, por sua vez, é utilizado para o armazenamento da água de saída do sistema, que corresponde à água na temperatura desejada para o banho.

O sensor de temperatura é utilizado para realizar a medição da temperatura da água na saída do misturador, ou seja, para realizar a realimentação do sistema em malha fechada. Cabe ressaltar, que o sensor de temperatura está instalado próximo à saída do misturador, em uma região de alta turbulência, a fim de aumentar a precisão da medição.

O Arduino Mega é utilizado para realizar a aquisição e o processamento de sinais analógicos, assim como para a realização dos cálculos do sistema de controle.

A válvula gaveta da linha de água fria é utilizada para realizar o ajuste manual da vazão de água fria do sistema. A válvula gaveta da linha de água quente, por sua vez, é utilizada para realizar o ajuste automático da vazão de água quente, necessária por manter a temperatura na saída do misturador igual à temperatura de referência definida pelo usuário.

O motor de passo corresponde ao atuador elétrico escolhido para realizar a abertura da válvula gaveta da linha de água quente. Este irá atuar sobre a válvula em resposta aos sinais de controle provenientes do Arduino, de forma que:

- *Temperatura medida menor do que a temperatura desejada:* O atuador irá agir sobre a válvula de forma a abri-la, aumentando a vazão de água quente e, conseqüentemente, aumentando a temperatura de saída do processo.
- *Temperatura medida maior do que a temperatura desejada:* O atuador irá agir sobre a válvula de forma a fechá-la, diminuindo a vazão de água quente e, conseqüentemente, reduzindo a temperatura de saída do processo.

Na Figura 3.1 a seguir, tem-se uma ilustração da bancada experimental, bem como a descrição de alguns dos componentes que a compõe.

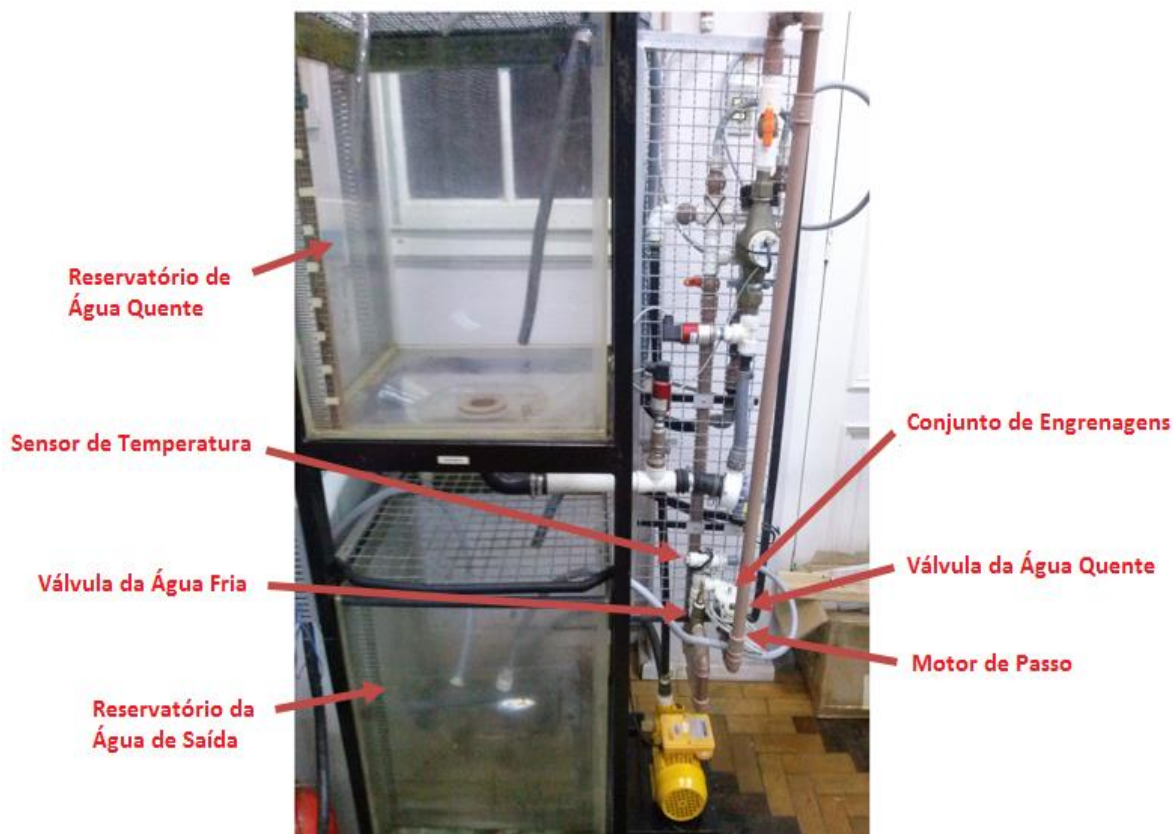


Figura 3.1: Bancada experimental implementada no LAMECC [Fonte: Autor]

3.1 Válvula de Controle

Para controlar a vazão da linha de água quente do sistema e, conseqüentemente, a temperatura da água de saída do chuveiro, é necessária a utilização de uma válvula de controle, acoplada a algum tipo de atuador, seja este elétrico, pneumático ou hidráulico.

Levando-se em conta fatores como baixo custo de aquisição em relação às válvulas borboleta, globo e esfera, por exemplo, bem como o baixo torque de acionamento, optou-se pela utilização de uma válvula gaveta, conforme se verifica na Figura 3.2 a seguir.

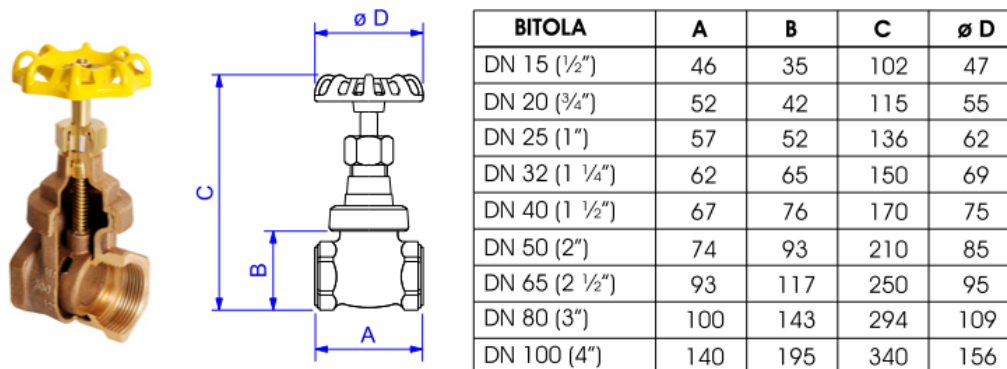


Figura 3.2: Válvula gaveta utilizada [Fonte: Deca, 2014]

Segundo Ribeiro (1999), a principal característica deste tipo de válvula está na sua mínima obstrução à passagem de fluido quando totalmente aberta, proporcionando baixa turbulência, com um diferencial de pressão quase insignificante. Isto é possível porque o seu sistema de vedação, conhecido como obturador, atua perpendicularmente à linha de fluxo. Em geral, estas válvulas são empregadas em processos onde não se necessitam operações frequentes de abertura e fechamento, pois o seu manuseio é mais lento quando comparado ao de válvulas de controle.

3.1.1 Calibração e Cálculo de Incertezas da Válvula Gaveta

Tendo em vista que as válvulas de gaveta não se tratam especificamente de válvulas de controle, parâmetros e curvas referentes ao comportamento destas dificilmente são encontrados nos catálogos e manuais de fabricantes. Desta forma, obteve-se o modelo da válvula de forma experimental.

O procedimento adotado consistiu na abertura gradual da válvula de 10 em 10 graus, através do acionamento do motor de passo, bem como na medição da vazão volumétrica correspondente através de um medidor de vazão. Para tanto, sabendo que a abertura máxima da válvula corresponde a 1440 graus, e que o motor de passo foi configurado para trabalhar com resolução de 0,1125 graus/ passo, conclui-se que são necessários 12800 passos para realizar a abertura total da válvula, partindo-se de sua posição totalmente fechada.

Desta forma, as incertezas na medição da vazão de água foram calculadas por amostragem, através de cinco ensaios experimentais. A partir dos valores dos ensaios, calculou-se a média e a incerteza do tipo A para um desvio padrão, conforme se verifica na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Média dos valores e incerteza tipo A [Fonte: Autor]

Abertura da Válvula [%]	Vazão Média [litros/min]	Incerteza Tipo A [litros/min]
0	0,00	0,00
10	0,01	0,00
20	0,09	0,04
30	0,74	0,04
40	1,95	0,04
50	2,48	0,03
60	3,10	0,04
70	3,26	0,04
80	3,29	0,04
90	3,37	0,02
100	3,38	0,03

Através dos valores coletados nos ensaios, e com o auxílio da ferramenta *cftool* (*Curve Fitting Tool*) do *Matlab-Simulink*®, obteve-se o ajuste da curva que modela o comportamento da válvula de gaveta, a qual pode ser conferida na Figura 3.3, assim como as incertezas associadas à válvula, que para fins de análise foram multiplicadas por 10.

