

Odelmo Junior

**Controle de Nível em uma Unidade de Três
Tanques com Interação usando Plataforma
Arduino**

UBERLÂNDIA

2019

Odelmo Junior

Controle de Nível em uma Unidade de Três Tanques com Interação usando Plataforma Arduino

Trabalho de Conclusão de Curso da Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Uberlândia - UFU - Campus Santa Mônica, como requisito para a obtenção do título de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique

UBERLÂNDIA

2019

Oliveira, Odelmo

Controle de nível em uma unidade de três tanques com interação usando plataforma arduino/ Odelmo Oliveira do N. Junior. - **UBERLÂNDIA, 2019**- 75 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Faculdade de Engenharia de Controle e Automação . **2019**.
Inclui bibliografia.

1. Identificação de sistemas. 2. Controle de nível. 2. Instrumentação.
I. Humberto Molinar Henrique. II. Universidade Federal de Uberlândia. III. Faculdade de Engenharia Elétrica. IV. Engenharia de Controle e Automação.

*“Por vezes sentimos que aquilo
que fazemos não é senão uma gota no oceano.
Mas sem ela o oceano seria menor.”,
(Madre Teresa de Calcutá)*

Resumo

Plantas industriais didáticas abrangem uma grande possibilidade de estudos no meio acadêmico. Uma planta didática é a representação de um processo industrial em uma escala reduzida, fato que possibilita a proximidade dos discentes com periféricos e equipamentos utilizados na indústria gerando uma oportunidade do uso dos mesmos sem o comprometimento da operação e um processo industrial. Deste modo, esse trabalho realiza o estudo sobre a identificação de sistemas, instrumentação de periféricos e por fim um breve estudo de controladores em um sistema *MIMO* de três tanques acoplados. O projeto descrito nesse trabalho retrata desde a construção da planta até a identificação e uma proposta de controle de nível no processo construído.

Palavras-chave: Identificação de sistemas, controle de nível, instrumentação, periféricos, sistema *MIMO*, planta industrial didática.

Abstract

Teaching industrial plants cover a great possibility of studies in the academia. A teaching plant is the representation of an industrial process in a reduced scale, fact that allows the proximity of the students with peripherals and equipment used in the industry, generating an opportunity to use them without compromising operation of industrial process. Thus, this work carries out the study about systems identification, peripheral instrumentation and finally a brief study of controllers in a three tank coupled MIMO system. The project described in this work portrays since the plant assembling up to identification and proposal of level control in the process built.

Keywords: Systems identification, level control, instrumentation, peripherals, MIMO system, teaching industrial plant.

Lista de ilustrações

Figura 1 - Sistema genérico em Malha aberta	14
Figura 2 - Diagrama de blocos de um sistema genérico em malha fechada.	15
Figura 3 – Resposta ao degrau de um sistema de segunda ordem	16
Figura 4 – Representação de um sistema em malha fechada com controlador	18
Figura 5 - Representação genérica do regulador quadrático linear.	21
Figura 6 – Suporte para Arduino no Ambiente Simulink.	23
Figura 7 – Placa Arduino Mega 2560.	26
Figura 8 - Ponte H L289N.	28
Figura 9 – Conversor de 4 a 20 mA para 0 a 5 Volts.	28
Figura 10 – Sensor de vazão utilizado.	29
Figura 11 – Transmissor de pressão.	30
Figura 12 – Curva de calibração do Transmissor de Pressão do Tanque 1.	33
Figura 13 – Curva de calibração do Transmissor de Pressão do Tanque 2.	34
Figura 14 – Curva de calibração do Transmissor de Pressão do Tanque 3.	34
Figura 15 – Modelo de Bomba utilizado.	35
Figura 16 – Diagrama esquemático da planta didática de controle de nível.	36
Figura 17 - Construção do modelo matemático no ambiente Simulink.	40
Figura 18 – Comportamento temporal dos níveis de líquido no sistema de tanques.	40
Figura 19 – Sinal de entrada PWM para a bomba de carga (Perturbação).	43
Figura 20 – Sinal de entrada PWM para a bomba Q1 do Tanque 1.	43
Figura 21 – Sinal de entrada PWM para a bomba Q2 do Tanque 2.	44
Figura 22 – Sinal de entrada PWM para a bomba Q3 do Tanque 3.	44
Figura 23 – Modelagem da planta no ambiente Simulink.	45
Figura 24 - Entrada experimental para ajuste do parâmetro alfa.	46
Figura 25 - Dados para diferentes valores do parâmetro alfa.	47
Figura 26 – Nível do tanque 1 coletado experimentalmente.	48
Figura 27 – Nível do tanque 2 coletado experimentalmente.	48
Figura 28 – Nível do tanque 3 coletado experimentalmente.	49
Figura 29 – Resposta do nível do tanque 1 do modelo obtido.	50
Figura 30 – Resposta do nível do tanque 2 do modelo obtido.	51
Figura 31 – Resposta do nível do tanque 3 do modelo obtido.	51
Figura 32 - Sistema com controlador implementado em malha fechada.	52
Figura 33 - Determinação das matrizes de espaço de estado.	55
Figura 34 - Planta didática construída.	60
Figura 35 - Erro de modelagem para o tanque 1.	61
Figura 36 - Erro de modelagem para o tanque 2.	61
Figura 37 – Erro de modelagem para o tanque 3.	62
Figura 38 - Resposta em malha fechada do sistema para o tanque 1.	63
Figura 39 - Resposta em malha fechada do sistema para o tanque 2.	63
Figura 40 - Resposta em malha fechada do sistema para o tanque 3.	64

Lista de tabelas

Tabela 1 - Especificações técnicas da placa Arduino Mega 2560.	27
Tabela 2 – Dados coletados durante o procedimento de calibração.	31
Tabela 3 – Valores encontrados a partir do ajuste otimizado.	50
Tabela 4 - Tabela com os gastos consolidados para a construção do projeto	57
Tabela 5 - Tabela com os gastos detalhados para a construção do projeto.	58

Lista de Abreviaturas e Siglas

AI	Entrada analógica (<i>Analog Input</i>)
AO	Saída analógica (<i>Analog Output</i>)
Cm	Centímetros
DI	Entrada digital (<i>Digital Input</i>)
DO	Saída digital (<i>Digital Output</i>)
GPU	Unidade de processamento gráfico (<i>Graphics Processing Unit</i>)
mA	Miliampere
Mm	Milímetros
PWM	Modulação por largura de pulso (<i>Pulse-Width Modulation</i>)
s	Segundos
V	Volts

Sumário

1 Introdução	11
1.1 Justificativa	11
1.2 Propostas e objetivos:	12
2 Fundamentos Teóricos	14
2.1 Sistema de controle em malha aberta e em malha fechada	14
2.2 Identificação do modelo matemático de sistemas	16
2.3 Parâmetros analíticos	16
2.3.1 Tempo de subida (T_r)	17
2.3.2 Tempo de pico (T_p)	17
2.3.3 Tempo de acomodação (T_s) a p%	17
2.3.4 Período de oscilação	17
2.4 Controladores	17
2.4.1 Controlador Proporcional	18
2.4.2 Controlador Integral	19
2.4.3 Controlador Derivativo	19
2.4.4 Regulador Quadrático Linear	21
2.5 Comunicação entre MATLAB e Arduino no ambiente Simulink	22
2.6 Modelo de regressão linear simples	24
3 Instrumentação e periféricos da planta	26
4 Modelagem do sistema	36
4.1 Modelagem teórica do sistema projetado	38
4.2 Modelagem experimental e determinação dos parâmetros.	41
4.2.1 Modelo matemático Linear do processo	41
5 Proposta de Controle	52
6 Componentes e custos para a construção da estrutura do projeto.	57
7 Resultados	59
7.1 Construção da planta	59
7.2 Modelo matemático	61
7.3 Resultados obtidos da proposta de controle	63
8 Conclusão	65
9 Trabalhos futuros	66
10 Referências	67
Anexo 01	68
Anexo 02	73
Anexo 03	75

1 Introdução

1.1 Justificativa

Atualmente, o grande crescimento e modernização de indústrias gera a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas automatizadas que sejam capazes de supervisionar e controlar de forma prática e eficiente grandes processos ou linhas de produção.

Um sistema de controle automatizado remete a ideia de controlar uma determinada variável que possui seus valores coletados através de um sensor ou de outro tipo de monitoramento, em um valor pré-definido que atenda os interesses do processo que se deseja controlar. Como exemplo pode-se citar sistemas de tanques que devem ter seus níveis controlados em uma posição pré-definida. Esse valor, chamado de *setpoint*, serve de referência e é comparado com o valor lido por um sensor de nível em tempo real na planta.

Grande parte dos processos automatizados possuem algum tipo de sistema supervisório com a finalidade de facilitar a leitura de todas as variáveis e indicadores da planta. Esse sistema nada mais é do que uma interface que mostra, coleta e até mesmo analisa os dados físicos das plantas podendo gerar inclusive relatórios de sugestões pré cadastradas para o melhor funcionamento do processo.

O projeto proposto nesse trabalho, descreve a construção de uma planta didática composta por três tanques de armazenamento de líquido do laboratório de controle automático do curso de Engenharia Química na Universidade Federal de Uberlândia. O projeto retrata desde o orçamento dos tanques, passando pela sua instrumentação e controle e finalizando com seu pleno funcionamento para uso dos alunos tanto do curso de Engenharia Química quanto para os alunos do curso de Engenharia de Controle e Automação. O objetivo dessa planta é servir como uma plataforma experimental para que os alunos possam colocar em prática os conceitos estudados em sala de aula nas disciplinas que envolvem assuntos de controle, sistemas embarcados e afins.

1.2 Propostas e objetivos:

Inicialmente, o projeto possui o intuito de construir uma planta de controle de nível que tenha um baixo custo, de forma que possa ser utilizada nas disciplinas que envolvem controle e automação. A planta foi construída de forma a ter estrutura de funcionamento flexível, isto é, possa ser operada em controle univariável (*SISO – single input single output*) ou multivariável (*MIMO – multiple input multiple output*) e, também, possa ser operada com ou sem interações dinâmicas entre os tanques. Desta forma os usuários podem configurar a operação e controle da planta de forma a explorar os conceitos mais adequados ao momento.

A proposta de planta didática desenvolvida conta com três tanques cilíndricos de raios diferentes ligados entre si, tendo sempre a possibilidade de travamento entre eles, ou seja, a malha de nível desenvolvida possibilita propostas de controle que envolvam os três, dois ou até mesmo um tanque. O objetivo específico do projeto é realizar a identificação do sistema construído e aplicar uma proposta de controladores nesse sistema com múltiplas entradas e múltiplas saídas. Portanto, pode-se definir resumidamente os principais objetivos desse projeto nos tópicos a seguir:

- Construir uma planta didática de controle de nível de baixo custo e alta acessibilidade aos estudantes.
- Desenvolver uma interface que tenha como princípios uma alta simplicidade de operação e uma alta diversidade de propostas de controle e combinações de funcionamento.
- Desenvolver uma proposta de controle para a planta de controle de nível criada e monitorar o sistema controlado em tempo real através da ferramenta *Simulink* do *Software MatLab* para adquirir os dados e criar conclusões para o projeto.

- Garantir que todos os componentes como sensores, relés, placas condicionadoras, tubulações, registros manuais e automáticos, bombas centrífugas, conversores, entre outros, estejam em pleno funcionamento com uma confiabilidade elevada para não ter a possibilidade de erros consequentes de falhas de componentes.
- Gerar um monitoramento completo de todos os dados gerados, documentando os mesmos e gerando um banco de dados de possíveis controles a serem aplicados.

2 Fundamentos Teóricos

Este capítulo apresenta um breve resumo de toda a teoria que possibilitou que o projeto fosse executado de modo que, ao fim do mesmo, a planta projetada estivesse em seu pleno funcionamento. A base para a fundamentação teórica está presente nas referências bibliográficas [1], [4], [5], [7], [8] e [10].

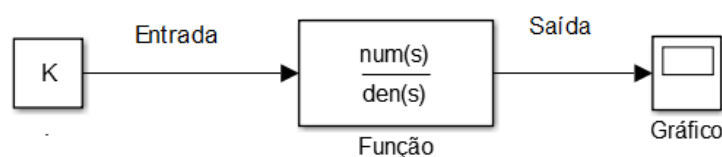
2.1 Sistema de controle em malha aberta e em malha fechada

Entender o conceito de um sistema em malha aberta e em malha fechada e a diferença entre ambos é fundamental para a compreensão do projeto desenvolvido, pois durante o desenvolvimento do projeto foram realizados testes e propostas que necessitam desse fundamento teórico para seu entendimento.

Os testes realizados em malha aberta durante o desenvolvimento desse projeto, serão de fundamental importância para a conclusão do controle final em malha fechada, pois é o primeiro passo a ser dado para a realização de experimentos que possibilitam o estudo das variáveis e do comportamento da malha em função do tempo antes de aplicar quaisquer propostas de controle. Uma das vantagens que podem ser citadas sobre o controle em malha aberta é a simplicidade da construção do mesmo em uma planta e sua fácil manutenção ao decorrer do tempo.

Um exemplo da configuração de sistema em malha aberta pode ser observado na figura 1, onde basicamente pode-se dizer que a ação de controle é independente da saída, pois existe uma ausência da realimentação negativa no sistema responsável por coletar os sinais de saída em tempo real com a finalidade de gerar um comparativo para a atuação do controlador.

Figura 1 - Sistema genérico em Malha aberta

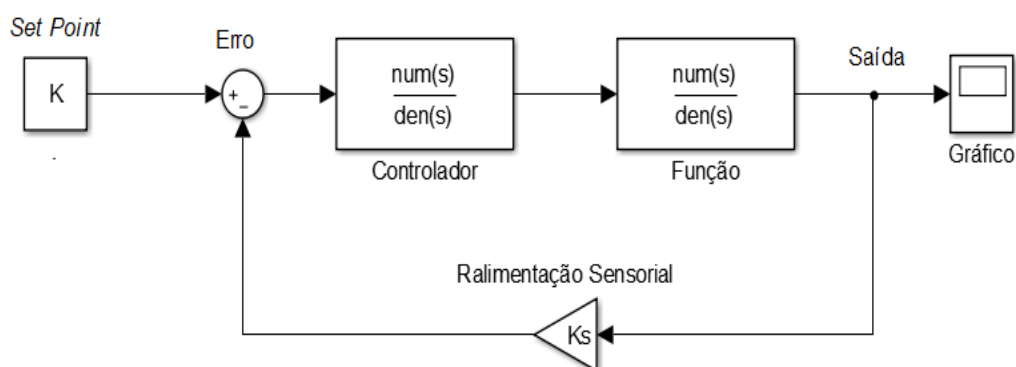


O objetivo específico final do projeto é realizar o controle do sistema proposto, uma vez que um controle automático em malha fechada atenderia de uma forma mais eficiente a finalidade de controle, já que em sistemas reais existem perturbações, distúrbios e alterações que não são previsíveis. Para isso, é necessário o uso de uma realimentação que utilize valores coletados no sistema através de sensores na planta, que ao serem comparados com o *Set point* do sistema, geram um erro que será usado como referência para o tratamento dos dados no controlador.

Via de regra, um sistema dinâmico em malha fechada possui uma realimentação, que é a característica que mais impacta nesse tipo de sistema. O sistema da figura 1, pode ser adaptado com um sistema de sensores que captam dados em tempo real da variável controlada no processo e através dessa coleta um erro é gerado e utilizado para a realização do controle do sistema em malha fechada como é mostrado na figura 2.

Para um sistema em malha fechada, a utilização de sensores ou componentes capazes de coletar dados são de fundamental importância não somente na realimentação, mas também por terem uma grande importância no monitoramento e acompanhamento dos dados gerados pelo processo.

Figura 2 - Diagrama de blocos de um sistema genérico em malha fechada.



2.2 Identificação do modelo matemático de sistemas

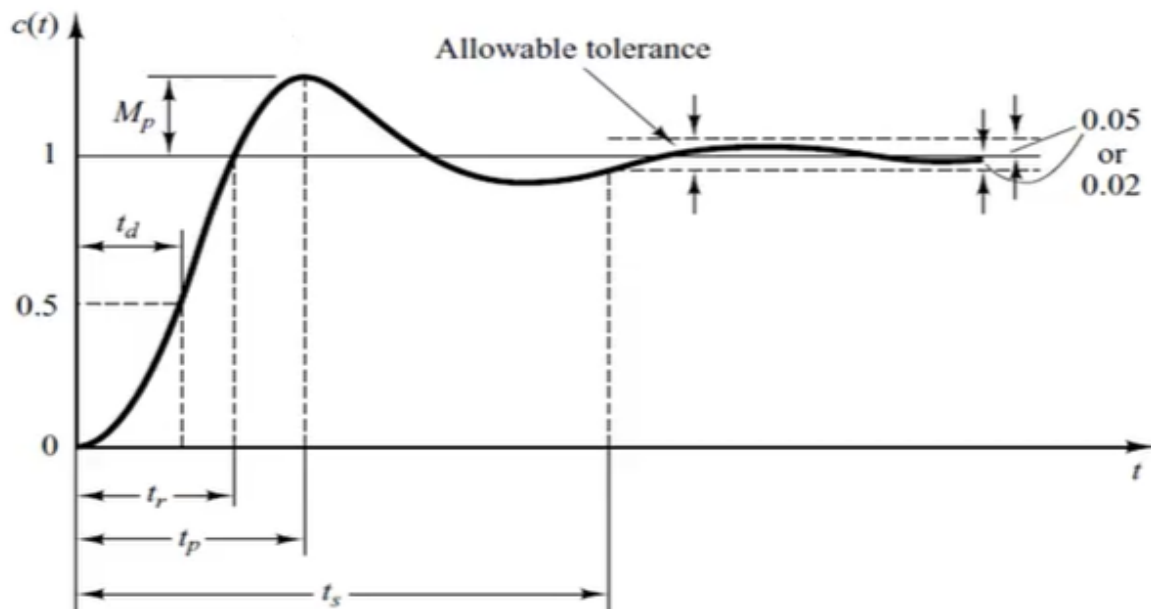
A identificação do modelo matemático do sistema que se deseja criar é de fundamental importância para o projeto, pois o modelo matemático facilita as primeiras análises do projeto como o seu comportamento em função do tempo.

Além de agir como facilitador do estudo de todas as variáveis do sistema definindo o que será controlado e o que será manipulado, a identificação do modelo matemático permite a observação de todas as variáveis do processo que possuem dependência entre si e como será o comportamento das mesmas em função do tempo, para assim definir uma melhor proposta de controle em malha fechada satisfazendo o objetivo proposto no projeto.

2.3 Parâmetros analíticos

A resposta ao degrau de um sistema de segunda ordem genérico possui alguns parâmetros fundamentais que serão abordados nesse tópico, os chamados parâmetros analíticos de um processo dinâmico, indicados na figura 3, são de fundamental importância para a análise crítica de estabilidade e comportamento de qualquer sistema controlado.

Figura 3 – Resposta ao degrau de um sistema de segunda ordem



2.3.1 Tempo de subida (T_r)

O tempo de subida de um sistema, conhecido como *Rise Time*, indicado na figura 3 pela sigla t_r , é simplesmente o tempo que a resposta do sistema a um degrau consegue alcançar pela primeira vez o seu valor de regime permanente, ou seja, no valor em que se deseja controlar o processo.

2.3.2 Tempo de pico (T_p)

O tempo de pico de um sistema, conhecido como *Time to First Peak*, indicado na figura 3 pela sigla t_p , indica o tempo que o processo levou para chegar no seu primeiro valor máximo, no caso do sistema demonstrado como exemplo será o tempo que a onda alcança sua primeira crista.

2.3.3 Tempo de acomodação (T_s) a $p\%$

O tempo de acomodação da saída oscilatória de um sistema, mais chamado de *Settling Time* descrito na figura 4 através da sigla t_s , indica o tempo necessário para a saída se estabilizar a uma faixa de $\pm p\%$ do valor de regime permanente definido na proposta de controle de um sistema.

2.3.4 Período de oscilação

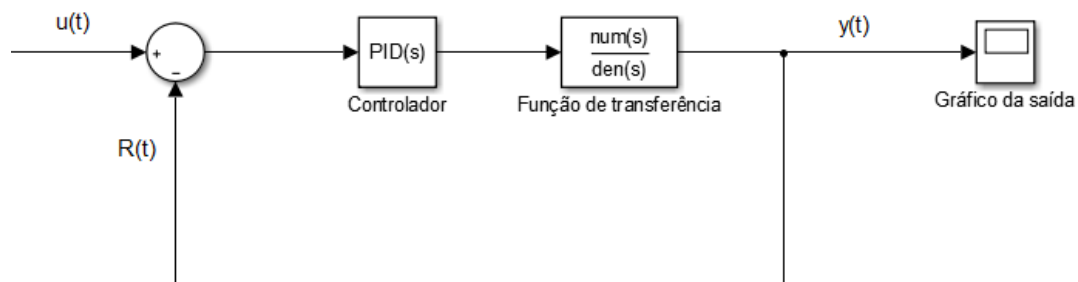
O período de oscilação, é o tempo medido na resposta oscilatória de um sistema a um degrau entre duas cristas ou dois vales da onda de saída do sistema.

2.4 Controladores

Atualmente, o desenvolvimento e uso de controladores automatizados vem crescendo exponencialmente em processos industriais. Esse crescimento pode ser explicado pela evolução da confiabilidade de novas teorias e propostas de controladores que são instalados em meios industriais diariamente.

Para o projeto descrito nesse trabalho será utilizada como base a teoria de controladores PID (ação proporcional, integral e derivativa) que serão abordados com mais detalhes neste capítulo e que serão de fundamental importância para o desenvolvimento geral do projeto proposto. Na figura 4 pode-se observar todas as variáveis e conceitos que serão abordados nos tópicos explicativos a seguir nesse capítulo.

Figura 4 – Representação de um sistema em malha fechada com controlador



2.4.1 Controlador Proporcional

A função do controlador proporcional em um sistema é reduzir o máximo possível o erro $e(t)$, que pode ser equacionado por definição da seguinte forma:

$$e(t) = u(t) - R(t) \quad (1)$$

onde:

$R(t)$ = valor medido em tempo real por algum sensor da variável controlada.

$u(t)$ = Valor definido como set point.

Na maioria dos processos o *set point* é um parâmetro constante por um longo período de tempo, porém em determinadas situações circunstanciais ele pode ser alterado para alguma finalidade de obtenção de valores decorrentes de mudanças de receitas ou fórmulas que afetam o passo a passo do processo. A fórmula geral que governa o comportamento do controlador proporcional pode ser descrita da seguinte forma:

$$P(t) = p' + (K_c)e(t) \quad (2)$$

onde:

$P(t)$ = é a saída do sinal do controlador proporcional

p' = valor nominal do estado estacionário do sistema, o sistema atingirá esse valor quando o erro for igual a zero

K_c = ganho do controlador, pode ser determinado através de simples cálculos e pode ser alterado ao decorrer do processo, tem a finalidade de transformar o erro em uma equivalência que, quando somado ao valor desejado de estado estacionário, obtém uma saída que regule os parâmetros do sistema para atingir um erro cada vez mais próximo de zero.

2.4.2 Controlador Integral

O controlador integral é geralmente usado por proporcionar uma vantagem que é a eliminação do *offset*. Para entender essa característica do controlador integral, deve-se analisar a seguinte fórmula que governa um controlador integral:

$$P(t) = p' + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

onde:

τ_i = referência ao tempo integral do sistema, parâmetro ajustável.

A ação integral irá gerar um sinal de saída proporcional à magnitude e duração do erro acumulado, quando o controlador integral é juntamente colocado a um controlador proporcional em um processo, gerando o controlador PI (proporcional integral), ocorre uma correção do *offset* decorrente da aceleração da resposta do sistema. A equação que governa o comportamento do controlador PI pode ser escrita da seguinte forma:

$$P(t) = p' + K_c \left[\frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (4)$$

Uma desvantagem da utilização da ação integral é o fato de o mesmo trazer uma tendência oscilatória para o sistema reduzindo a estabilidade do processo, pois a ação integral sofre interferências muito grandes relacionadas a duração e magnitude do erro durante o processo.

2.4.3 Controlador Derivativo

A ação derivativa desenvolve um sinal de saída que é proporcional à variação do erro, pois o controlador derivativo tem como base, como o próprio nome já sugere, a referência de uma derivada governando seu comportamento, ou seja, quando qualquer derivada é colocada em análise, sabe-se que o referencial de análise será uma taxa de variação que no caso dos

controladores de processo significa um sinal de saída que acompanha a taxa de variação do erro em tempo real, governado pela seguinte equação:

$$P(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Onde:

K_d = Ganho derivativo

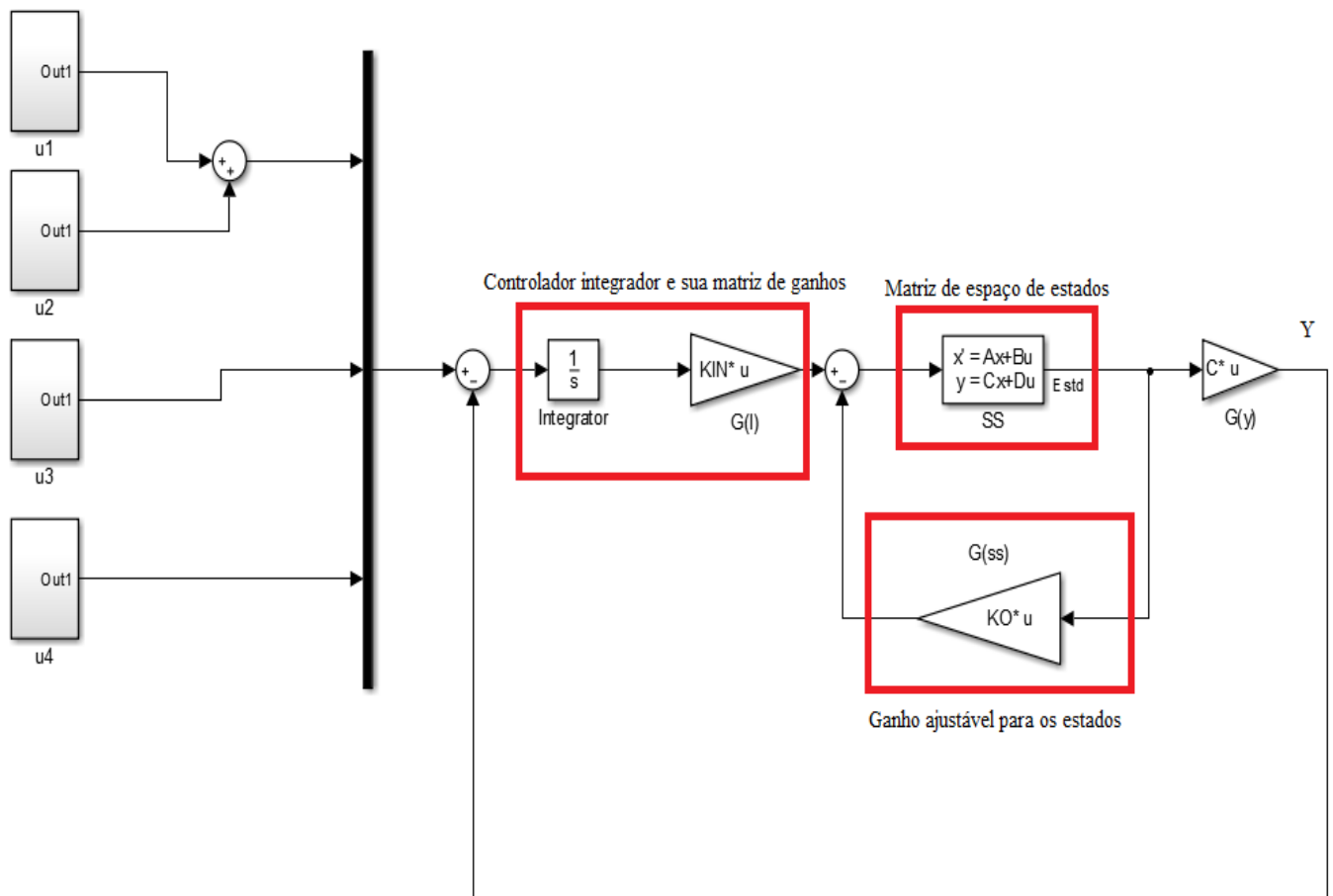
$e(t)$ = erro do sistema

O controlador derivativo, geralmente, é usado com a finalidade de realizar uma correção antecipada do erro, conseqüentemente, acelerando o tempo de resposta do processo e aumentando a estabilidade do sistema, porém esse tipo de controlador não é viável em processos que possuem taxas de oscilações elevadas, perturbações frequentes e em sistemas que possuem muitos ruídos, pois nesses casos o controlador citado pode levar o sistema à uma instabilidade.