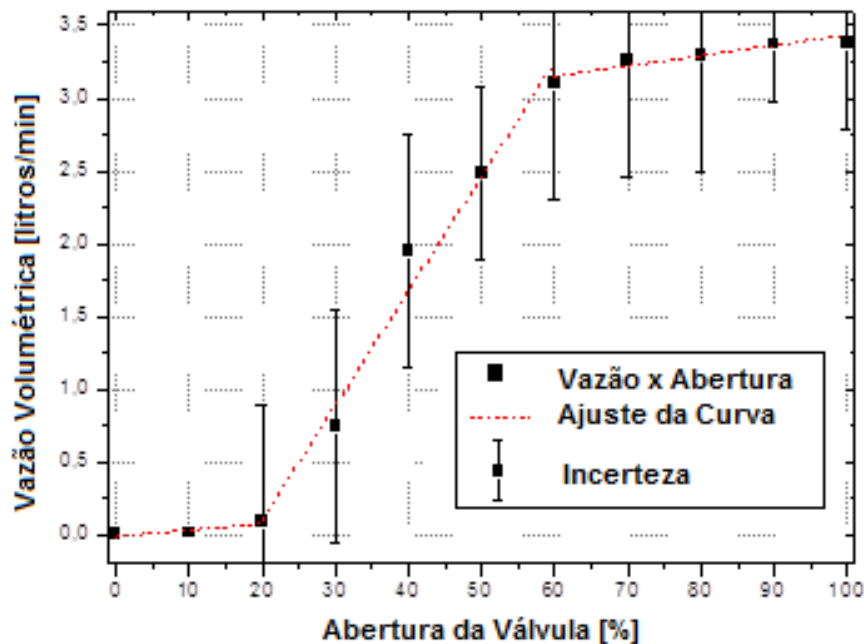


Figura 3.3: Incertezas da válvula de gaveta [Fonte: Autor]

A curva que modela o comportamento aproximado da válvula, por sua vez, foi aproximada por três funções de 1º grau, dadas pelas Equações (3.1) a (3.3) a seguir.

$$q(x) = 0,0045x - 0,015; 0 \leq x \leq 20 \quad (3.1)$$

$$q(x) = 0,0786x - 1,47; 20 < x \leq 60 \quad (3.2)$$

$$q(x) = 0,0072x + 2,718; 60 < x \leq 100 \quad (3.3)$$

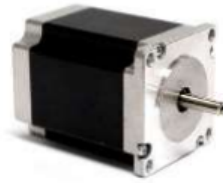
Onde:

- $q(x)$ = vazão volumétrica da válvula $\left[\frac{\text{litros}}{\text{min}} \right]$
- x = abertura da válvula [%]

3.2 Atuador

Como a abertura da válvula de gaveta utilizada é manual, faz-se necessária a utilização de um atuador para a realização do controle automático desta. Este atuador pode ser elétrico, pneumático ou hidráulico, e em resposta a um sinal, deve mover a válvula para a posição desejada usando uma fonte externa de potência.

Neste trabalho, optou-se pela utilização de um motor de passo, que embora mais caros e menos velozes que os motores DC, são mais precisos, possuem boa repetitividade, e são extremamente fáceis de usar, possuindo uma interface simples e compatível com microcontroladores, como a plataforma Arduino Mega, por exemplo. Além disso, podem operar em malha aberta com acurácia de ± 1 passo, não necessitando de sensor de posição. As especificações do motor utilizado podem ser conferidas na Figura 3.4 a seguir:



Modelo/Número: NEMA17-4401

Tipo: Híbrido

Fases: 2

Corrente por Fase: 1,7A

Ângulo de Passo: 1,8°

Precisão Angular do Passo: $\pm 5\%$

Precisão da Resistência: $\pm 10\%$

Precisão da Indutância: $\pm 20\%$

Figura 3.4: Motor de passo utilizado [Fonte: Allegro MicroSystems, 2014]

Tendo em vista que o torque máximo gerado pelo motor utilizado não é suficiente para abrir a válvula, utilizou-se um sistema de redução de 2x1, composto por um par de engrenagens, instaladas no motor de passo e na válvula de gaveta, de acordo com a Figura 3.5.

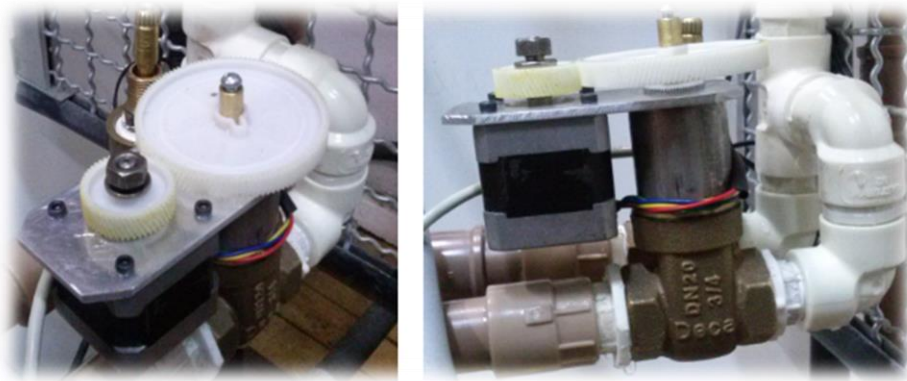


Figura 3.5: Sistema de redução 2x1 utilizado no sistema válvula + atuador [Fonte: Autor]

3.3 Driver de Potência

Tendo em vista que os sinais enviados pelo Arduino são de baixa potência, e que a corrente por fase do atuador escolhido é de 1,7 A, faz-se necessária a utilização de um *driver* de potência. Desta forma, optou-se pela utilização de um *driver* específico para acionamento de motores de passo, denominado A4988 DMOS.

A escolha deu-se devido ao seu baixo custo de aquisição, bem como pelo fato deste *driver* permitir o controle da direção e do passo de um motor de passo bipolar com corrente de até 2 A por bobina de saída. As demais características de interesse do *driver* A4988 DMOS são listadas a seguir:

- Capacidade de Saída: Até 35 V – 2 A;
- Resoluções Possíveis: Passo completo, 1/2 passo, 1/4 passo, 1/8 passo e 1/16 passo;
- Ajuste da corrente de saída;

- Proteção com desligamento térmico com histerese, bloqueio de subtensão e proteção de corrente;
- Controle inteligente, que seleciona automaticamente o modo de decaimento correto da corrente.

A seguir, na Figura 3.6, tem-se uma ilustração do *driver* de potência utilizado, bem como um diagrama esquemático contendo as ligações deste ao Arduino e ao motor de passo, respectivamente.

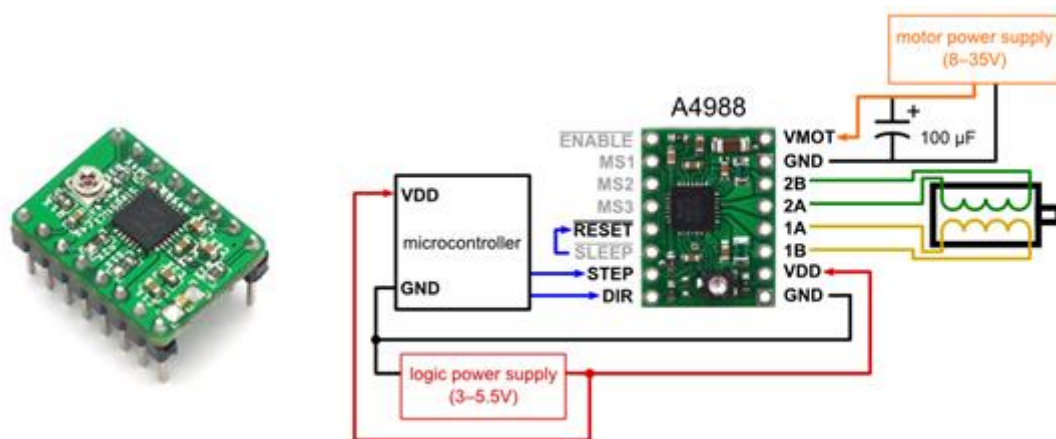


Figura 3.6: Driver de potência A4988 [Adaptado de Pololu Robotics e Electronics, 2014]

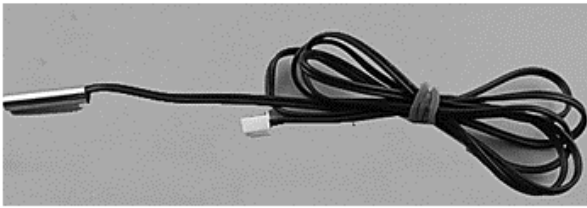
3.4 Sensor de Temperatura

Para realizar o controle de temperatura da água, é necessária a realimentação da temperatura de saída do sistema, para que seja possível realizar a comparação desta com a temperatura de referência.

Desta forma, optou-se pela utilização de um sensor do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*), um componente eletrônico semicondutor e sensível à temperatura, utilizado em geral para faixas de medições entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. A escolha deu-se, principalmente, em função de seu baixo custo em comparação aos demais sensores disponíveis para este tipo de aplicação, como o PTC e o PT100, por exemplo. Enquanto o PT100 é mais estável e linear, o NTC é mais sensível, devido ao seu elevado coeficiente de temperatura. Além disso, possui precisão de $\pm 1\%$ em relação à sua faixa de operação ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Segundo Thomazini e Albuquerque (2005), o sensor NTC possui um coeficiente de variação de resistência que varia negativamente com o aumento da temperatura, ou seja, a sua resistência elétrica diminui com o aumento da temperatura, e a resposta deste à variação da temperatura medida é não linear.

Na Figura 3.7 é ilustrado o sensor NTC utilizado e suas especificações técnicas, retiradas do catálogo do fabricante.



Tipo: NTC 10k \pm 1% 3950

Cápsula de aço inox a prova de água

Tamanho da cápsula: 5 x 25 mm

Faixa de Medição: -20 a 105 °C

Saída: 2 fios

Constante B: 3380k \pm 1%

Dissipação Típica: 5mW/°C

Figura 3.7: Sensor NTC 10k [Fonte: ADD Therm, 2014]

3.4.1 Calibração e Cálculo de Incertezas do Sensor NTC

Realizou-se a calibração do termistor de forma experimental. Para a medição da resistência elétrica do sensor, utilizou-se um multímetro digital. Calibrou-se o sensor através de um termômetro de mercúrio com resolução de 0,1 °C, sendo a calibração realizada da seguinte forma:

- Primeiramente, acoplou-se adequadamente o sensor de temperatura ao termômetro;
- Em seguida, colocou-se água fervente dentro de uma garrafa térmica, sendo então colocados o sensor NTC juntamente com o termômetro de mercúrio;
- Aguardou-se alguns instantes até a estabilização da temperatura no termômetro, sendo então realizada a leitura da resistência do sensor através do multímetro;
- Por fim, repetiu-se o procedimento para diferentes temperaturas de água na garrafa térmica, na faixa de 5 °C até 80 °C.

Na Figura 3.8 a seguir, tem-se uma ilustração do procedimento realizado para a calibração do sensor de temperatura.