2.4.4 Regulador Quadrático Linear

O Regulador quadrático linear, representado genericamente na figura 5, é um método de controle ótimo que calcula os ganhos de controle sistematicamente através da realimentação dos estados da planta estudada. Esse método pode ser implementado juntamente com os controladores derivativos, integradores e proporcionais utilizando a realimentação do sistema em matriz de espaço de estados, ou seja, o regulador ótimo em questão necessita de ajustes de ganhos de cada estado e de cada controlador em questão para as características do sistema que se deseja controlar.

Figura 5 - Representação genérica do regulador quadrático linear.



2.5 Comunicação entre MATLAB e Arduino no ambiente Simulink

O software MATLAB foi utilizado no desenvolvimento do projeto por:

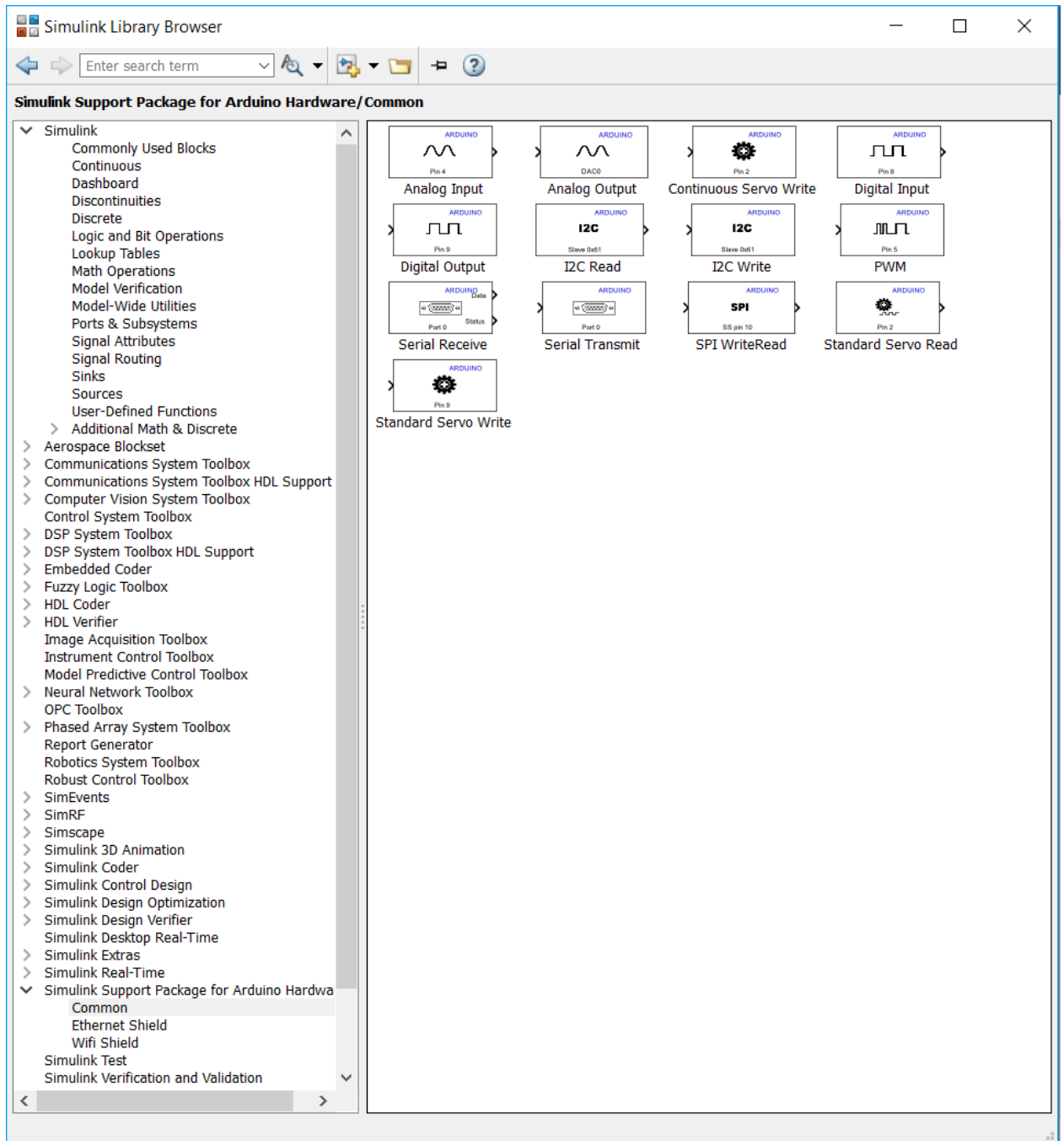
- Combinar um ambiente de área de trabalho ajustado para análise iterativa e processos de design com sua própria linguagem de programação.
- Executar análises em clusters, GPUs e nuvens com apenas pequenas alterações no código. Não há necessidade de reescrever seu código ou aprender técnicas de programação de big data e memória insuficiente.
- Ter uma interface de comunicação simples com possibilidades de alteração do código em tempo real, o que possibilita mais velocidade e praticidade na realização de testes.

A *MathWorks* desenvolveu e disponibilizou pacotes capazes de interagir com a maior parte das placas Arduino, possibilitando estabelecer uma comunicação serial, controlar AI/AO, DI/DO, PWMs entre outros, além de que o ambiente Simulink nos permite manusear de forma interativa o conteúdo completo contido neste pacote e usufruir de todos os demais blocos e funções contidos em sua vasta biblioteca.

Um fato que deve ser ressaltado é que o MATLAB possui um ambiente próprio de programação possibilitando a criação de códigos, bibliotecas e o incremento de novas funções para o uso de sensores e componentes que não estão presentes no pacote original para a biblioteca do *Simulink*. Toda lógica construída com diagrama de blocos no ambiente *Simulink* pode ser convertida em um algoritmo na linguagem C, o que possibilita a execução do código também na IDE própria do Arduino.

Na Figura 6, observa-se o pacote suporte disponibilizado para a comunicação entre o MATLAB e o Arduino, podendo ser utilizado como suporte em diversos modelos de placas Arduino.

Figura 6 – Suporte para Arduino no Ambiente Simulink.



2.6 Modelo de regressão linear simples

A regressão linear simples leva em consideração somente um preditor “x” e uma única variável dependente “y”. Para realizar o estudo desse modelo será adotado uma suposição de relação linear entre o nível de um tanque “h” e a tensão transmitida “V” modelando a seguinte equação:

$$h(V) = \beta_0 + \beta_1 V \quad (6)$$

Onde os parâmetros β_0 e β_1 são determinados pelo método dos mínimos quadrados, dados por:

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{h} - \widehat{\beta}_1 \bar{V} \quad (7)$$

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{Shv}{Svv} \quad (8)$$

Os valores $\widehat{\beta}_1$ e $\widehat{\beta}_0$ são determinadas estimativas dos parâmetros β_0 e β_1 através dos mínimos quadrados. Nas equações dos parâmetros aproximados, $\bar{h}$ e $\bar{V}$ são as médias aritméticas dos valores de nível e tensão coletados e os valores de Shv e Svv são determinados com o seguinte comportamento:

$$Svv = \sum_{i=1}^n (Vi - \bar{V})^2 \quad (9)$$

$$Shv = \sum_{i=1}^n hi(Vi - \bar{V}) \quad (10)$$

Para a validação do modelo é necessário testar as hipóteses da inclinação de β_1 ser diferente de zero portanto tem-se duas hipóteses em questão, a hipótese H0 onde a inclinação é igual a zero e a hipótese H1 onde a inclinação é um valor diferente de zero. Para validarmos uma dessas hipóteses serão realizados testes que quando levados a rejeição da hipótese nula, a hipótese alternativa é automaticamente validada consequentemente validando estatisticamente o modelo. Caso a hipótese nula seja verdadeira pode-se chegar à conclusão que não existe relação linear entre as variáveis estudadas.

O comportamento de “t0” dado pela equação (11) será utilizado para os testes das hipóteses mostradas.

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{\widehat{\sigma}^2 / S_{vv}}} \quad (11)$$

Onde “t0” segue uma distribuição conforme a tabela t-student com (n-2) graus de liberdade, e a hipótese de inclinação nula será rejeitada quando:

$$|t_0| > t_{\alpha/2, n-2} \quad (12)$$

Onde α é a probabilidade da aceitação da veracidade da hipótese nula, assumido entre 1% a 5% em aplicações práticas. Concomitantemente a validação do parâmetro β_1 , o parâmetro β_0 pode ser validado de forma semelhante sob as mesmas hipóteses de validação, porém os parâmetros devem ser calculados da seguinte forma:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{\widehat{\sigma}^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{V}^2}{S_{vv}} \right)}} \quad (13)$$

Sujeito ao mesmo comportamento de parametrização na validação de β_1 , onde o valor de $\widehat{\sigma}^2$ em todas as equações mencionadas nessa seção pode ser calculado da seguinte forma:

$$\widehat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2 - \widehat{\beta}_1 S_{hv}}{n - 2} \quad (14)$$

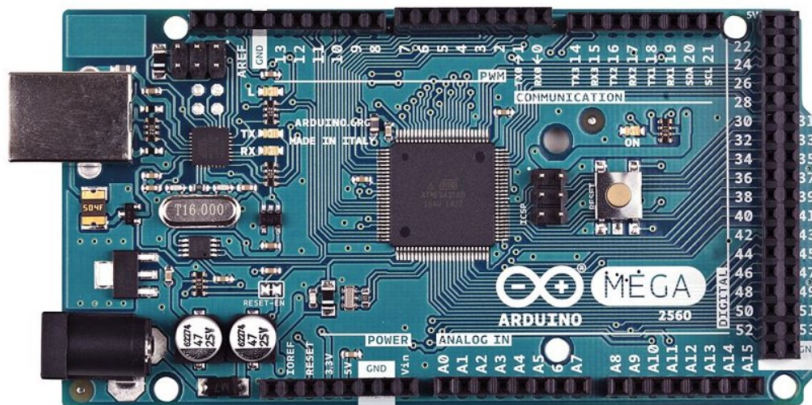
3 Instrumentação e periféricos da planta

O principal objetivo desse capítulo é fazer uma descrição profunda de cada equipamento utilizado na instrumentação da planta desenvolvida, justificando a escolha dos mesmos. O projeto é composto por um painel elétrico, quatro bombas, quatro sensores de vazão, quatro transmissores de pressão e seis válvulas manuais, sendo responsáveis por garantir o pleno funcionamento da planta de nível construída.

3.1 Painel elétrico

Serão descritos os componentes do painel elétrico construído, que é composto por uma placa Arduino Mega 2560, representada na figura 7, uma placa condicionadora que realiza o fornecimento energia para todos os componentes do painel elétrico garantindo que os mesmos exerçam suas funções sem nenhum risco, conversores de 4 a 20mA para 0 a 5 Volts e duas pontes H modelo L289N.

Figura 7 – Placa Arduino Mega 2560.



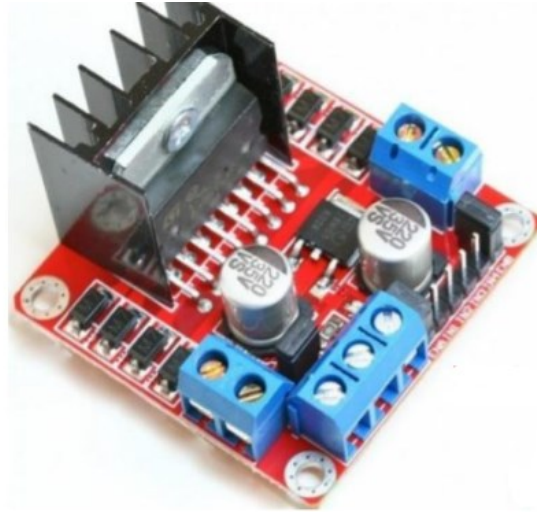
Para que houvesse possibilidade de interligação entre a planta física e o ambiente de controle a ser detalhado na próxima seção, necessitaríamos de uma ponte que gerasse uma comunicação em tempo real, não ter um elevado custo, ter total compatibilidade com a interface de controle. O Arduino Mega, trata-se de uma placa microcontroladora, de hardware livre, com portas de entrada e saída, além de uma interface serial. Foi escolhido utilizar essa placa por

oferecer portas com função PWM, ter uma memória adequada para o projeto, ter uma grande quantidade de portais analógicas para a ligação dos periféricos, e por ser possível fazer a comunicação serial com softwares em um computador independente do sistema a ser embarcado, tornando-o controlável. A tabela 1 especifica as características técnicas da placa utilizada, justificando todos os argumentos apresentados para o uso da mesma no desenvolver do projeto.

Tabela 1 - Especificações técnicas da placa Arduino Mega 2560.

Micro controlador	Atmega 2560
Tensão de funcionamento	5V
Tensão de entrada (recomendado)	7 a 12V
Tensão de entrada (máxima)	6 a 20V
Pinos de entrada e saída digital	54 (dos quais 14 podem ser saídas PWM)
Pinos de entrada analógicas	16
Valor máximo de corrente fornecida por pino	40mA
Valor de corrente para pino 3,3V	50mA
Memória flash	256KM
SRAM	8KB
EEPROM	4KM
Velocidade de clock	16MHz

Figura 8 - Ponte H L289N.



Este driver, representado na figura 8, foi escolhido pois atende os requisitos necessários para o acionamento das bombas, suportando uma tensão de operação na faixa de 6-35 volts, podendo controlar simultaneamente 2 motores de corrente contínua com uma corrente máxima de 2 amperes por canal. Esta placa condicionadora também possui compatibilidade com a plataforma Arduino, que controlará o sentido de giro das bombas e o valor da PWM que dará a vazão de água de um tanque a outro. Uma alimentação externa regulada em 12 Volts foi utilizada para energizar o driver, para que não houvesse perdas de potência no sistema.

Figura 9 – Conversor de 4 a 20 mA para 0 a 5 Volts.



O conversor mostrado na figura 9 possui a função de receber os dados de corrente gerados pelo transmissor de pressão, identificado na figura 11, e gerar um sinal correspondente em tensão que é captado e tratado na placa Arduino.

3.2 Periféricos e demais atuadores da planta.

Nesse tópico, serão descritos os demais equipamentos do projeto que não fazem parte do painel elétrico, bem como os atuadores diretos e periféricos da planta. Os equipamentos que mais precisam de confiabilidade e funcionalidade serão descritos a seguir, todos os sinais captados e inseridos para que possa ser desenvolvido qualquer estratégia de controle são provenientes dos periféricos citados a seguir.

Figura 10 – Sensor de vazão utilizado.



O sensor de vazão, representado na figura 10, instalado trabalha na tensão de 5 a 24 Volts DC, suporta até 15 mA de corrente, possui um range de vazão com capacidade de 0,5 a 5 litros por minuto e suporta ambientes de operação de até 80°C. O sensor de vazão implantado pode ser utilizado em projetos futuros com a finalidade de propor, além do controle de nível, um controle de vazão.

Figura 11 – Transmissor de pressão.



O transmissor de pressão mostrado na figura 11 é o instrumento que deve apresentar maior confiabilidade no sistema desenvolvido, pois é através do tratamento dos seus sinais de entrada e saída que será determinada toda a estratégia de controle do sistema, as especificações técnicas desse periférico afirmam que o mesmo possui suporte para tensões de alimentação de 12 a 36 Volts, é capaz de medir pressões de 0 a 0,1 bar, pode atuar em ambientes de operação com temperaturas de -20 a 100°C e retorna um valor de saída na faixa de 4 a 20 mA.

No projeto desenvolvido, o transmissor descrito possui a função de gerar um valor entre 4 a 20 mA que corresponde ao sinal de pressão lida pelo mesmo durante o funcionamento do projeto, após a leitura e tratamento desse valor, através de um conversor mostrado na Figura 9, pode-se então ter, com alta precisão, o valor do nível dos tanques.

Para que a precisão da coleta de dados esteja confiável, foram feitas corridas experimentais para a determinação das curvas de calibração de cada transmissor de pressão que estão identificados nos gráficos das figuras 12, 13, e 14 que foram gerados através dos dados coletados apresentados na tabela 2. A calibração instrumental é de fundamental importância para o desenvolver não só da coleta de dados, mas também para que a identificação do modelo seja satisfatória.

Tabela 2 – Dados coletados durante o procedimento de calibração.

Nível TQ1 (cm)	Nível TQ3 (cm)	Nível TQ2 (cm)	0 a 5 V - TQ01	0 a 5 V - TQ03	0 a 5 V - TQ 02
96,4	96,2	96	4,618269	4,29585	4,525329
89,4	89,2	89	4,385375	4,059604	4,273307
83,9	83,8	83,5	4,135257	3,872252	4,083445
80,4	80,2	80	3,992067	3,750615	3,960034
75,5	75,4	75	3,80177	3,580974	3,797895
70,5	70,4	70,2	3,608769	3,406726	3,62144
65	64,9	64,6	3,384314	3,212572	3,428302
60,3	60,2	59,9	3,203068	3,045446	3,263971
55,2	55,1	54,8	2,991298	2,865049	3,092077
49,4	49,4	49,1	2,774243	2,666594	2,880926
45	44,7	44,8	2,581763	2,506409	2,720451
40,2	39,9	40	2,396949	2,344001	2,563601
35,4	35,1	35,3	2,203229	2,171409	2,374902
29,9	29,7	29,9	1,987428	1,97702	2,186302
24,3	24,1	24,2	1,764778	1,77692	1,972164
20	19,8	20	1,594879	1,631292	1,843362
14,3	14	14,2	1,364834	1,428914	1,638192
10,1	9,9	10,1	1,20248	1,282807	1,503531
5,9	5,6	5,8	1,039937	1,135535	1,348916
3,8	3,4	3,6	0,946652	1,064217	1,267495

Após a coleta de dados, foi realizado todo o procedimento de linearização e validação do modelo matemático apresentado na seção 2.6 com a finalidade de gerar uma maior confiabilidade para o sistema construído. Será mostrado a seguir o procedimento aplicado para na determinação dos parâmetros do transmissor de pressão do tanque 1, porém o procedimento foi realizado de forma igual para os 3 periféricos, os resultados obtidos para as outras duas curvas de calibração também serão indicados.

Utilizando os dados relacionados ao nível e tensão referente ao tanque 1 da Tabela 2 e utilizando as equações (7), (8), (9), (10), (11) e (14) tem-se:

$$\bar{V} = 2,70 \text{ Volts}$$

$$\bar{h} = 47,74 \text{ centímetros}$$

$$Shv = 650,9 \text{ cm.volt}$$

$$Svv = 25,91 \text{ volts}^2$$

$$\widehat{\beta}_1 = 25,119 \text{ cm/volt}$$

$$\widehat{\beta}_0 = -20,047 \text{ cm}$$

$$\hat{\sigma}^2 = 0,038 \text{ cm}^2$$

Após encontrar todos os parâmetros, pode ser realizada a validação dos coeficientes aproximados encontrados da seguinte forma:

Para $\widehat{\beta}_1$ (utilizando a equação (11)):

$$t_0 = 3320,32$$

Sendo 20 pontos experimentais de coleta e adotando $\alpha = 5\%$, tem-se:

$$t_{0,025,18} = 2,101 < t_0$$

Como $|t_0| > t_{0,025,18}$, a hipótese nula é rejeitada e a hipótese alternativa é validada afirmando a relação linear entre o nível e a tensão coletados durante o experimento.

Para $\widehat{\beta}_0$ (utilizando a equação (13)):

$$t_0 = -177,721$$

Como $|t_0| > t_{0,025,18}$, a hipótese nula é rejeitada e a hipótese alternativa é validada afirmando que o intercepto da equação de calibração é diferente de zero.

Após essa validação, os coeficientes $\widehat{\beta}_0$ e $\widehat{\beta}_1$ estão aceitos e validados para os dados coletados no tanque 1. Para os tanques 2 e 3 também foi feito o mesmo procedimento de regressão e validação gerando resultados satisfatórios e validados encontrando os seguintes valores para $\widehat{\beta}_0$ e $\widehat{\beta}_1$:

Para o tanque 2:

$$\widehat{\beta}_1 = 28,306 \text{ cm/volt}$$

$$\widehat{\beta}_0 = -32,246 \text{ cm}$$

Para o tanque 3:

$$\widehat{\beta}_1 = 28,59 \text{ cm/volt}$$

$$\widehat{\beta}_0 = -26,886 \text{ cm}$$

Após a validação da regressão de todos os tanques, foram geradas as equações, conforme o padrão da equação (6), que governam as curvas de calibração correspondentes para cada transmissor de pressão e através da curva de calibração pode-se equacionar o comportamento de coleta de dados de cada transmissor. Após encontrar o equacionamento de cada transmissor, foi determinado o coeficiente de correlação entre os dados obtidos e a curva gerada para cada periférico, os valores obtidos foram satisfatórios pois o coeficiente encontrado foi 1 que significa o valor máximo de correlação entre os dados coletados.

Figura 12 – Curva de calibração do Transmissor de Pressão do Tanque 1.

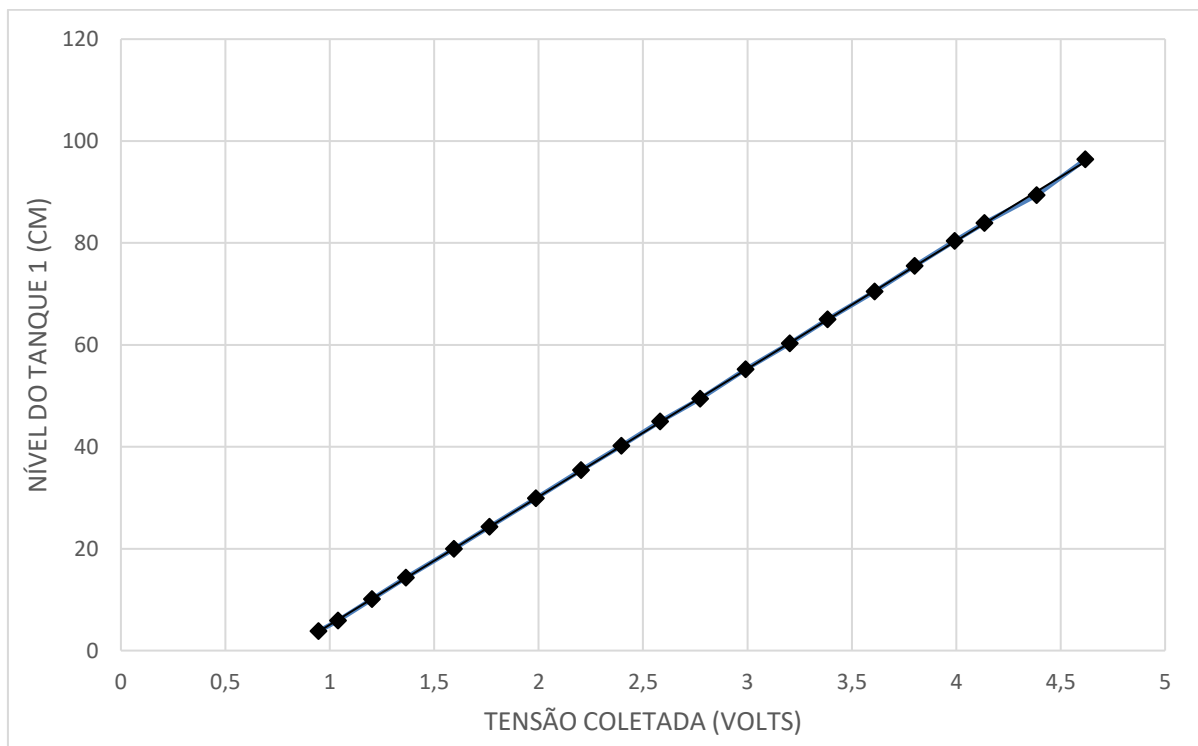


Figura 13 – Curva de calibração do Transmissor de Pressão do Tanque 2.

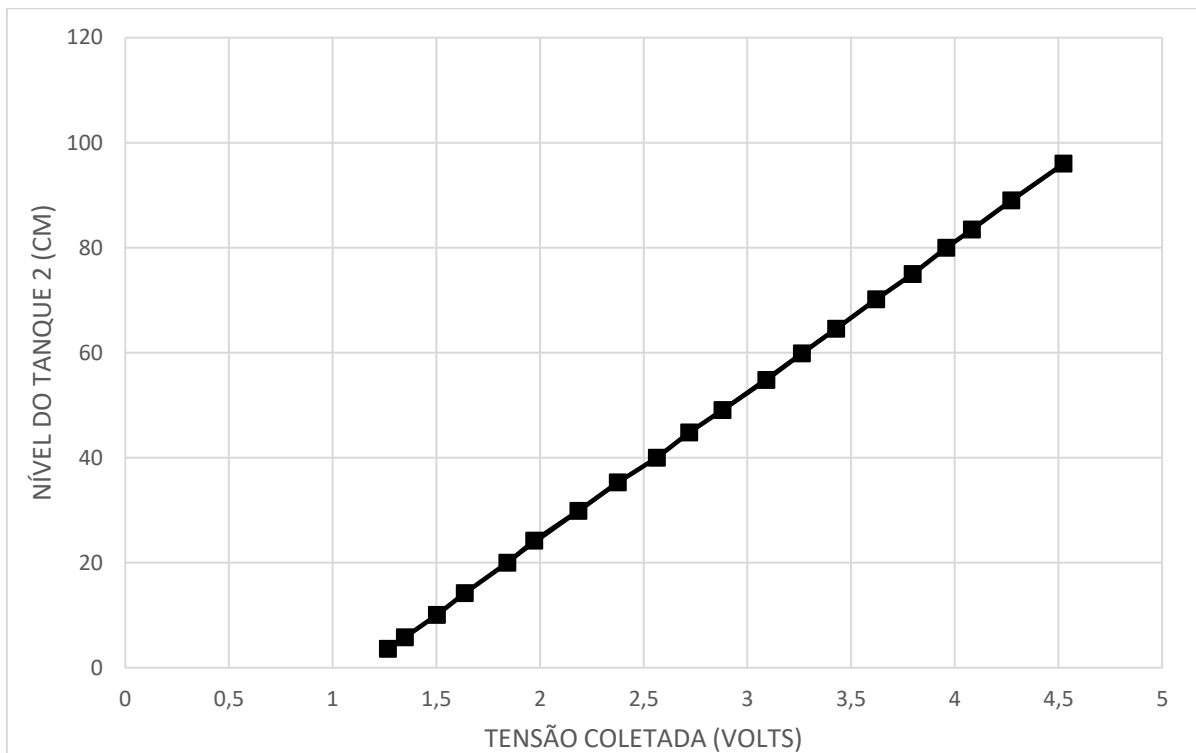
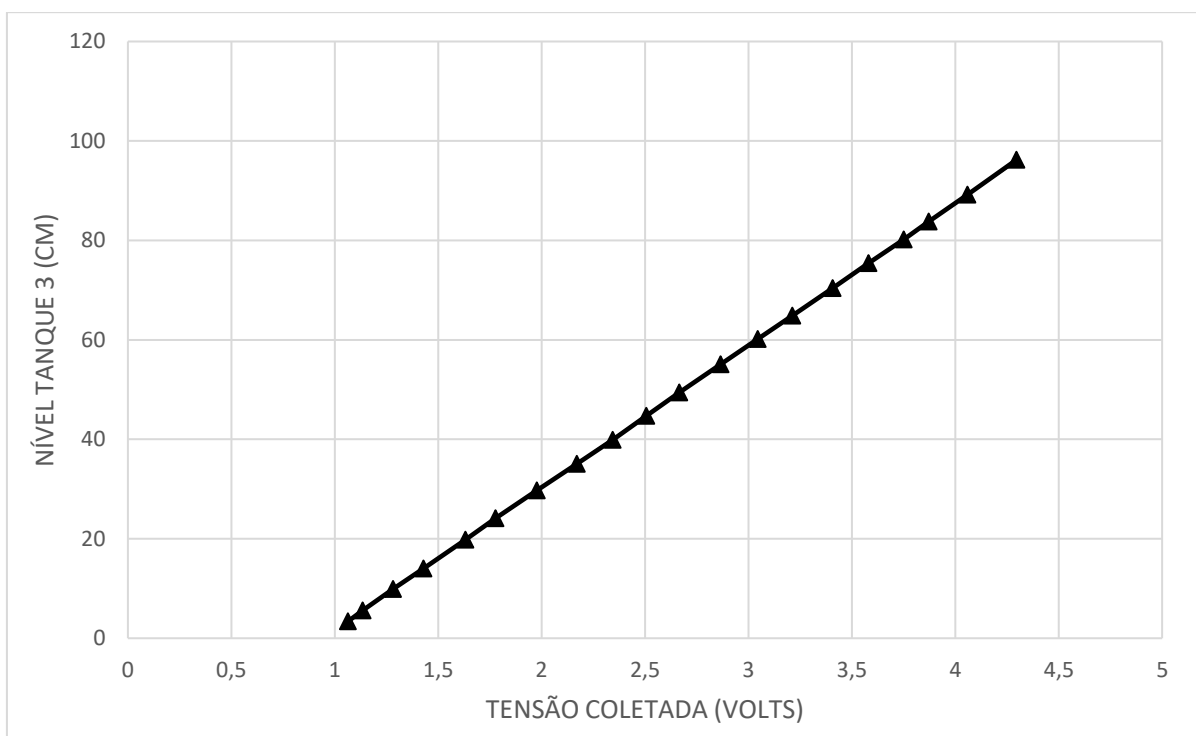


Figura 14 – Curva de calibração do Transmissor de Pressão do Tanque 3.