Figura 3.8: Procedimento realizado para a calibração do sensor NTC [Fonte: Autor]

Desta forma, obteve-se o gráfico da variação da resistência em função da temperatura para diferentes patamares de temperaturas. Com o auxílio da ferramenta *cftool* (*Curve Fitting Tool*) do *Matlab-Simulink*[®], utilizou-se uma função exponencial do tipo $T(R) = Ae^{BR}$ para realizar a interpolação dos valores intermediários de temperatura. A curva obtida é dada pela Equação (3.5) a seguir.

$$T(R) = 86,81e^{-0,1343R} \quad (3.5)$$

Onde:

- R = resistência do NTC [kΩ]
- T = temperatura medida [°C]

Tratando-se de um procedimento experimental, várias incertezas estão envolvidas no processo, tanto na medição, quanto na calibração em si. Tendo em vista que foram realizados apenas dois ensaios de calibração, optou-se por realizar apenas a análise de incertezas do tipo B, a qual é realizada através dos dados fornecidos pelos catálogos dos fabricantes. Assim, de posse da curva de calibração do sensor, é realizada a seguir a análise das incertezas associadas à calibração, ou seja:

- i. Incerteza do Sensor: De acordo com o catálogo do fabricante, a incerteza do sensor é de $\pm 1\%$ na faixa de medição entre -20 °C e 105 °C. Assim, tem-se:

$$\frac{\partial T(R)}{\partial R} = 86,81(-0,1343)e^{-0,1343R} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{R1} = 0,01 \quad (3.7)$$

$$\sigma_{T1} = \frac{\partial T(R)}{\partial R} \sigma_{R1} = 86,81(-0,1343)e^{-0,1343R}(0,01) \quad (3.8)$$

- ii. Incerteza do Multímetro: Para fins de cálculo, utilizou-se os dados fornecidos pelo manual do fabricante, ou seja:

- Multímetro Digital Modelo MD-606pro;
- Resolução na Escala de 40 kΩ igual a 10 Ω;
- Exatidão de $\pm (1\% + 2D)$.

Logo, considerando $2D = 10$ Ω, tem-se: Exatidão de $\pm (1\% + 0,01)$ kΩ. Assim:

$$\sigma_{R2} = 0,01R + 0,01 \quad (3.9)$$

$$\sigma_{T2} = \frac{\partial T(R)}{\partial R} \sigma_{R2} = 86,81(-0,1343)e^{-0,1343R}(0,01R + 0,01) \quad (3.10)$$

- iii. Incerteza do Termômetro: Calibrou-se o sensor de acordo com os valores de temperatura fornecidos pelo termômetro, no entanto, o valor de temperatura medido pelo termômetro também possui uma incerteza associada. Para fins de simplificações dos cálculos, a incerteza associada ao elemento sensor de calibração

foi desprezada, sendo os valores de temperatura lidos no termômetro considerados absolutos.

A incerteza combinada é então dada pela Equação (3.11), ou seja:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_{T1}^2 + \sigma_{T2}^2} \quad (3.11)$$

Com base na equação anterior, calculou-se a incerteza para cada um dos valores de resistência medidos durante a calibração, de acordo com a Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Incerteza do sensor NTC 10k utilizado [Fonte: Autor]

Resistência [kΩ]	Temperatura [°C]	Incerteza Combinada [°C]
26,0	4,9	0,1
18,4	10,5	0,2
14,5	15,6	0,2
12,7	18,7	0,3
9,9	24,8	0,3
8,1	30,2	0,4
6,6	35,0	0,4
5,2	40,6	0,4
4,4	44,9	0,3
3,5	49,9	0,3
2,9	54,5	0,3
2,4	59,8	0,3
2,0	65,3	0,3
1,7	70,4	0,3
1,5	74,9	0,2
1,2	79,8	0,2

Analogamente à válvula de gaveta, obteve-se o ajuste da curva que modela o comportamento do sensor NTC 10k através dos valores coletados nos ensaios e da ferramenta *cftool* (*Curve Fitting Tool*). A curva obtida, assim como as incertezas associadas ao sensor estão ilustradas na Figura 3.9. Neste caso, para fins de análise, também multiplicou-se as incertezas associadas ao sensor por um fator 10.

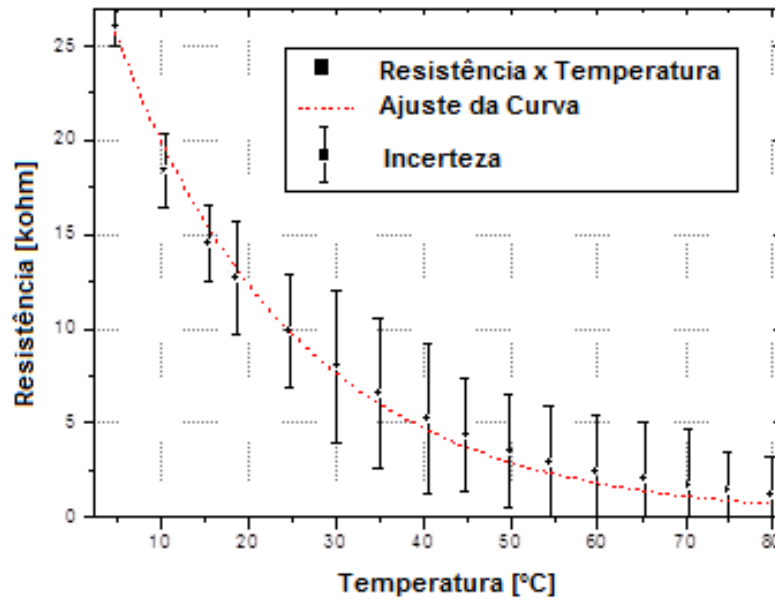


Figura 3.9: Curva medida x curva aproximada do sensor NTC [Fonte: Autor]

Como verifica-se no gráfico da Figura 3.9, os valores das constantes A e B foram obtidos considerando-se uma faixa de variação da temperatura situada entre 5 °C e 80 °C. Logo, esta é a faixa de medição na qual o sensor está apto a medir.

De acordo com Thomazini e Albuquerque (2005), a constante de tempo térmica de um sensor de temperatura corresponde ao tempo necessário para que este mude 63,2% do resultado final entre a sua temperatura de encapsulamento inicial e final, quando submetido a uma mudança de função degrau na temperatura sob condições de potência inicial, conforme ilustrado na Figura 3.10 a seguir.

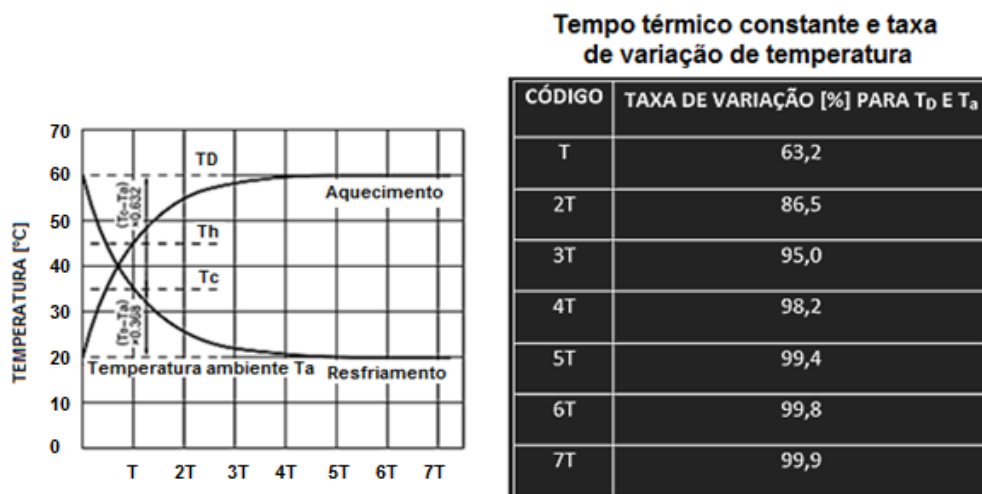


Figura 3.10: Tempo de resposta de sensores [Adaptado de ADD Therm, 2014]

Para o sensor de temperatura utilizado, realizaram-se cinco ensaios partindo-se da temperatura ambiente, próxima de 26 °C, e submetendo-se o sensor a um degrau de temperatura de 67 °C, onde constatou-se um tempo de resposta médio de aproximadamente 9 segundos, que se deve basicamente à inércia térmica do sensor.

3.5 Plataforma Arduino Mega

Para realizar a aquisição e o envio de sinais aos sensores e atuadores, bem como para realizar a implementação das malhas de controle do controlador PID, optou-se pela utilização da plataforma Arduino Mega. A escolha deu-se principalmente em função da sua simplicidade de utilização e de programação em linguagem C/C++. Além disso, a plataforma possui baixo custo de aquisição, e possibilita a expansão de suas funcionalidades através da utilização de placas adicionais (*shields*), que se encaixam perfeitamente ao Arduino.

4 MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

A seguir é apresentada a etapa de modelagem e identificação de parâmetros do sistema. Inicialmente, é realizada a modelagem analítica do sistema considerando apenas a situação do regime permanente (RP). Em seguida, é feita a identificação experimental do sistema através do método dos mínimos quadrados.

4.1 Modelagem Analítica do Sistema

A modelagem analítica do sistema corresponde à determinação das equações que regem o comportamento deste em estado estacionário. As equações foram obtidas através dos balanços de massa e energia do sistema, considerando-se o volume de controle apresentado na Figura 4.1 a seguir.