As equações dos transmissores de pressão dos tanques 1, 2 e 3 estão representadas nas equações (15), (16) e (17) respectivamente.

$$y(V) = 25,119 * V - 20,047 \quad (15)$$

$$y(V) = 28,306 * V - 32,246 \quad (16)$$

$$y(V) = 28,589 * V - 26,886 \quad (17)$$

Onde:

$Y(x)$ = Nível do respectivo tanque em centímetros.

x = Sinal retornado pelo transmissor após a leitura do valor de nível.

Figura 15 – Modelo de Bomba utilizado.



As bombas utilizadas no sistema projetado, do modelo representado na figura 15, possuem tensão nominal de 12 Volts, corrente máxima suportada de 2 Amperes e uma vazão máxima de até 2 Litros por minuto. As minibombas utilizadas foram conectadas em portas PWM da placa Arduino Mega 2560 e através do tratamento de todos os dados de leitura, será enviado um sinal de tensão modulado para as mesmas com a finalidade de estabelecer o fluxo de líquido nas tubulações da planta, todos os sinais gerados e enviados por elas podem ser monitorados e alterados durante a operação do projeto por qualquer pessoa.

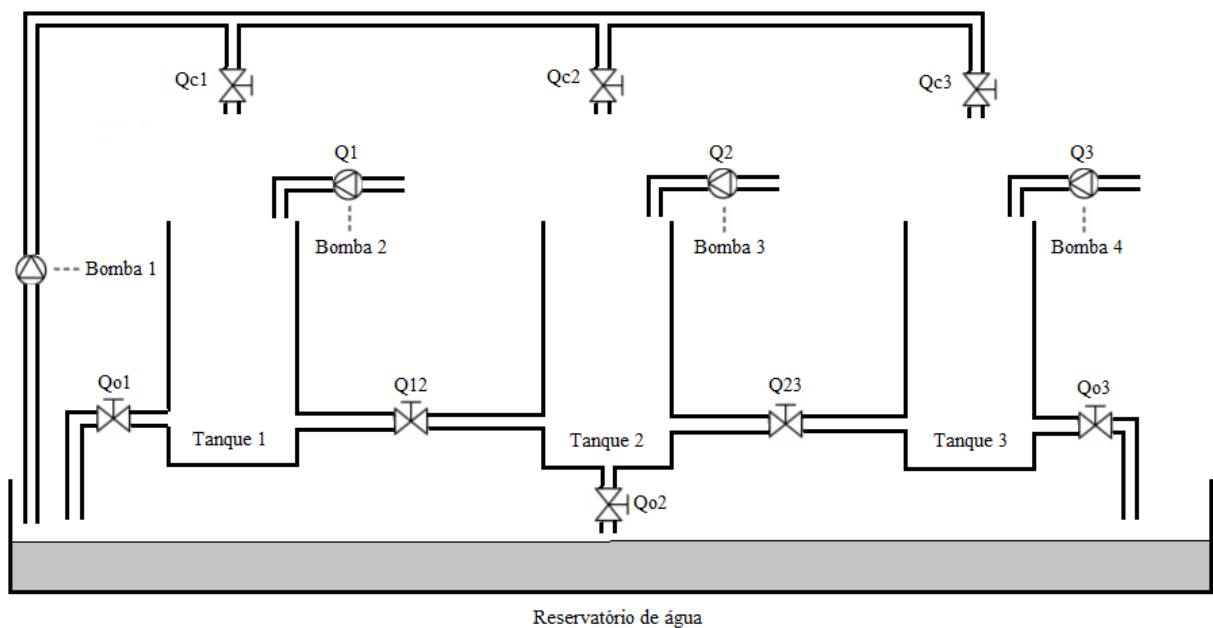
4 Modelagem do sistema

O objetivo desse capítulo é apresentar o sistema projetado, começando pela descrição das principais partes do sistema através de uma representação gráfica do mesmo contendo seus principais componentes para, finalmente, modelar matematicamente e propor um controlador para o sistema proposto.

A planta didática construída, representada na figura 16, contém três tanques de acrílico cilíndricos de mesma altura e com áreas de seção transversal diferentes, o que impõe ao sistema tanques com constante de tempo diferentes. O objetivo disso é impor desafios no controle do sistema uma vez que os controladores terão que lidar com sistemas com dinâmicas distintas. O nível de água nos tanques será determinado através da coleta de dados de sensores de pressão diferencial posicionados na mesma altura e próximos ao fundo de cada tanque.

Além das válvulas e bombas mostradas no esquemático, o sistema construído também possui um sensor de vazão em cada corrente de entrada de líquido dos tanques e um painel elétrico, descrito no capítulo 3, que será encarregado de garantir o funcionamento de todos os periféricos da planta e onde serão posicionados placa Arduino, os conversores de sinal e a fonte de energia elétrica.

Figura 16 – Diagrama esquemático da planta didática de controle de nível.



Para a modelagem do processo são assumidas algumas hipóteses simplificadoras:

- A válvula manual na saída dos tanques é linear;
- O peso específico da água não varia e a mesma é incompressível;
- Todos os pontos do sistema possuem pressões atmosféricas iguais;
- Os tanques possuem áreas de seções transversais constantes.
- As vazões Q_{c1} , Q_{c2} e Q_{c3} são possíveis distúrbios e para a modelagem será considerado somente a válvula Q_{c1} aberta e as demais fechadas.

4.1 Modelagem teórica do sistema projetado

Para definir um modelo matemático que represente o sistema projetado são consideradas as equações que governam o balanço de massa da planta que resumidamente dizem que a vazão mássica de líquido que entra em um tanque menos a vazão extraída do mesmo é igual a variação de massa no tanque (acúmulo de massa no tanque por unidade de tempo).

Para facilitar o desenvolvimento e entendimento da modelagem matemática, primeiramente é abordado o tratamento para cada variável do processo e depois será feito todo o desenvolvimento detalhado do modelo matemático. As variáveis do processo mostrado na figura 16 podem ser definidas da seguinte forma:

- Q_1 , Q_2 e Q_3 : vazões de entrada (manipuladas) nos tanques 1, 2 e 3 respectivamente.
- Q_{c1} , Q_{c2} e Q_{c3} : vazões que representam perturbações (carga) do processo.
- Q_{o1} , Q_{o2} e Q_{o3} : vazões de saída nos tanques 1, 2 e 3 respectivamente.
- Q_{12} e Q_{23} : vazões entre os tanques 1-2 e 2-3 respectivamente.
- H_1 , H_2 e H_3 : variáveis que representarão as alturas do nível de água nos tanques 1, 2 e 3, respectivamente.
- A_1 , A_2 e A_3 : Áreas de seções transversais dos tanques 1, 2 e 3 respectivamente.

Levando em consideração o ponto de condição inicial do sistema ($H_1(0)$, $H_2(0)$, $H_3(0)$) para a modelagem matemática do processo, definindo as variáveis de estado da seguinte forma:

$$x_1 = H_1 - H_1(0), \quad x_2 = H_2 - H_2(0), \quad x_3 = H_3 - H_3(0)$$

Levando em consideração a resistência ao escoamento imposto pelas válvulas localizadas das saídas dos tanques e supondo que são idênticas e proporcionais à altura de líquido dentro dos tanques, tem-se:

$$Q_{o2} = \frac{x_2}{R} \quad (18)$$

$$Q_{o3} = \frac{x_3}{R} \quad (19)$$

$$Q_{23} = \frac{x_2 - x_3}{R} \quad (20)$$

$$Q_{12} = \frac{x_1 - x_2}{R} \quad (21)$$

Após definir variáveis nas fórmulas (18), (19), (20) e (21) as equações de balanço de massa podem ser descritas da seguinte forma:

$$A_1 \frac{dx_1}{dt} = Q_1 - Q_{o1} - Q_{12} + Q_{c1} = Q_1 - \frac{x_1}{R} - \frac{x_1 - x_2}{R} + Q_{c1}$$

$$A_2 \frac{dx_2}{dt} = Q_2 - Q_{o2} + Q_{12} - Q_{23} = Q_2 - \frac{x_2}{R} + \frac{x_1 - x_2}{R} - \frac{x_2 - x_3}{R}$$

$$A_3 \frac{dx_3}{dt} = Q_3 - Q_{o3} + Q_{23} = Q_3 - \frac{x_3}{R} + \frac{x_2 - x_3}{R}$$

Assim,

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{A_1} \left(Q_1 - \frac{x_1}{R} - \frac{x_1 - x_2}{R} + Q_{c1} \right) \quad (22)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{A_2} \left(Q_2 - \frac{x_2}{R} + \frac{x_1 - x_2}{R} - \frac{x_2 - x_3}{R} \right) \quad (23)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{A_3} \left(Q_3 - \frac{x_3}{R} + \frac{x_2 - x_3}{R} \right) \quad (24)$$

Além do desenvolvimento da modelagem matemática teórica do sistema, também foi feita a construção do modelo encontrado e sua simulação no ambiente *Simulink* do *software MatLab* (Figuras 17 e 18). Para a realização da simulação do modelo foram definidos valores para as vazões de entrada Q_{c1} , Q_1 , Q_2 e Q_3 da seguinte forma:

- $Q_{c1} = 500 \text{ cm}^3/\text{s}$
- $Q_1 = 1000 \text{ cm}^3/\text{s}$
- $Q_2 =$ Nos primeiros 16 segundos atuou com módulo de $500 \text{ cm}^3/\text{s}$ e após isso houve um aumento para um módulo de $2000 \text{ cm}^3/\text{s}$

- $Q_3 = 2000 \text{ cm}^3/\text{s}$

Figura 17 - Construção do modelo matemático no ambiente Simulink.

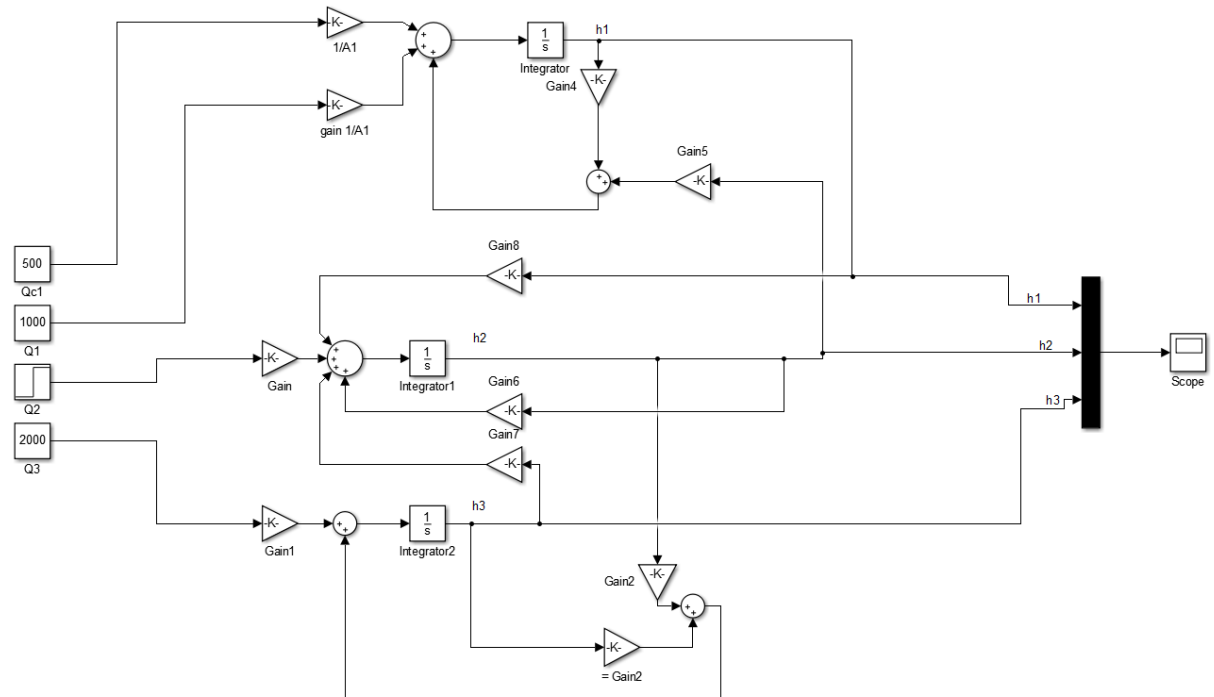
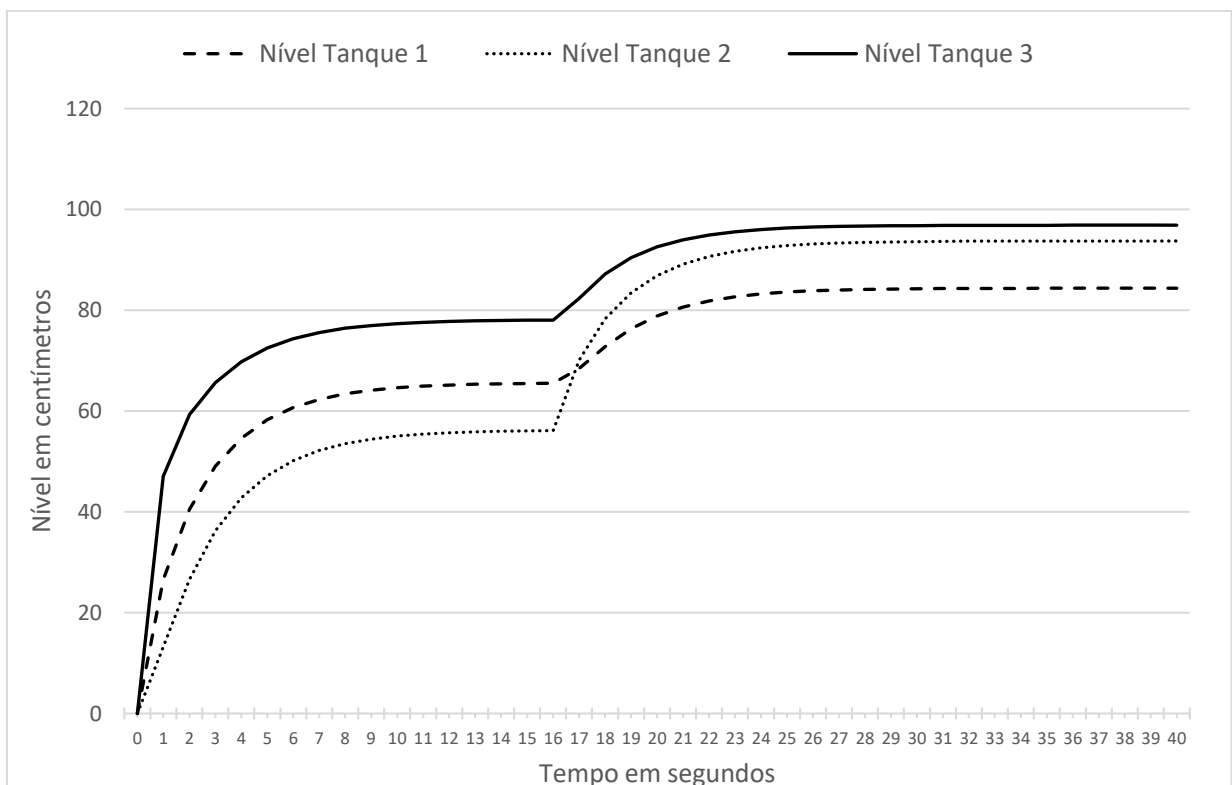


Figura 18 – Comportamento temporal dos níveis de líquido no sistema de tanques.