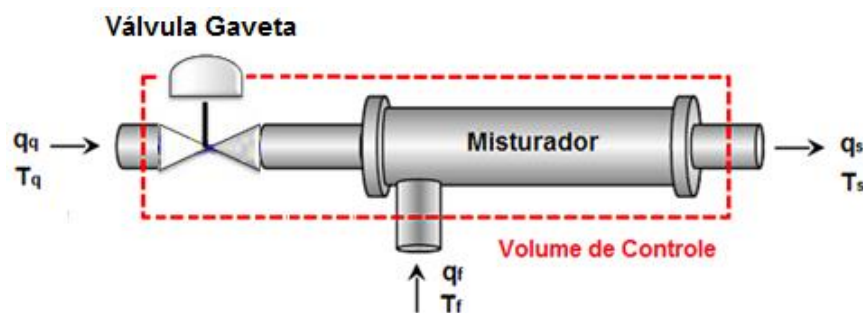


Figura 4. 1: Volume de controle considerado [Fonte: Autor]

4.1.1 Balanço de Volume

A vazão volumétrica de saída do sistema é igual à soma das vazões volumétricas que entram no sistema. Neste caso, as vazões volumétricas de entrada correspondem às vazões das linhas de água fria e de água quente, enquanto a vazão volumétrica de saída corresponde à vazão de água da mistura. Assim, tem-se que:

$$q_S = q_F + q_Q \quad (4.1)$$

Onde:

- q_F = vazão volumétrica de água fria $\left[\frac{\text{litros}}{\text{min}} \right]$
- q_Q = vazão volumétrica de água quente $\left[\frac{\text{litros}}{\text{min}} \right]$
- q_S = vazão volumétrica de água da mistura $\left[\frac{\text{litros}}{\text{min}} \right]$

4.1.2 Balanço de Energia

Desprezando-se as perdas para as paredes da tubulação, assim como o volume de água contido no volume de controle do misturador, e sabendo-se que o calor que entra no sistema é igual ao calor que sai do sistema, pode-se dizer que a taxa de variação do calor armazenado neste é igual a zero. Desta forma, tem-se:

$$Q_S = Q_E \quad (4.2)$$

Logo:

$$(q_F + q_Q)c_{H_2O}(T_S - T_{REF}) = q_F c_{H_2O}(T_F - T_{REF}) + q_Q c_{H_2O}(T_Q - T_{REF})$$

Através de manipulações algébricas chegou-se à Equação (4.3), que descreve o comportamento da temperatura de saída da mistura em estado estacionário:

$$T_S = \frac{q_F T_F + q_Q T_Q}{q_F + q_Q} \quad (4.3)$$

Onde:

- Q_E = calor que entra no sistema [J]
- Q_S = calor que sai do sistema [J]
- q_F = vazão volumétrica de água fria $\left[\frac{\text{litros}}{\text{min}}\right]$
- q_Q = vazão volumétrica de água quente $\left[\frac{\text{litros}}{\text{min}}\right]$
- q_S = vazão volumétrica de água da mistura $\left[\frac{\text{litros}}{\text{min}}\right]$
- T_F = temperatura da água fria [°C]
- T_Q = temperatura da água quente [°C]
- T_S = temperatura da água da mistura [°C]
- T_{REF} = temperatura de referência [°C]
- c_{H_2O} = calor específico da água $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}\right]$

Durante os experimentos, considerou-se a temperatura e a vazão volumétrica da água fria constantes e iguais a 26 °C e 2 litros/min, respectivamente, enquanto a temperatura da água quente foi mantida próxima de 65 °C. Assim, a Equação (4.3) pode ser reescrita como:

$$T_S = \frac{52 + 65q_Q}{2 + q_Q} \quad (4.4)$$

Desta forma, supondo que, com a válvula da linha de água quente totalmente aberta, a vazão da linha de água fria permaneça constante e próxima de 2 litros/min, conclui-se que a máxima temperatura que o sistema pode atingir para essas condições de operação é aproximadamente 50 °C.

4.2 Identificação Experimental do Sistema

Conforme mencionado no capítulo de revisão bibliográfica, a identificação experimental do sistema foi realizada através do método dos mínimos quadrados. Desta forma, com o sistema operando em malha aberta e sem controle, aplicou-se na entrada do processo uma entrada do tipo degrau (abertura da válvula). A partir deste instante, foram coletados os dados da temperatura de saída do sistema, bem como do tempo decorrido.

De posse dos dados coletados na bancada, optou-se pela utilização do *software Matlab-Simulink*® para a obtenção do modelo do sistema, o qual dispõe de uma ferramenta que realiza a identificação computacional de sistemas através do método dos mínimos quadrados, denominada *System Identification*.

Após a definição da entrada e da saída do sistema, ambos na forma de vetor coluna, deve-se abrir a ferramenta *System Identification Tool* e, em seguida, clicar em *Import data* → *Time domain data*. Como resultado, é aberta uma nova janela, denominada *Import Data*, como ilustrado na Figura 4.2.

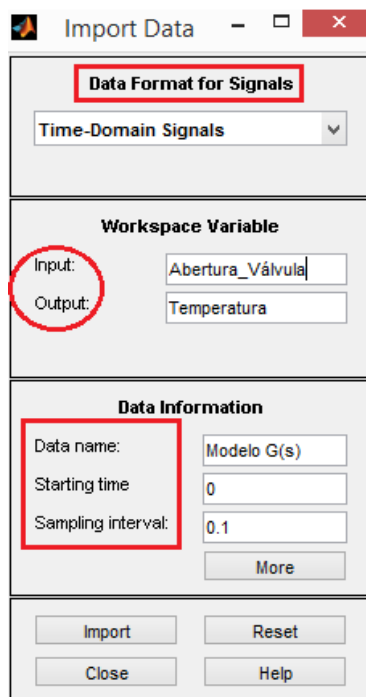


Figura 4. 2: Janela *Import Data* [Fonte: Autor]

No campo *Input*, por sua vez, deve-se inserir o nome que foi dado ao vetor da entrada do sistema, que neste caso foi chamado de “Abertura_Válvula”. Já no campo *Output*, deve-se inserir o nome que foi dado ao vetor da saída, neste trabalho chamado de “Temperatura”. Em *Data name*, por sua vez, é atribuído o nome que o *System Identification* dará ao conjunto de entrada e saída (“Modelo G(s)”), enquanto em *Starting time* e em *Sampling interval* são informados o tempo inicial e o período de amostragem utilizado na coleta dos vetores de entrada e saída, respectivamente. Neste trabalho, utilizou-se um período de amostragem de 0,1 segundos.

Após o preenchimento de todas as lacunas do *Import Data*, é necessário clicar em *Import* e retornar à janela referente ao *System Identification*. Feito isso, observa-se que o

programa cria um sistema com o nome escolhido, possibilitando assim que seja efetuada a verificação do sistema. Feita a verificação, basta então selecionar o sistema correto, arrastá-lo para o ponto *Working Data* e clicar em *Estimate* → *Process Models*.

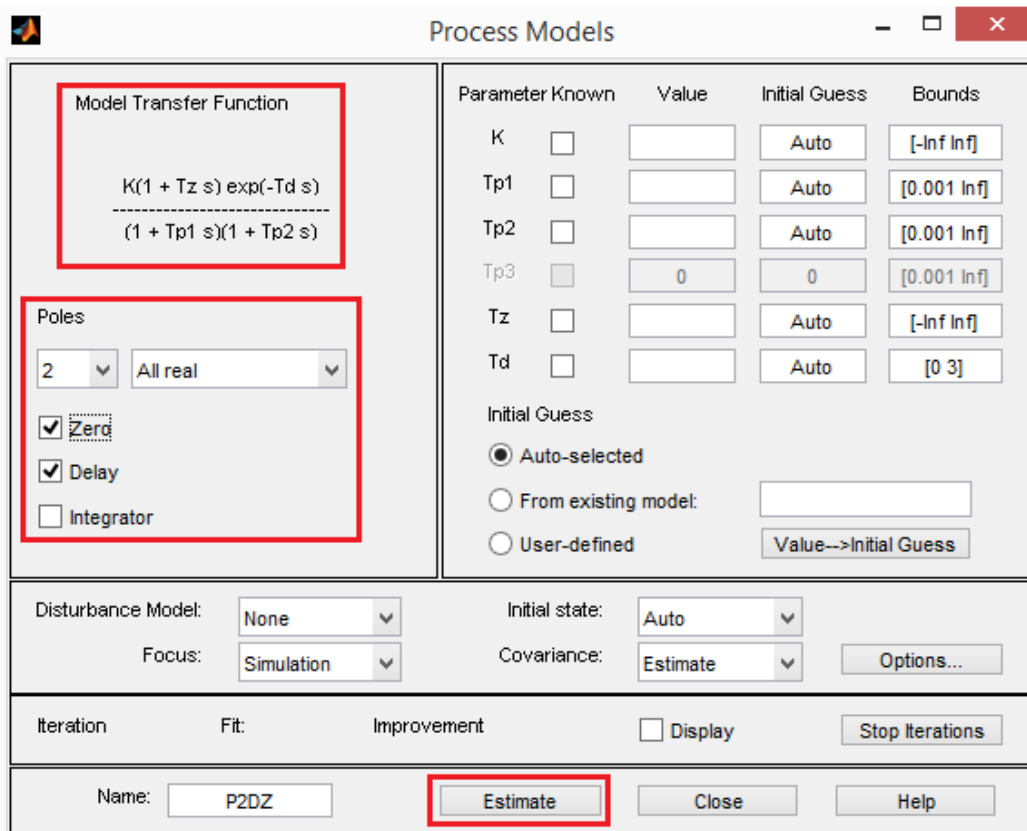


Figura 4. 3: Janela *Process Models* [Fonte: Autor]

O *System Identification* dispõe de algumas aproximações padrão para o sistema que está sendo definido, tais como:

- Máximo três polos (reais ou imaginários);
- Apenas um integrador (polo na origem);
- Apenas um zero;
- Com atraso.

Como a ordem do sistema é de certa forma “desconhecida” (sistema caixa preta), efetuou-se várias estimativas, com diferentes números de polos, com ou sem a presença de um zero e com ou sem atraso. Cabe ressaltar, que é possível visualizar os modelos gerados através da janela do *System Identification*, clicando-se na “caixa” *Model Output*, conforme ilustrado na Figura 4.4.

Além da identificação de modelos, esta ferramenta também calcula o percentual de exatidão (*Best Fits*) dos modelos aproximados, facilitando a escolha do tipo de sistema que melhor se aproxima do sistema medido (“sistema real”).

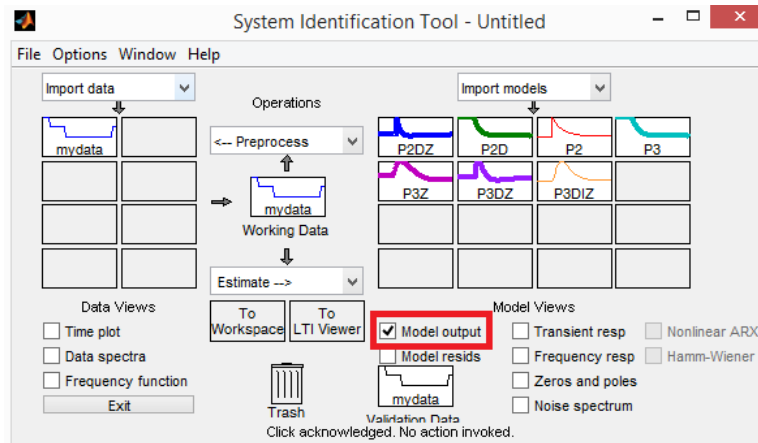


Figura 4.4: Ferramenta *System Identification* [Fonte: Autor]

Definida a melhor aproximação para o sistema, basta verificar novamente a janela *Process Models*, que mostra quais os valores dos parâmetros obtidos para o sistema, assim como a função de transferência deste. A Figura 4.5 a seguir ilustra o modelo que melhor se aproximou do sistema medido, de acordo os valores gerados pelo *Matlab* (*Best Fits*).