4.2 Modelagem experimental e determinação dos parâmetros.

O intuito desse capítulo é realizar o ajuste de alguns parâmetros definidos teoricamente, fazendo o uso de corridas experimentais para os ajustes com a finalidade de identificar o comportamento do sistema quando submetido a diferentes valores em suas entradas para enfim definir a melhor modelagem para a planta.

4.2.1 Modelo matemático Linear do processo

A modelagem experimental de um sistema é de fundamental importância para a confiabilidade e precisão dos dados da planta, pois a partir dos dados experimentais será gerada uma análise comparativa entre os dados experimentais e teóricos e a partir de métodos matemáticos serão determinados os valores ideais dos parâmetros que constituem as equações (22), (23) e (24) que descrevem a dinâmica do sistema construído.

O objetivo dessa seção é acrescentar alguns parâmetros nas equações (22), (23) e (24) de forma a garantir uma maior precisão dos dados e da modelagem do sistema. A partir da modelagem das equações, serão feitos experimentos em malha aberta e com os dados obtidos uma estimação dos parâmetros do modelo linear através do método dos mínimos quadrados.

Os sinais de 0 a 12 Volts enviados para a bomba pelo Arduino Mega 2560, por padrão, é mapeado como 0 a 255 bytes no ambiente *Simulink*, ou seja, o usuário envia um sinal de 0 a 255 bytes para a placa, e a mesma envia um sinal PWM de 0 a 12 Volts para o motor da bomba, que por sua vez altera as rotações do motor (rpm) e que consequentemente altera o valor da vazão gerada pela bomba para o sistema. Será assumida uma relação entre o sinal PWM (0-255 bytes) e a vazão das bombas da seguinte forma:

$$Q1(u1) = a1(u1(t) - 140) + b1 \quad (25)$$

$$Q2(u2) = a2(u2(t) - 140) + b2 \quad (26)$$

$$Q3(u3) = a1(u3(t) - 140) + b3 \quad (27)$$

$$Qc1(uc1) = ac1(uc1(t) - 140) + bc1 \quad (28)$$

As equações que governam o comportamento das vazões das bombas descritas, possuem um mínimo de 140 bytes, definidos experimentalmente, para vencerem a resistência das tubulações e abastecer os tanques com sucesso, fato que justifica a diferença nos parâmetros equacionados. Após realizar o equacionamento (25), (26), (27) e (28) pode-se enfim modelar as equações (22), (23) e (24) para gerarmos as equações correspondentes (29), (30) e (31), já modeladas para as finalidades do projeto, respectivamente:

$$\tau_1 \frac{dx_1(t)}{dt} = K_1(u_{c1}(t) - 140) + K_2(u_1(t) - 140) + w_1 + (x_2 - 2x_1) \quad (29)$$

$$\tau_2 \frac{dx_2(t)}{dt} = K_3(u_2(t) - 140) + w_2 + (x_1 - 3x_2 + x_3) \quad (30)$$

$$\tau_3 \frac{dx_3(t)}{dt} = K_4(u_3(t) - 140) + w_3 + (x_2 - 2x_3) \quad (31)$$

Onde:

$$\tau_1 = A_1R, K_1 = a_{c1}R, K_2 = a_1R, w_1 = R(b_1 + b_{c1});$$

$$\tau_2 = A_2R, K_3 = a_2R, w_2 = Rb_2;$$

$$\tau_3 = A_3R, K_4 = a_3R, w_3 = Rb_3.$$

Todos os parâmetros descritos são constantes e serão estimados experimentalmente a partir de medições experimentais de $u_{c1}(t)$, $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, $h_1(t)$, $h_2(t)$ e $h_3(t)$. A determinação de todos os parâmetros foram feitos através de um experimento de aproximadamente 12600 segundos (três horas e trinta minutos), tempo necessário para fazer uma varredura de variações permutando todos os possíveis arranjos de combinações de variações entre as vazões da planta, para isso foram construídos sinais para as vazões a serem percorridos durante o experimento para Q_{c1} , Q_1 , Q_2 e Q_3 , sempre obedecendo a variação de 140 a 255 bytes no sinal PWM:

Figura 19 – Sinal de entrada PWM para a bomba de carga (Perturbação).

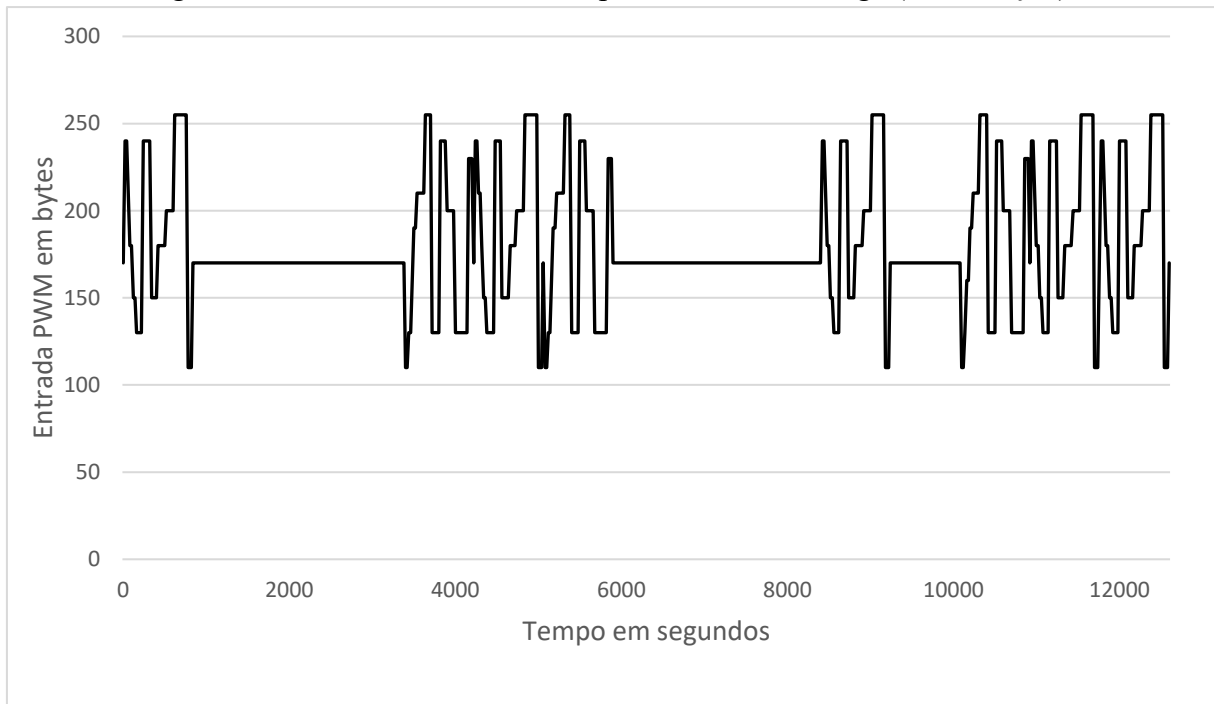


Figura 20 – Sinal de entrada PWM para a bomba Q1 do Tanque 1.

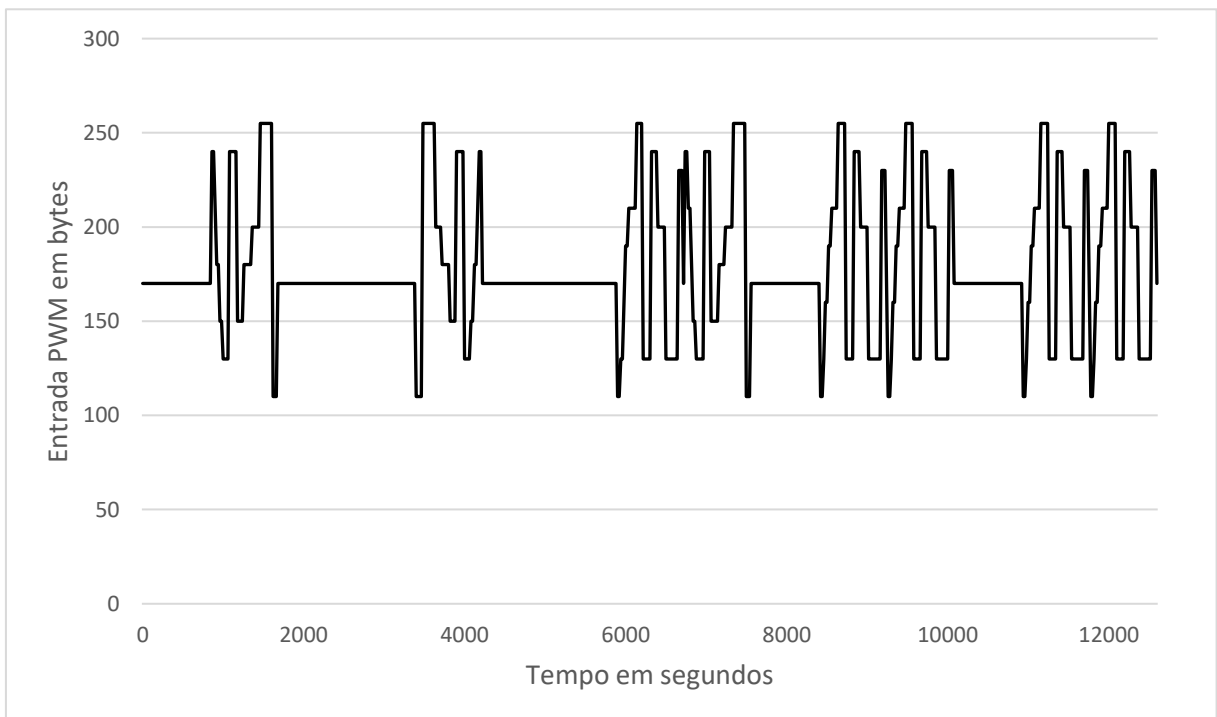


Figura 21 – Sinal de entrada PWM para a bomba Q2 do Tanque 2.