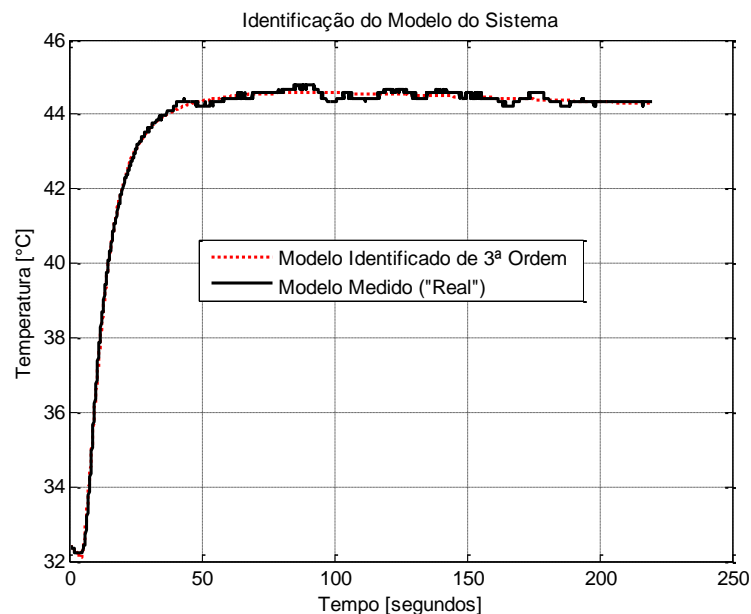


Figura 4.5: Modelo medido x modelo identificado [Fonte: Autor]

O modelo apresentado na Figura 4.5 representa um sistema de 3ª ordem, com um zero e com atraso, cuja relação entrada-saída é dada pela Equação (4.5).

$$G(s) = \frac{-0,0027718 (1-16163s)}{(s+0,0463)(s+0,1793)(s+0,3399)} e^{-3s} \quad (4.5)$$

De acordo com o *Matlab*, a precisão deste modelo (curva em vermelho pontilhada) em relação ao modelo medido (curva em preto contínua), é de 95,84%.

5 SINTONIA DO CONTROLADOR

O presente capítulo trata do ajuste dos parâmetros do controlador PID, ou seja, na obtenção experimental dos ganhos K_P , K_I e K_D do controlador através do método do ponto crítico com controle proporcional, de forma a garantirem um melhor desempenho para o sistema em malha fechada.

Desta forma, realizou-se um ensaio na bancada experimental com o sistema em malha fechada operando com controle puramente proporcional. O ganho proporcional foi então aumentado lentamente até o valor 400, instante no qual verificou-se uma pequena oscilação sustentada na saída do processo. A este ganho, que corresponde ao mínimo valor do ganho do controlador proporcional para o qual esta oscilação apareça, dá-se o nome de ganho crítico do sistema (K_C). De posse do ganho crítico K_C , partiu-se então para o cálculo aproximado do ganho K_P do controlador através da Tabela de Ziegler-Nichols, ou seja:

$$K_P = 0,6(400) = 240 \quad (5.1)$$

Tendo-se uma ideia do valor aproximado do ganho proporcional do controlador, optou-se por métodos empíricos para a obtenção dos valores dos ganhos integral e derivativo, conforme se verifica nos três experimentos a seguir.

5.1 Primeiro Experimento

Neste primeiro experimento, começou-se utilizando um valor para o ganho proporcional 25% abaixo do valor obtido através do método de Ziegler-Nichols, ou seja, $K_P=180$. Em seguida, aumentou-se o ganho integral do controlador até o valor $K_I=0,4$, verificando-se uma diminuição do erro estacionário da resposta do sistema, porém, um pequeno valor de sobrepasso. Aumentou-se então o ganho derivativo do PID até o valor $K_D=0,2$.

Os resultados práticos obtidos para este primeiro experimento podem ser conferidos na Figuras 5.1 a seguir, que contempla o comportamento da temperatura de saída do sistema em função do tempo, o sinal de controle $u(t)$, correspondente à abertura da válvula em radianos, e o sinal de erro do sistema, correspondente à diferença entre a temperatura de referência e a temperatura de saída da água do misturador, respectivamente.

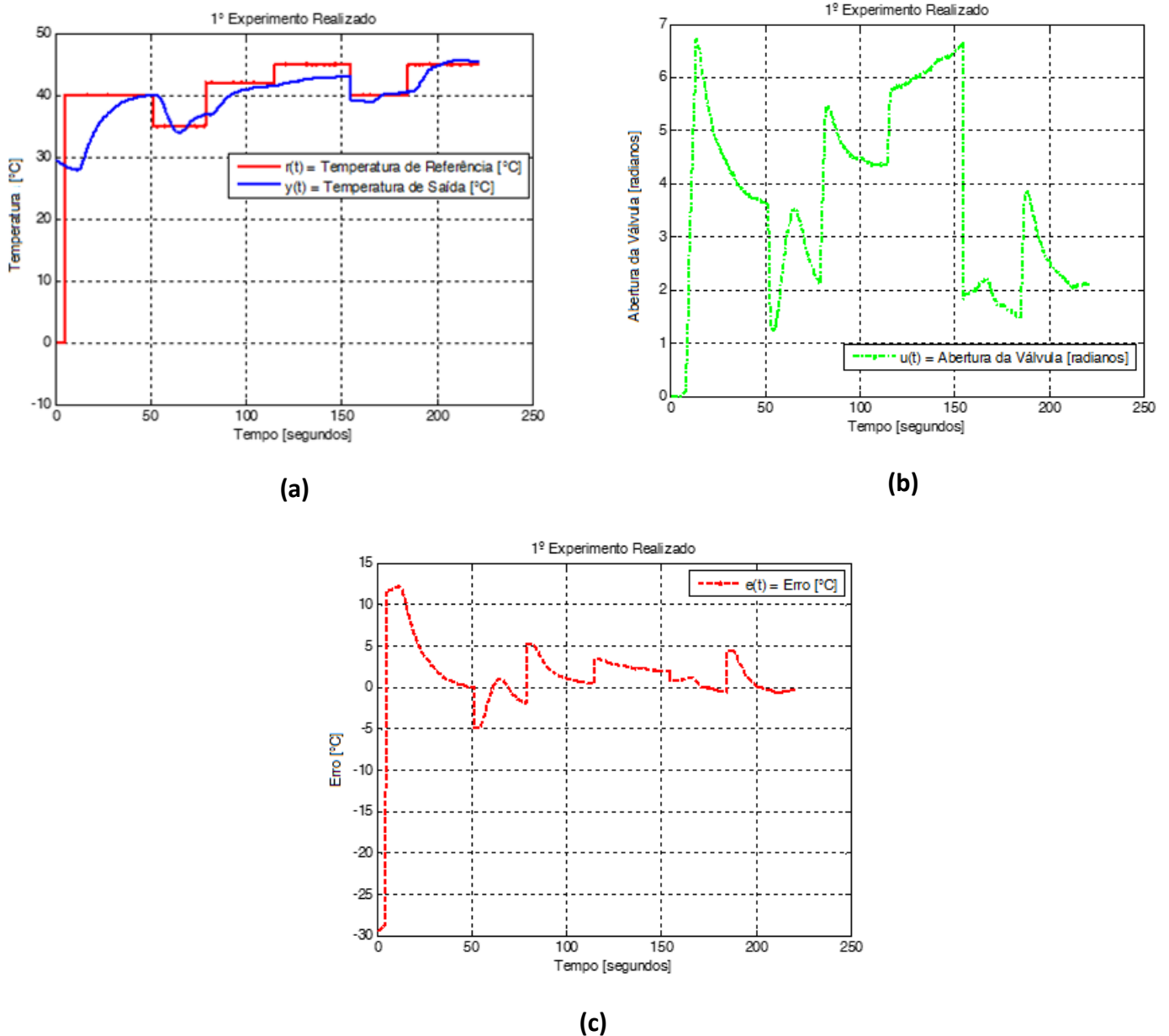


Figura 5.1: (a) Resposta do sistema, (b) Sinal de controle e (c) Sinal de erro [Fonte: Autor]

De acordo com a Figura 5.1, verifica-se que no instante de tempo 4,9 segundos, a temperatura de saída do misturador está próxima de 29 °C, quando é então aplicada uma referência do tipo degrau de 40 °C no sistema, fazendo com que o erro associado seja de 11 °C. O ganho proporcional age no sistema de forma a diminuir o erro de regime permanente, assim como o tempo de resposta do sistema, enquanto que o ganho integral age de forma a seguir a referência com erro nulo em regime permanente.

Conforme pode ser visto, durante os primeiros 50 segundos o sistema consegue seguir a referência com erro próximo de zero, porém, após a aplicação do segundo degrau de referência (35 °C) no instante de tempo igual a 50 segundos, o sistema começa a apresentar sobrepasso e a perder o seguimento de referência, o que ocorre em função do caráter antecipatório da ação derivativa associada à dinâmica lenta do sensor de temperatura, bem como aos pequenos valores dos ganhos proporcional e integral.

5.2 Segundo Experimento

Neste experimento, realizou-se um aumento nos ganhos proporcional e integral do controlador PID para $K_P=200$ e $K_I=0,65$, com o intuito de diminuir o tempo de resposta do sistema, bem como o erro de regime permanente. O ganho derivativo, por sua vez, tendo em vista que não alterou a resposta transitória do sistema, foi diminuído para $K_D=0,1$. A Figura 5.4 ilustra o comportamento da temperatura de saída do sistema em função do tempo para quatro referências do tipo salto (50 °C, 35 °C, 40 °C e 45 °C). Os sinais de controle $u(t)$ e do erro $e(t)$ são apresentados na Figura 5.2.