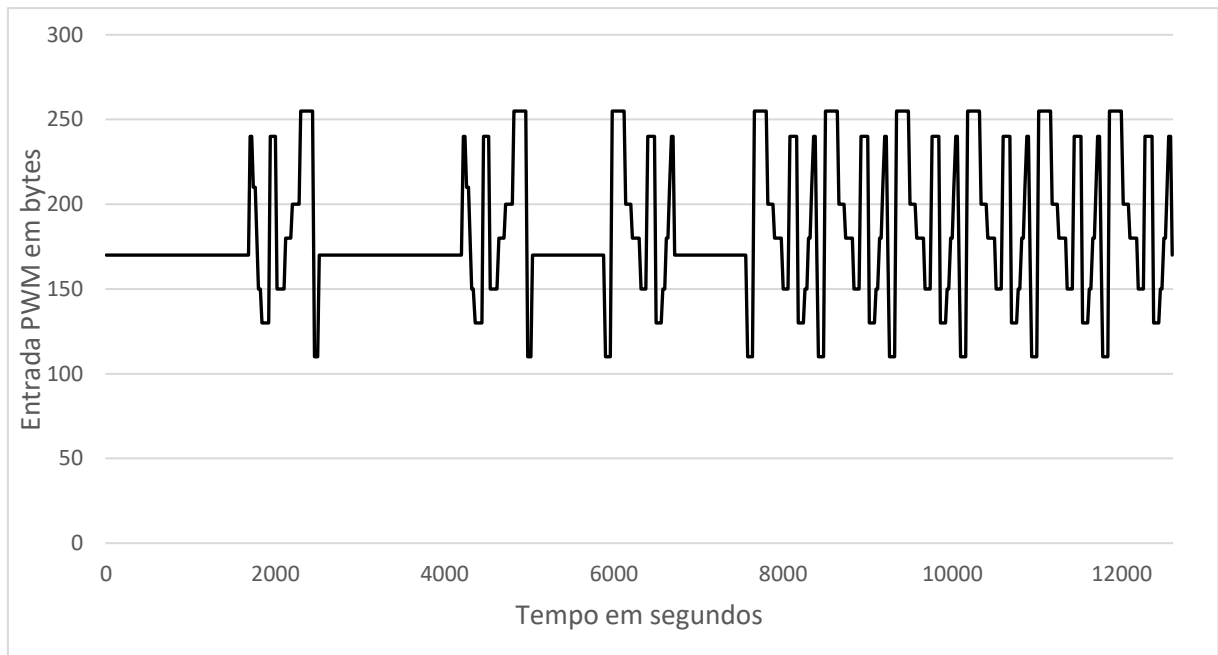
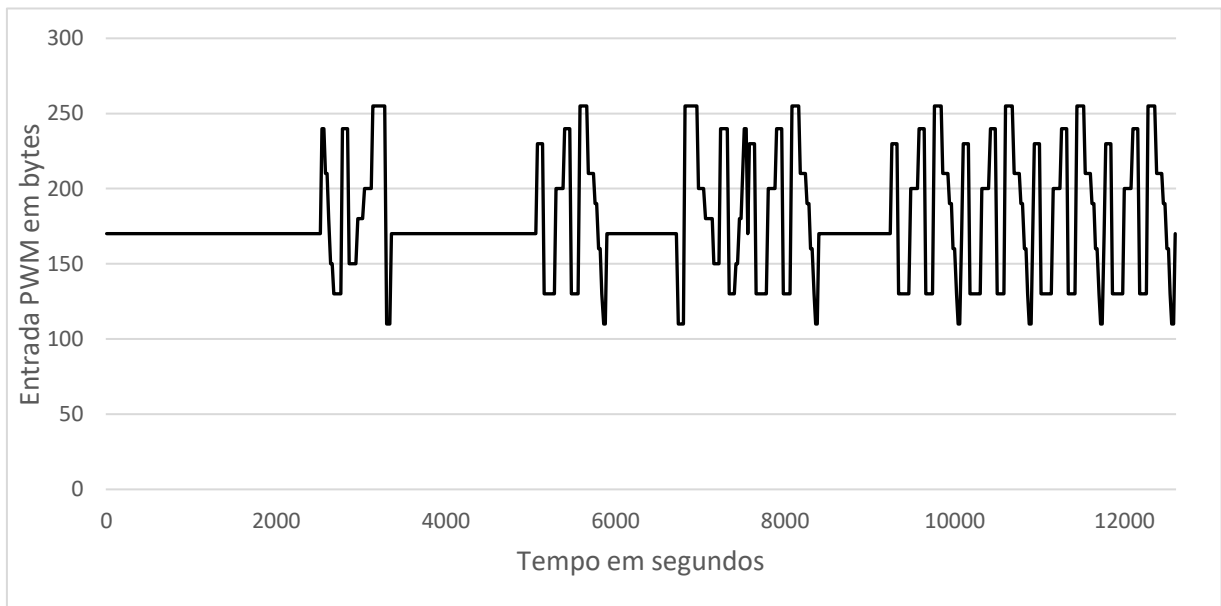
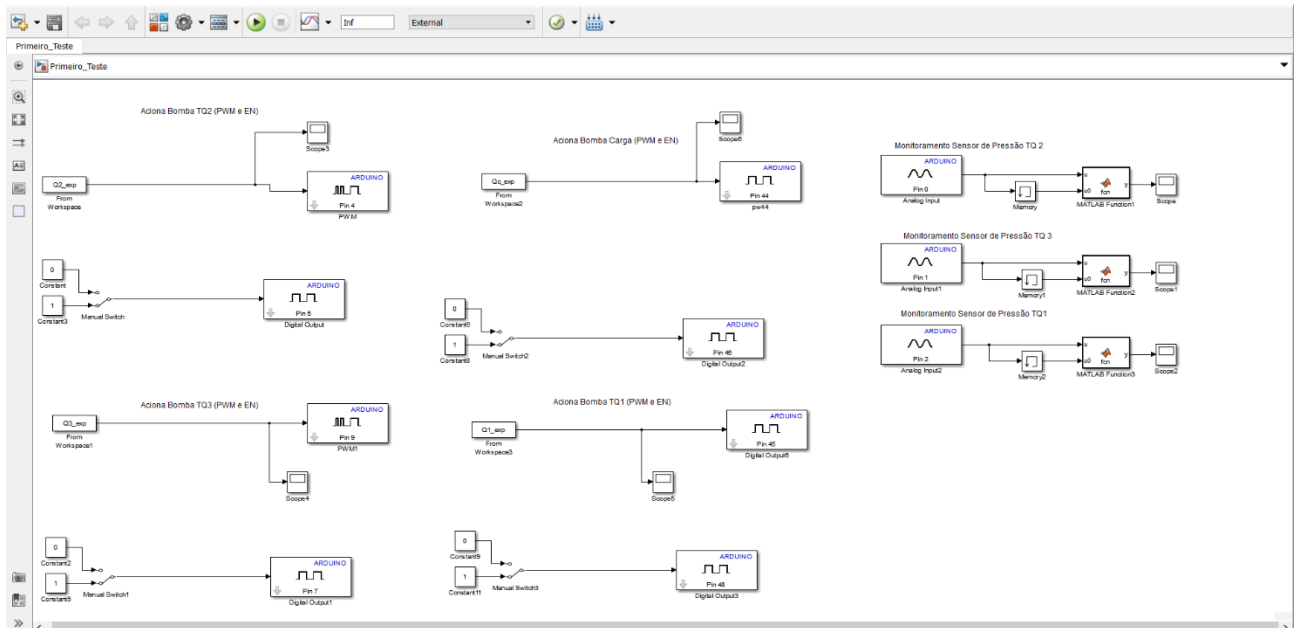


Figura 22 – Sinal de entrada PWM para a bomba Q3 do Tanque 3.



Como já são conhecidos os valores de vazão utilizados, representados graficamente nas figuras 19, 20, 21 e 22, é preciso determinar os valores de variação de nível dos tanques através de corridas experimentais utilizando as vazões de entradas mostradas graficamente, para isso foi utilizado o ambiente *Simulink* do MATLAB com o suporte para a plataforma Arduino da seguinte forma:

Figura 23 – Modelagem da planta no ambiente Simulink.



A simulação mostrada na Figura 23 pode ser acompanhada e alterada em tempo real, todos os equipamentos e periféricos do sistema estão representados nos blocos e podem também ser acompanhados quantitativamente através de gráficos. Os valores de entrada das vazões Q_{c1} , Q_1 , Q_2 e Q_3 foram inseridos no sistema real através do bloco *To Workspace* do ambiente *Simulink*, que tem a função de pegar grandes séries de valores salvos na área de trabalho do MATLAB e inseri-los em uma simulação qualquer, respeitando um tempo de amostragem predefinido.

Os transmissores de pressão da planta são responsáveis por gerar o valor de nível dos tanques e devido ao processo de medida e conversão dos sinais realizados pelo instrumento alguns ruídos são gerados e esses podem dificultar a identificação do sistema, para isso foi criada uma função de filtro digital na coleta de dados de nível dos tanques que obedecem o comportamento da equação (32):

$$Y_f = (1 - \alpha)Y_{i-1} + \alpha Y_i \quad (32)$$

Onde:

Y_f = Valor filtrado

Y_{i-1} = Estado anterior do valor filtrado

Y_i = Valor coletado atual

α = Parâmetro ajustável

A equação (32) mostra o comportamento do filtro digital implantado na coleta de dados do sistema, para que o mesmo possa ser utilizado é preciso determinar o parâmetro α da equação que deve ser um valor entre 0 e 1. A determinação do parâmetro em questão foi realizada de forma experimental, a priori foram fixados os valores de 0,3, 0,5 e 0,7 para o mesmo.

Nas figuras 24 e 25 pode-se observar respectivamente os valores de entrada para os testes de filtragem e o valor coletado retornado pelo filtro projetado para diferentes valores de alfa. Observando a figura 25 é possível chegar a conclusão que o parâmetro alfa ajustado com o valor de 0,5 e 0,3 não foi nada satisfatório por retornar mais de 90% de seus valores com efeito serrote, porém quando observa-se a curva gerada com o parâmetro alfa no valor de 0,7 é possível chegar a conclusão da eliminação de grande parte do efeito serrote dos dados sem impactar na dinâmica real da coleta de dados obtidos no sistema, sendo o possível melhor ajuste para o parâmetro em questão.

Figura 24 - Entrada experimental para ajuste do parâmetro alfa.

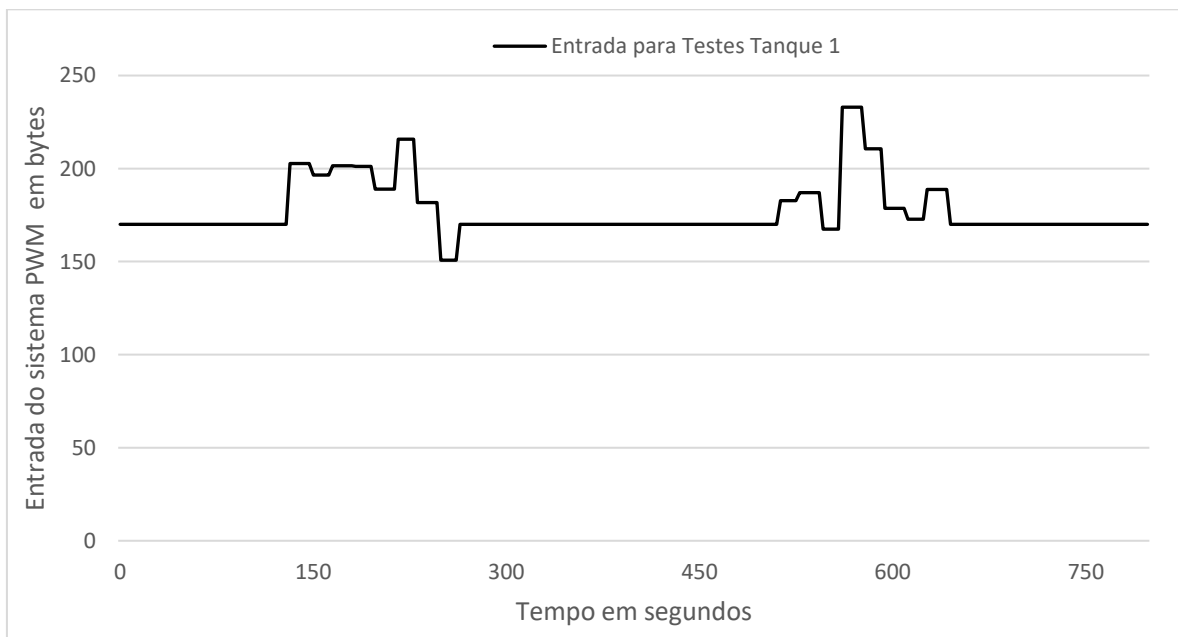
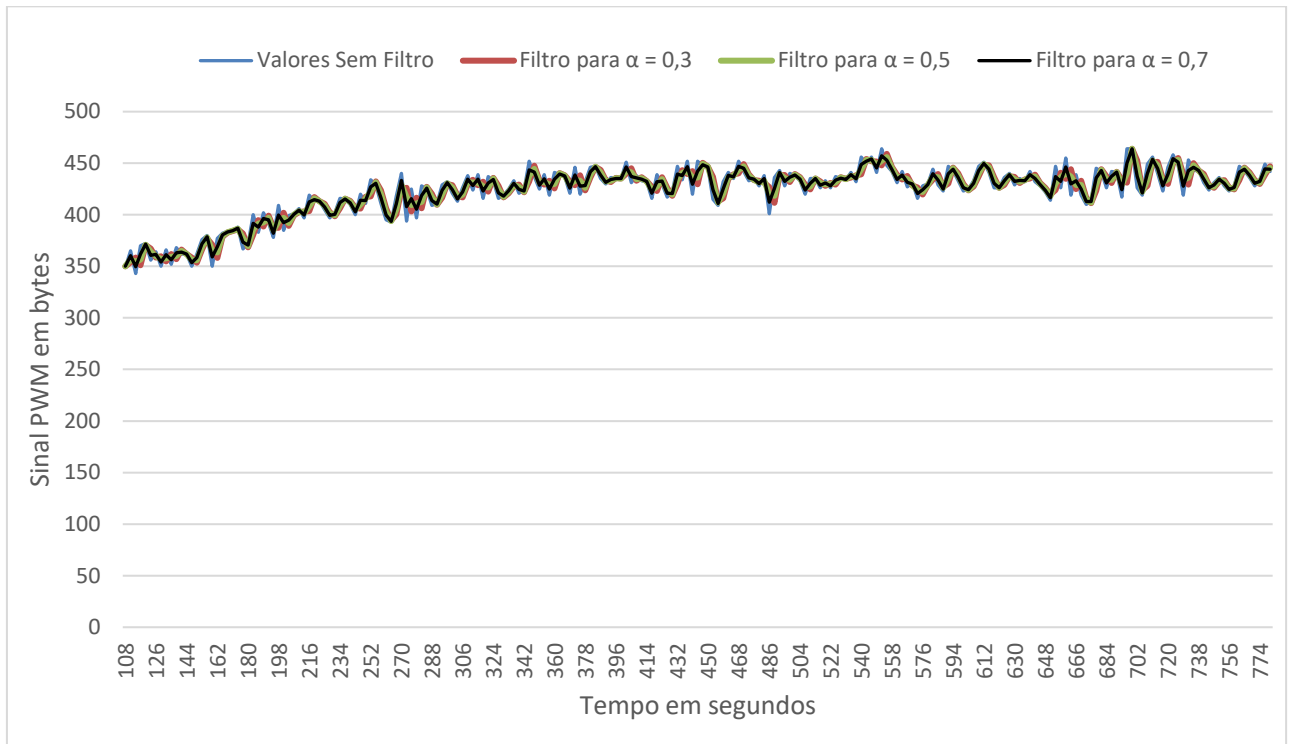


Figura 25 - Dados para diferentes valores do parâmetro alfa.



Devido a resposta observada, o valor ideal encontrado foi 0,7 devido ao fato da coleta de dados responder de uma forma mais satisfatória aos ruídos, pois quando esse valor foi colocado na equação para os testes a resposta obtida seguiu de forma coerente as respostas anteriores sem deixar de seguir também a tendência real do sistema.

Após a definição do parâmetro do filtro e da estruturação do diagrama de blocos foi realizada a primeira corrida experimental com os valores de entrada Q_{c1} , Q_1 , Q_2 e Q_3 de acordo com os gráficos das figuras 19, 20, 21 e 22. Durante o experimento foi realizada a coleta de dados com auxílio do bloco *To file* do ambiente *Simulink* do *MatLab* que possui a função de exportar todos os dados para um arquivo de texto com amostragens de tempo e valores coletados, após a coleta dos dados filtrados foi possível gerar os seguintes gráficos apresentados nas figuras 26, 27 e 28.

Figura 26 – Nível do tanque 1 coletado experimentalmente.