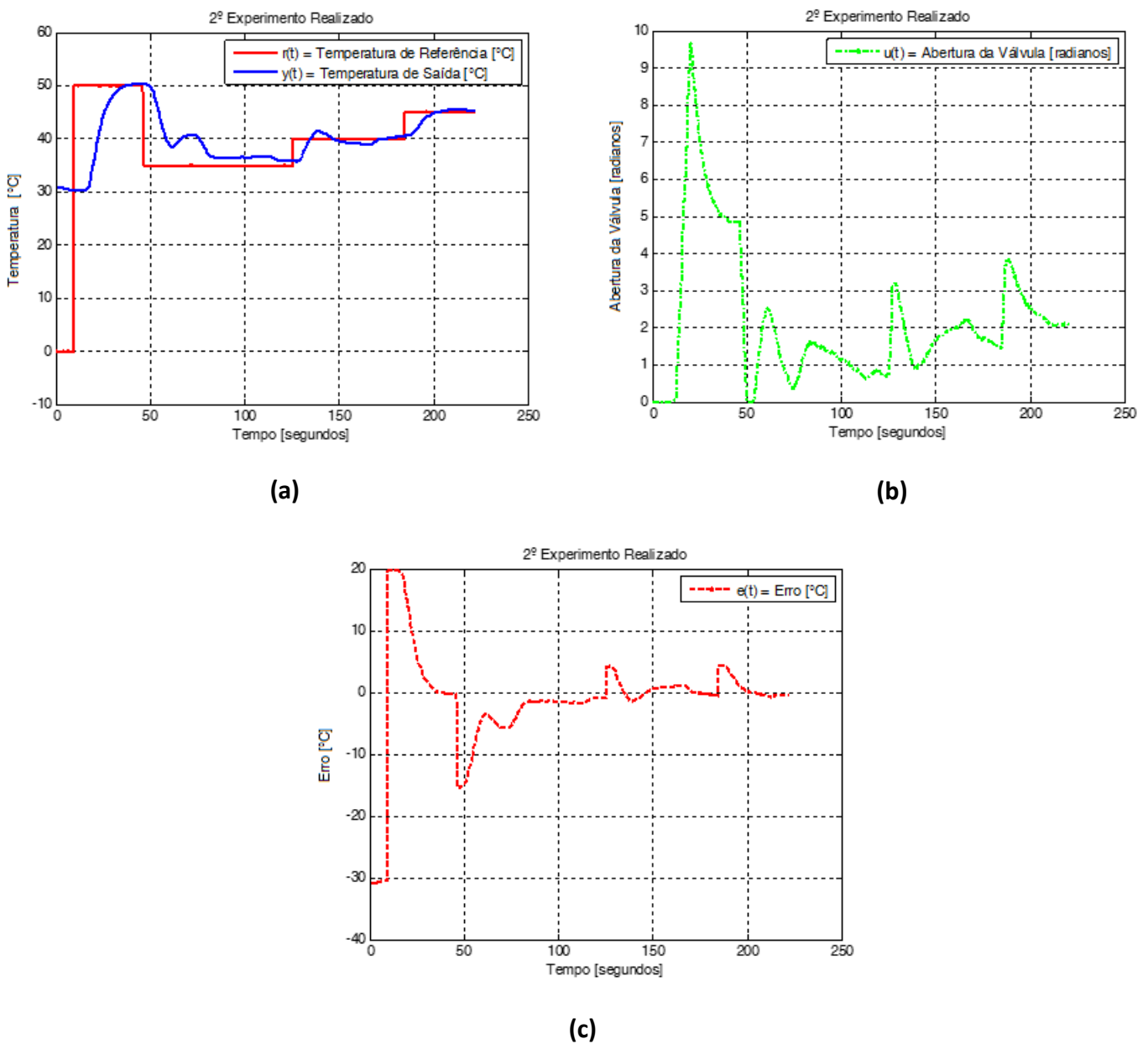


Figura 5.2: (a) Resposta do sistema, (b) Sinal de controle e (c) Sinal de erro [Fonte: Autor]

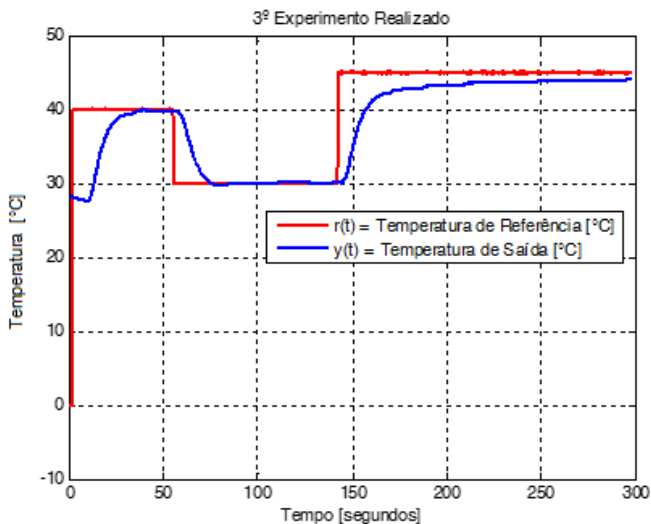
Analisando-se o gráfico (a) da Figura 5.2, percebe-se que no instante de tempo igual a 9,6 segundos, é aplicada uma referência do tipo degrau de 50 °C no sistema. Neste instante, a temperatura de saída do sistema está próxima de 31 °C, e o erro associado passa a ser de aproximadamente 20 °C, de acordo com o gráfico (c).

Conforme se verifica, o tempo de resposta do sistema para atingir 95% da resposta final se dá em torno de 30 segundos, sendo necessário, portanto, o aumento dos ganhos K_P e K_I , para que sejam diminuídos tanto o tempo de acomodação do sistema, quanto o erro em regime estacionário.

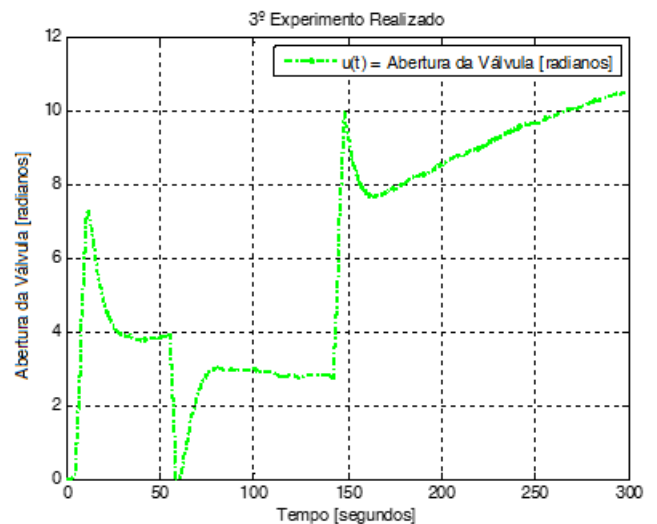
Ainda em função do caráter antecipatório do ganho derivativo, associado à velocidade de resposta do sensor de temperatura, verifica-se que para os três degraus de referência aplicados posteriormente ao sistema, este continua apresentando erro diferente de zero em RP, bem como pequenos valores de sobrepasso. Desta forma, optou-se pela não utilização de ganho derivativo no terceiro e último experimento, conforme segue.

5.3 Terceiro Experimento

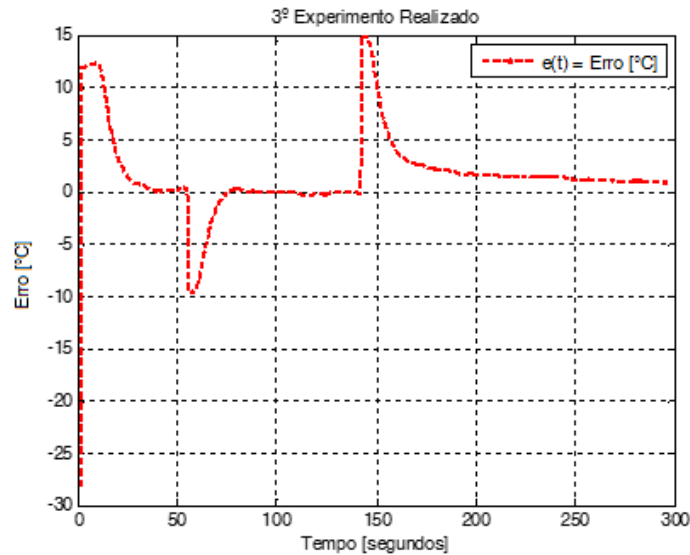
O terceiro experimento, por sua vez, mostra o ajuste final realizado nos ganhos do controlador. Neste caso, alterou-se o ganho proporcional para $K_P=220$, o ganho integral para $K_I=0,95$, e o ganho derivativo para $K_D=0$. A temperatura de saída do sistema em função do tempo para três referências do tipo salto, assim como o comportamento do sinal de controle $u(t)$ e do erro $e(t)$, estão ilustrados na Figura 5.3 (a), (b) e (c), respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.3: Resposta do sistema, (b) Sinal de controle e (c) Sinal de erro [Fonte: Autor]

De acordo com a Figura 5.3 (a), verifica-se que no instante de tempo 1,9 segundos é aplicada uma referência do tipo degrau de 40 °C no sistema, fazendo com que o sinal de erro seja de 12°C. Neste momento, a temperatura de saída do misturador é de aproximadamente 28 °C.

Com o aumento dos ganhos proporcional e integral, percebe-se uma melhora na resposta do sistema. Para o primeiro degrau aplicado, o sistema demora em torno de 25 segundos para atingir 95% da resposta final, enquanto que para o segundo degrau, o tempo de resposta é ainda menor, em torno de 20 segundos.

Desta forma, verifica-se que o aumento do ganho proporcional diminui o tempo de resposta do controlador, enquanto o aumento do ganho integral garante o seguimento de referência com erro próximo de zero em regime estacionário.

Para o último valor de referência de temperatura aplicado no sistema (45 °C), realizado no instante de tempo 142,5 segundos, percebe-se que o controle age de forma rápida no sistema, porém, não ocorre o seguimento de referência em RP. Tal fato é explicado em função de limitações físicas ocorridas no sistema, como a temperatura e a vazão da linha de água quente, que neste caso não são suficientes para conduzirem o sistema à temperatura desejada. Outra maneira de verificar este fato, é através do gráfico (b) da Figura 5.3, que contempla o sinal de controle $u(t)$, no qual percebe-se a saturação da abertura da válvula da linha de água quente.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados obtidos, em uma primeira análise é possível subentender-se que o tempo de resposta do controlador é relativamente alto, porém, tomando-se como base o tempo de resposta obtido no último experimento, em torno de 25 segundos, conclui-se que este se deve tanto à inércia térmica do sistema, ou seja, ao tempo que a mistura demora para chegar ao equilíbrio térmico, bem como ao tempo de resposta do sensor de temperatura, que conforme mencionado anteriormente, é de aproximadamente 9 segundos. Além disso, deve-se levar em consideração a questão da zona morta da válvula gaveta utilizada, especialmente nos casos em que esta parte da posição totalmente fechada, causando atrasos na resposta do sistema de controle.

Desta forma, conclui-se que os resultados obtidos pelo controlador foram satisfatórios, levando-se em conta que foi possível seguir referências de temperatura impostas com erro próximo de zero em regime permanente, mesmo que com um tempo de resposta relativamente alto. Nos primeiros experimentos, verificou-se um pequeno valor de sobrepasso, que acabou sendo contornado através do ajuste dos ganhos do controlador.

Um dos aspectos verificados durante a realização dos experimentos foi o efeito de *windup*, ou seja, a ocorrência de saturação do atuador, responsável pela abertura e fechamento da válvula. Assim, seria necessária a inclusão de um sistema anti-*windup* no sistema de controle, de forma a manter nula a entrada do integrador durante a saturação do atuador, de tal forma que, ao sair da saturação, não haja erro “indevidamente” acumulado pelo integrador.

Outro problema verificado na prática diz respeito à vazão de saída do sistema. Como a vazão da linha de água fria foi considerada constante, houve casos em que, de acordo com a temperatura desejada, a vazão de saída acabou ficando relativamente baixa para o caso de um banho “ideal”, que corresponde a cerca de 6 litros/min. Desta forma, uma sugestão de melhoria seria a inclusão de um segundo controlador PID em cascata para controlar a vazão de saída do misturador, através da abertura da válvula da linha de água fria. Para tanto, faz-se necessária a instalação de um sensor de vazão na saída do misturador, de forma a realimentar a malha de controle deste novo PID.

Uma última sugestão para trabalhos futuros, seria a substituição do sensor de temperatura utilizado por um sensor com resposta linear e com menor constante de tempo térmica, como os termopares e os sensores PT100, por exemplo. Quanto ao tempo de resposta do sensor, deve-se levar em consideração o tamanho do encapsulamento deste, uma vez que, quanto menor é o encapsulamento do sensor, menor será o seu tempo de resposta (inércia térmica), resultando em um sistema de controle mais rápido e preciso.

7 REFERÊNCIAS

ADD THERM. Disponível em: <http://www.addtherm.com.br/medicao-termica/sensores-de-temperatura-ntc/>. Acesso em: 03/11/2014.

AGUIRRE, L. *Introdução à Identificação de Sistemas*. 2. Ed. Belo Horizonte: UFMG, 2004. ALLEGRO MICROSYSTEMS. Disponível em: <http://www.allegromicro.com/en/Products.aspx>. Acesso em: 15/10/2014.

ARDUINO. Disponível em: <http://arduino.cc/en/Main/Products>. Acesso em: 15/10/2014.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. Vol. 1, 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

BAZANELLA, A. S.; SILVA JR, J. M. G. *Sistemas de Controle - Princípios e Métodos de Projeto*. 1ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

CABRAL, Paulo. *Erros e Incertezas nas Medições*. Caderno Técnico IEP e ISEP, Porto, 2004. Disponível em: <http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf>. Acesso em: 02/12/2014.

CAMPOS, Mario Cesar Mello Massa de; TEIXEIRA, Herbert C. G. *Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais*. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

DECA. Disponível em: <http://www.deca.com.br/produtos/basicos/registros/de-gaveta/?catpai=3144>. Acesso em: 22/10/2014.

GUTTERRES, L. M. *Controlador de Aquecedor de Passagem a Gás com Chama Modulante*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

HENZ, M. E. *Controle de Temperatura com Compensação de Tempo Morto em Aquecedores de Água Baseados em Chama Modulante*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Controle e Automação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. *Fundamentos de Troca de Calor e Massa*. 5ª ed. Rio de Janeiro. Editora Livros Técnicos e Científicos S.A., 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA; OLIVEIRA, J. C. V. de. *Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados*. Rio de Janeiro: Inmetro, 2009.

MAYA, Paulo Álvaro; LEONARDI, Fabrizio. *Controle Essencial*. São Paulo: Editora Pearson Prentice Hall, 2011.

OGATA, Katsuhiko. *Engenharia de Controle Moderno*. 5ª ed. São Paulo: Prentice Hall, 2010.

PERONDI, Eduardo A. et al. **Análise de Desempenho de um Novo Sistema de Controle de Temperatura de Aquecedores de Passagem Baseado em Chama Modulante**. In: V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Bahia, ago. 2008a. Salvador.

PERONDI, Eduardo A. et al. **Desenvolvimento de um Novo Sistema de Controle de Temperatura de Aquecedores de Passagem Baseado em Chama Modulante**. In: V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Bahia, ago. 2008b. Salvador.

PERONDI, E.A. **Introdução ao Controle de Sistemas Mecânicos**. 3ª ed. Caderno Técnico DEMEC-UFRGS, Porto Alegre, 2010.

PILATTI, Lauro A. D. **Controle da Temperatura e Vazão de um Chuveiro Usando Lógica Fuzzy**. Departamento de Automação e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/lauropilatti/control-digital-de-temperatura-e-vazo-de-um-chuveiro>.

POLOLU ROBOTICS E ELECTRONICS. Disponível em: <http://www.pololu.com/product/1182>. Acesso em: 05/12/2014

RIBEIRO, Marco Antônio. **Válvulas de Controle e Segurança**. 5ª ed. Salvador, 1999.

ROCHA, Ronílson; MARTINS FILHO, Luiz; PRADO, Ricardo; SOPRANI, Luciano. **Proposta de Planta Piloto: Controle de Vazão e Temperatura de Líquidos**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA 2004, Brasília, Brasil, 2004.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga. **Sensores Industriais - Fundamentos e Aplicações**. 4. ed. Ed. Érica, 2005.

UNESCO. Disponível em: <http://www.ecodebate.com.br/2014/03/25/relatorio-da-onu-adverte-que-a-crescente-demanda-de-energia-afetara-os-recursos-de-agua-potavel/>. Acesso em: 20/11/2014.

YARA, Henrique E. **Projeto de um Sistema de Controle de Temperatura para Chuveiros Aquecidos por Queima de Gás**. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2010/Artigos/Art_TCC_037_2010.pdf. Acesso em: 15/10/2014.

APÊNDICES

Apêndice A - Cálculo de Incertezas

- Incerteza de Medição

A incerteza de medição, segundo o VIM, é descrita como um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando. Esse parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio padrão (ou um dado múltiplo dele), ou a metade de um intervalo correspondente a um dado nível de confiança.

Uma medição é representada por um intervalo no qual se espera que o valor verdadeiro esteja contido, bem como um nível de confiança que expressa a credibilidade dessa medição em termos de probabilidade. Assim, o resultado de uma medição é dado por $\bar{x} \pm k\sigma$, onde \bar{x} corresponde a uma estimativa do valor esperado, e $k\sigma$ representa a estimativa do erro associado à medição. O valor k indica o nível de confiança, sendo 68,26% para a incerteza padrão ($k = 1$), 95,45% para dois desvios padrões ($k = 2$), e 99,73% para três desvios padrões ($k = 3$), para o caso de uma distribuição normal.

- Incerteza Padrão

Segundo o VIM, a incerteza padrão é aquela que provém do resultado de medição expresso com um desvio padrão. As incertezas padrão de medição são divididas em duas categorias: incertezas padrão do tipo A e incertezas padrão do tipo B.

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2010), as incertezas do tipo A são avaliadas através da análise estatística em uma série de observações, enquanto as incertezas do tipo B são avaliadas por quaisquer outros métodos que não sejam a análise estatística de séries de observações, conforme segue.

- Avaliação da Incerteza Tipo A (σ_A)

É um método probabilístico de determinação de incertezas, que tem como hipótese fundamental que uma série de medidas diretas de uma grandeza física experimental aproxima-se da Distribuição Normal ou Gaussiana, à medida que se aumenta o número de observações. Sendo n o número de observações obtidas, o resultado é dado pelo valor médio das medições.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (\text{A.1})$$

Utiliza-se o conceito de desvio padrão (s) para avaliar o quanto o valor médio difere do valor verdadeiro ou real da grandeza. Para um número de observações finito, o desvio padrão é chamado de desvio padrão amostral, e é dado pela Equação (2.16).

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (\text{A.2})$$

- Avaliação da Incerteza Tipo B (σ_B)

Essa classificação é dada para resultados de medição obtidos a partir de informações sem caracterização estatística necessária, tais como medições prévias, experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de matérias e instrumentos relevantes, especificações do fabricante, relatórios de calibração, manuais e outras especificações. Por simplicidade, a incerteza tipo B é avaliada como incerteza instrumental, ou seja:

$$\sigma_B = \sigma_{\text{Instrumento}} \quad (\text{A.3})$$

- Incerteza Combinada (σ_C)

A incerteza padrão combinada do resultado de medição, quando o resultado é obtido por valores de um número de outras quantidades, é igual à raiz quadrada positiva da soma das incertezas do tipo A e B, ou seja:

$$\sigma_C = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \quad (\text{A.4})$$

Apêndice B – Cálculo da Incerteza da Temperatura de Saída do Sistema

Realizou-se o cálculo da incerteza da temperatura de saída do sistema com base na equação da incerteza combinada, descrita no Apêndice A, e na Equação 4.4, que relaciona a temperatura de saída do sistema com a vazão de água quente. Tendo em vista que não realizou-se a aquisição dos valores da vazão de água quente durante os experimentos, considerou-se a incerteza referente à máxima vazão da válvula, ou seja, 0,03 litros/min. Desta forma, tem-se que:

$$\sigma_{T_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_s}{\partial Q_f} \sigma_{Q_f}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_s}{\partial Q_q} \sigma_{Q_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_f} \sigma_{T_f}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_q} \sigma_{T_q}\right)^2} \quad (\text{B.1})$$

Resultando em:

$$\sigma_{T_s} \cong 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Onde:

$$\frac{\partial T_s}{\partial Q_f} = \frac{T_f(Q_f+Q_q) - (Q_f T_f + Q_q T_q)}{(Q_f+Q_q)^2} \quad (\text{B.2})$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial Q_q} = \frac{T_q(Q_f+Q_q) - (Q_f T_f + Q_q T_q)}{(Q_f+Q_q)^2} \quad (\text{B.3})$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial T_f} = \frac{Q_f}{(Q_f+Q_q)} \quad (\text{B.4})$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial T_q} = \frac{Q_q}{(Q_f+Q_q)} \quad (\text{B.5})$$

Apêndice C – Balanços de Massa e Energia

De acordo com Incropera e Dewitt (2003), o balanço de massa é uma aplicação do princípio da conservação da massa para a análise de sistemas físicos, e consiste na análise do deslocamento de massa de uma região para outra. A exata lei de conservação usada na análise do sistema depende do contexto do problema, mas tudo é resolvido pela conservação da massa, já que a matéria não pode desaparecer ou ser criada espontaneamente.

- Balanço Total de Massa

São os balanços envolvendo a massa total do conjunto de todos os componentes que entram e saem do sistema. Em um balanço total de massa em sistemas contínuos, desaparecem os termos sobre a geração e consumo da equação geral, uma vez que a matéria não pode ser criada nem destruída. Isto porque, a produção de uma ou mais substâncias é o resultado do consumo de uma ou mais substâncias. Desta forma, duas alternativas podem ocorrer:

- Estado Transiente:* Como há acúmulo de matéria, a quantidade de massa que sai deve ser igual à quantidade total de massa que entra menos a quantidade de massa acumulada.

$$\frac{dm_{\text{acum}}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (\text{C.1})$$

- Estado Estacionário:* Como não há acúmulo de matéria, a quantidade total de massa que entra no sistema deve necessariamente ser igual à quantidade que sai deste. Desta forma, tem-se:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s \quad (\text{C.2})$$

Ainda segundo Incropera e Dewitt (2003), o balanço de energia é uma exposição sistemática dos fluxos e transformações de energia em um sistema. A base teórica para um balanço energético é a primeira lei da termodinâmica, segundo a qual a energia não pode ser criada ou destruída, apenas modificada em forma. As fontes de energia ou ondas de energia são, portanto, as entradas e saídas do sistema em observação.

- Balanço de Energia para Sistemas Abertos

Sistemas abertos são aqueles em que ocorre passagem de matéria através da fronteira enquanto o processo ocorre. O balanço de energia para sistemas abertos em regime estacionário diz que a energia que entra no sistema deve ser igual à energia que sai do sistema. Isto porque a energia acumulada no sistema é igual a zero, já que o estado é estacionário, não havendo geração nem consumo de energia no sistema, uma vez que a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada. Assim, tem-se:

$$E_e = E_s \quad (\text{C.3})$$

$$dE_{\text{acum}}/dt = 0 \quad (\text{C.4})$$

- Calor Sensível

Quando há variação de temperatura sem que haja variação do estado físico da matéria, diz-se que o calor é sensível. Sendo Q a quantidade de calor, m a massa do corpo, c o calor específico e ΔT a variação da temperatura, tem-se:

$$Q = mc\Delta T \quad (\text{C.5})$$

Apêndice D - Sistema Operacional de Controle

Como motivação extra a este trabalho, para se obter um sistema genérico de controle e de fácil implementação, criou-se um sistema operacional que executa uma rotina definida pelo usuário, assim como é feito em uma na linguagem *function block* (FB) em controladores lógicos programáveis (CLP's).

O sistema operacional implementa apenas algumas funções para a criação de controladores do tipo PID. Para seu desenvolvimento, utilizou-se as vantagens oferecidas pela linguagem C++, que se trata de uma linguagem orientada a objetos.

Assim, atribuiu-se um objeto para cada “bloco”. Cada bloco pode ser instanciado com variáveis e métodos próprios, sendo cada tipo de bloco pertencente a uma classe diferente. A seguir são descritos os métodos e instâncias de cada uma destas classes atribuídas, e em seguida, como o usuário deve proceder para a criação de um fluxo lógico de controle.

Classe PID: Implementa um controlador PID, sendo que para cada PID configurado, deve-se atribuir as seguintes propriedades: valores mínimo e máximo da saída, ganhos proporcional, integral e derivativo, endereço de entrada (correspondente ao erro) e endereço do bloco PID. O método, por sua vez, corresponde a execução deste bloco, que implementa o cálculo da equação de diferenças de um controlador PID.

Classe OPE: A classe operador define um bloco de operação, realizando como método de execução a operação entre as variáveis de entrada. Este bloco suporta somente uma operação por vez, e suas propriedades são: número de variáveis de entrada, endereço de cada variável de entrada, operação a ser realizada (+, -, *, /) e endereço do bloco.

Classe STP: Classe que implementa a configuração dos motores de passo, sendo que suas propriedades são definidas por: períodos mínimo e máximo de troca de passo, aceleração do motor, endereço do bloco, posição atual do motor, posição desejada (SP) e endereço de entrada para atribuição da posição desejada. O método de execução desta classe/bloco opera de forma a atribuir o valor correspondente ao endereço da variável de entrada do objeto ao parâmetro de posição desejada, sendo que a troca de passo não é realizada por nenhum método interno ao bloco, mas sim por uma função externa, que é executada constantemente por um período de interrupção configurado pelo usuário.

Classe COM: Classe responsável por atribuir um valor à saída serial, sendo útil para parâmetros ou variáveis do fluxo de execução. Os únicos parâmetros presentes nessa classe são o endereço do bloco e o endereço de entrada do bloco. O método de execução trata-se unicamente de colocar o valor de entrada do bloco na porta serial.

O sistema operacional executa cada bloco na mesma sequência em que foi configurado, porém, antes de descrever o fluxo de execução do sistema, é necessário apresentar como deve-se realizar a configuração de cada bloco por parte do usuário. Primeiramente, é necessário saber que o fluxograma lógico criado pelo usuário deve ser inserido através de um terminal de comunicação serial RS232. Desta maneira, tendo-se definido um fluxograma de controle, deve-se descrevê-lo de maneira textual da seguinte maneira:

Bloco PID: Para que o usuário adicione um bloco PID ao sistema, deve-se digitar no terminal RS232 a seguinte linha de comando:

***<A0i0\$0a1b1c1m50n2**

Bloco OPE: Para que o usuário adicione um bloco OPE ao sistema, deve-se digitar no terminal RS232 a seguinte linha de comando:

***<O0i13T0i0\$00->**

Bloco STP: Para que o usuário adicione um bloco STP ao sistema, deve-se digitar no terminal RS232 a seguinte linha de comando:

***<C0i0\$0n1m100s1000a1p500>**

Bloco COM: Para que o usuário adicione um bloco COM ao sistema, deve-se digitar no terminal RS232 a seguinte linha de comando:

***<D0i13T0>**

Uma vez definida a sintaxe utilizada para a configuração de cada bloco (PID, OPE, STP e COM), faz-se necessário o entendimento de como interligá-los, de modo a criar-se um fluxograma de controle. Desta forma, deve-se entender o funcionamento da sintaxe de endereçamentos.

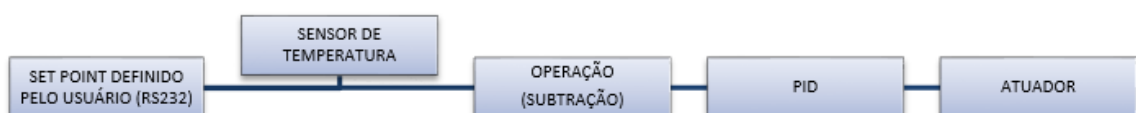
Para definir um endereço de entrada de um bloco, primeiramente deve-se inserir o caractere “i” (*input*). Na sequência, deve-se inserir três campos: o primeiro campo define qual o endereço do bloco onde deseja-se buscar o valor de entrada. O segundo campo define qual o tipo do bloco que está sendo inserido na entrada. O terceiro e último campo, por sua vez, define qual a saída do bloco está sendo colocada na entrada do bloco que está sendo configurado. A seguir, é apresentado um exemplo de configuração de um endereço de entrada.

i1A0

O trecho acima define que o bloco receberá a saída “0” do “PID 1”. Cabe ressaltar que foram criados três tipos de entradas especiais, definidas pelos caracteres “@”, “\$” e “T”. O caractere “@” refere-se à entrada de *hardware*, que corresponde aos pinos analógicos ou digitais do Arduino. O caractere “\$” refere-se à entrada pela porta serial RS232 (valor inserido pelo usuário). O caractere “T”, por sua vez, refere-se à entrada de temperatura, sendo necessário indicar-se o pino que está sendo usado para o sensor de temperatura.

Para que o Arduino interprete a sequência correspondente ao fluxograma de controle, deve-se inserir inicialmente os caracteres “*” e “<”. Em seguida, deve-se inserir os blocos “PID”, “OPE”, “STP” e “COM”, conforme descrito anteriormente. Por fim, para que seja iniciado o fluxo de tarefas pelo sistema, deve-se inserir o caractere “>”.

A seguir é demonstrado o fluxograma criado para a aplicação específica deste trabalho, bem como a conversão na forma textual para execução no sistema criado no Arduino.



Fluxograma lógico de controle

Convertendo-se o fluxograma de controle acima para a forma textual a ser interpretada pelo Arduino, tem-se o seguinte resultado:

***<OOi0\$0i13TO0-d2AOi0O0a130b40c1m9000n2d2COi0A0n1m100d1s1000a1p0DOi0A0d1>**

Um resumo da função de cada conjunto de caracteres utilizado no fluxograma de controle implementado é apresentado a seguir:

*<	Caracteres correspondentes ao início do código
OOi0\$0i13TO0-2	Caracteres correspondentes ao bloco OPE
AOi0O0a130b40c1m9000n2d2	Caracteres correspondentes ao bloco PID
COi0A0n1m100d1s1000a1p0	Caracteres correspondentes ao bloco STP
DOi0A0d1	Caracteres correspondentes ao bloco COM
>	Caractere correspondente ao final do código