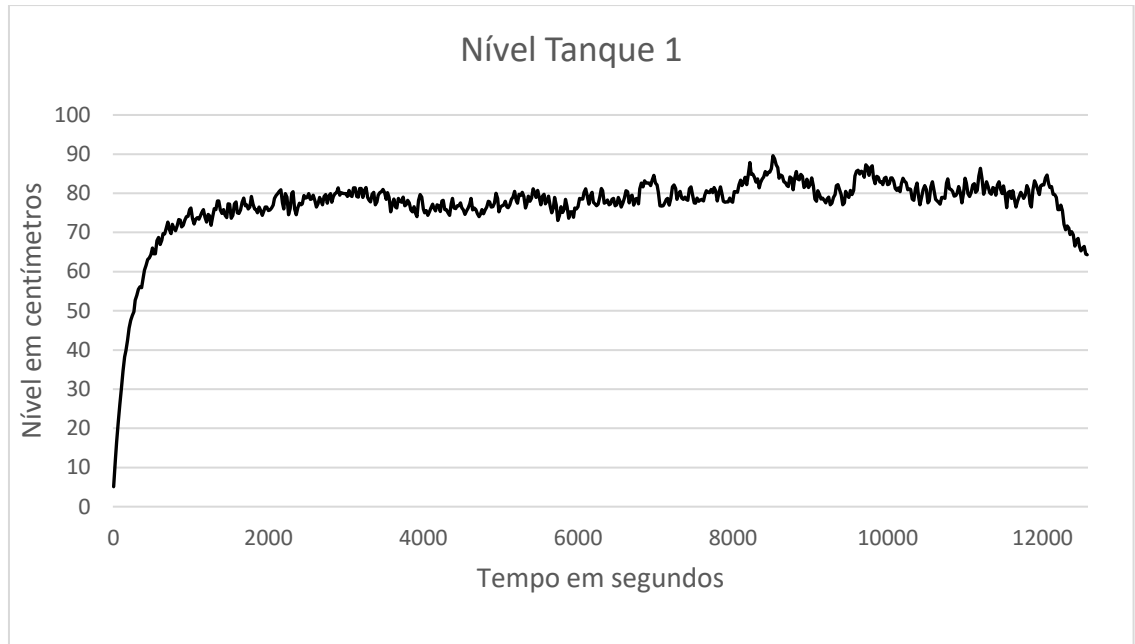


Figura 27 – Nível do tanque 2 coletado experimentalmente.

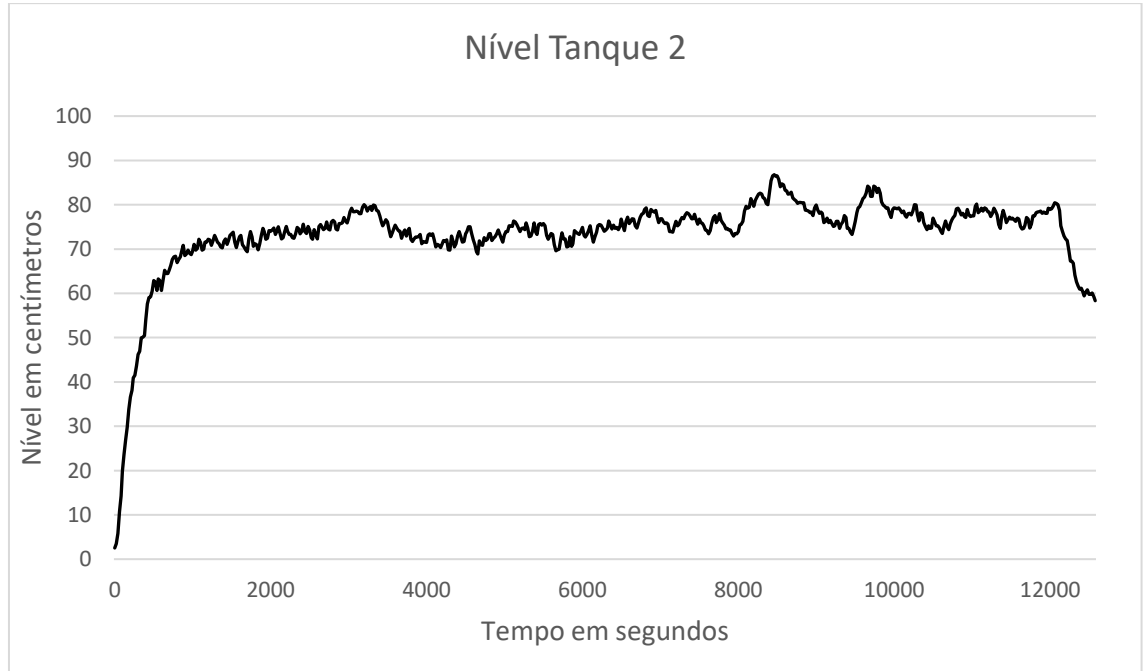
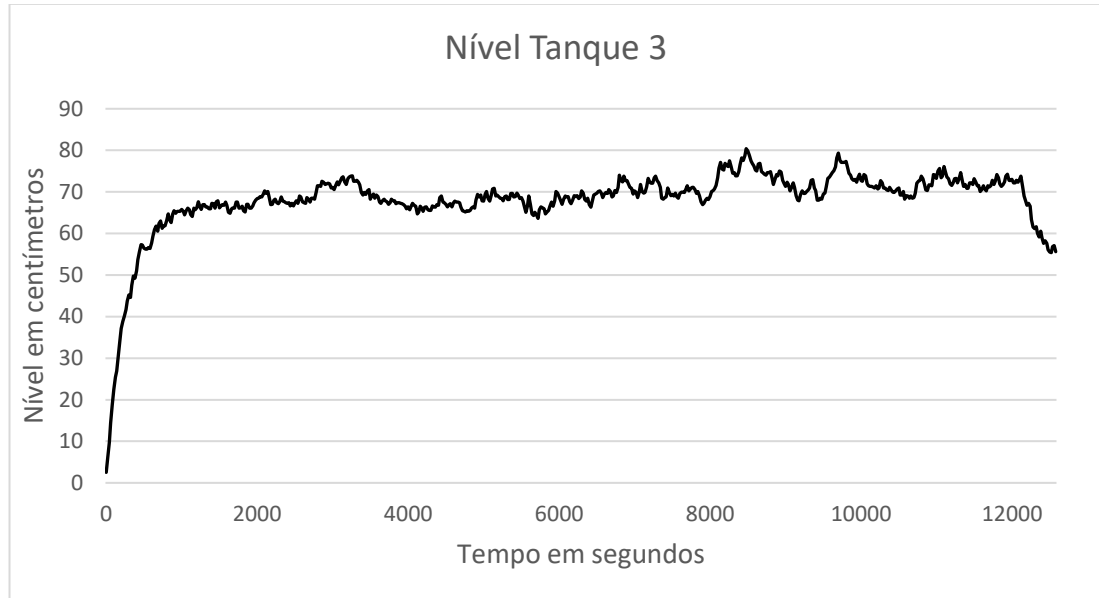


Figura 28 – Nível do tanque 3 coletado experimentalmente.



Os dados de resposta do sistema foram coletados com a finalidade de determinar os parâmetros da aproximação do modelo linear da planta, determinação de parâmetros que são possíveis através da resolução da equação de otimização a seguir:

$$\min_{(\tau_1, \tau_2, \tau_3, K_1, K_2, K_3, K_4, \omega_1, w_2, w_3)} \sum_{i=1}^n (h^{exp}(t_i) - h(t_i))^2 \quad (33)$$

Sujeito as equações diferenciais (x), (x) e (x).

O termo $(h^{exp}(t_i) - h(t_i))$ da equação (31) retorna o valor do erro de modelagem do sistema, diante desse fato os valores dos parâmetros $\tau_1, \tau_2, \tau_3, K_1, K_2, K_3, K_4, \omega_1, w_2$ e w_3 foram ajustados para que o somatório do quadrado dos erros seja minimizado a cada amostra de coleta de dados a fim de minimizar o erro de modelagem e obter uma aproximação satisfatória.

O código utilizado para o ajuste de parâmetros apresentado está nos Anexos 02 e 03 e após as várias iterações foram retornados os seguintes valores para os parâmetros.

Tabela 3 – Valores encontrados a partir do ajuste otimizado.

Parâmetros	Ajustes
K2	$0,177 \frac{cm}{byte}$
K1	$0,038 \frac{cm}{byte}$
K3	$0,488 \frac{cm}{byte}$
K4	$(-0,0714) \frac{cm}{byte}$
τ_1	253,970 s
τ_2	354,124 s
τ_3	275,614 s
w1	75,630 cm
w2	56,500 cm
w3	66,890 cm

Com os valores ajustados dos parâmetros, pode-se substituir os mesmos nas equações (27), (28) e (29) e gerar os valores de resposta para o modelo obtido a partir dos dados coletados experimentalmente. Com todos os parâmetros definidos o sistema pode ser analisado para a aplicação de propostas de controle.

Figura 29 – Resposta do nível do tanque 1 do modelo obtido.

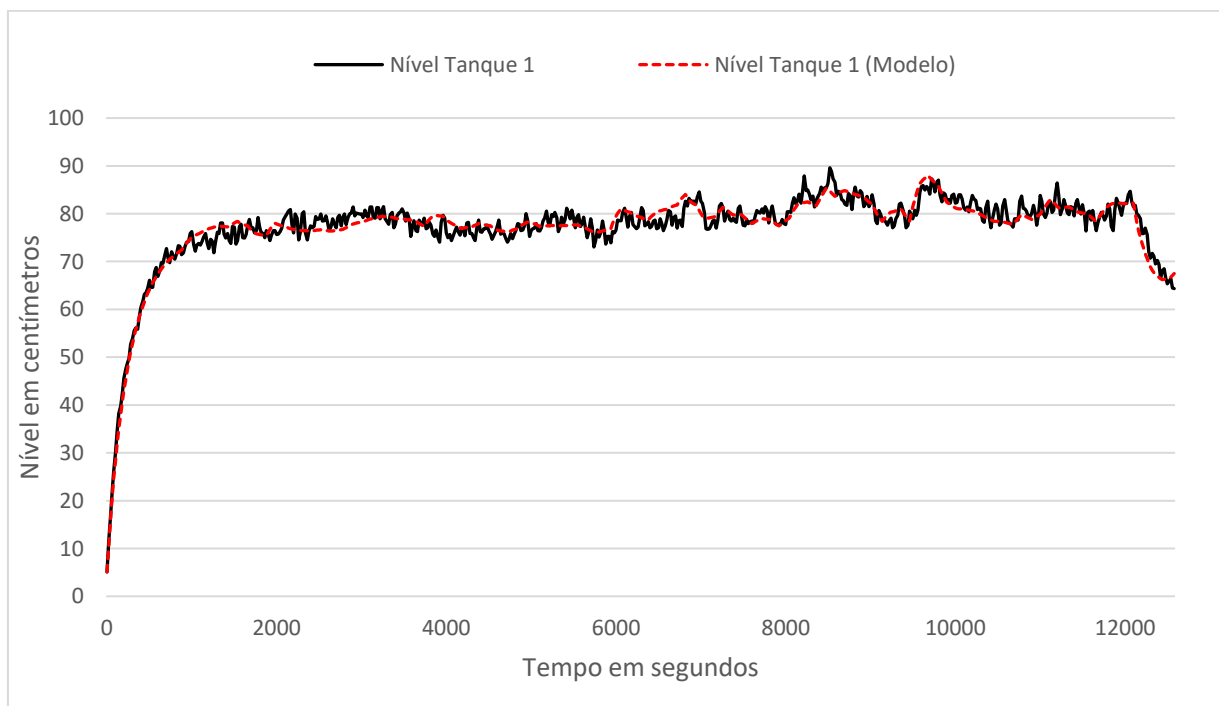


Figura 30 – Resposta do nível do tanque 2 do modelo obtido.

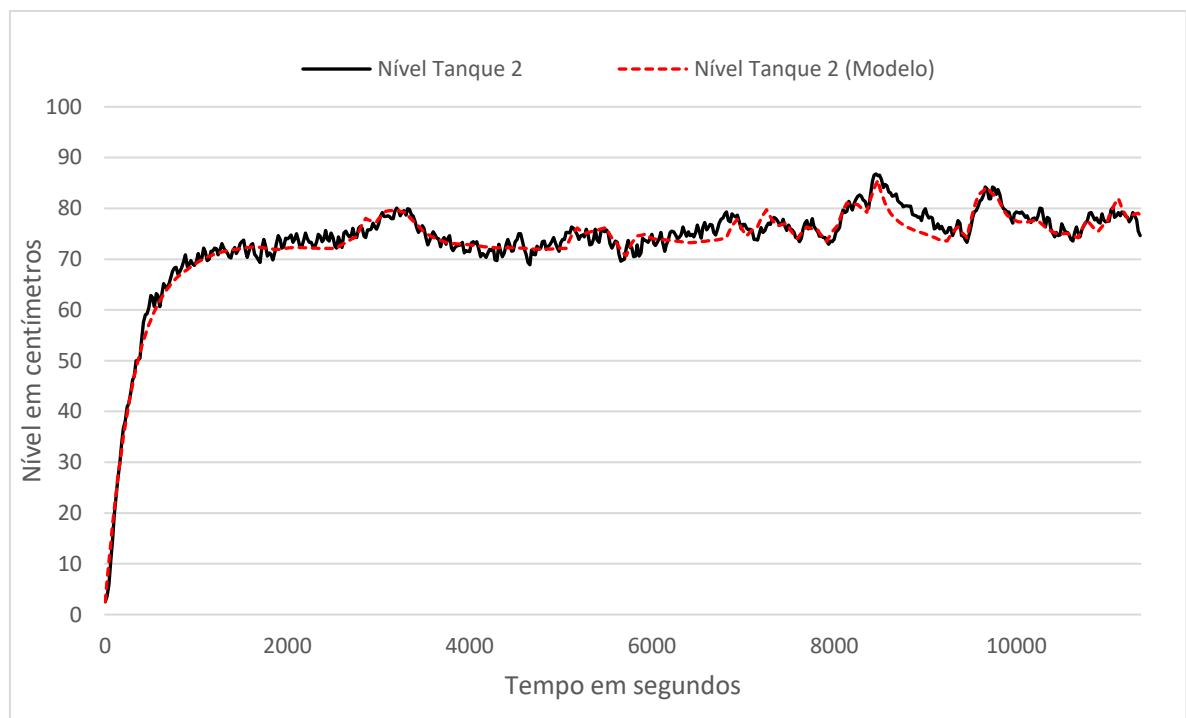
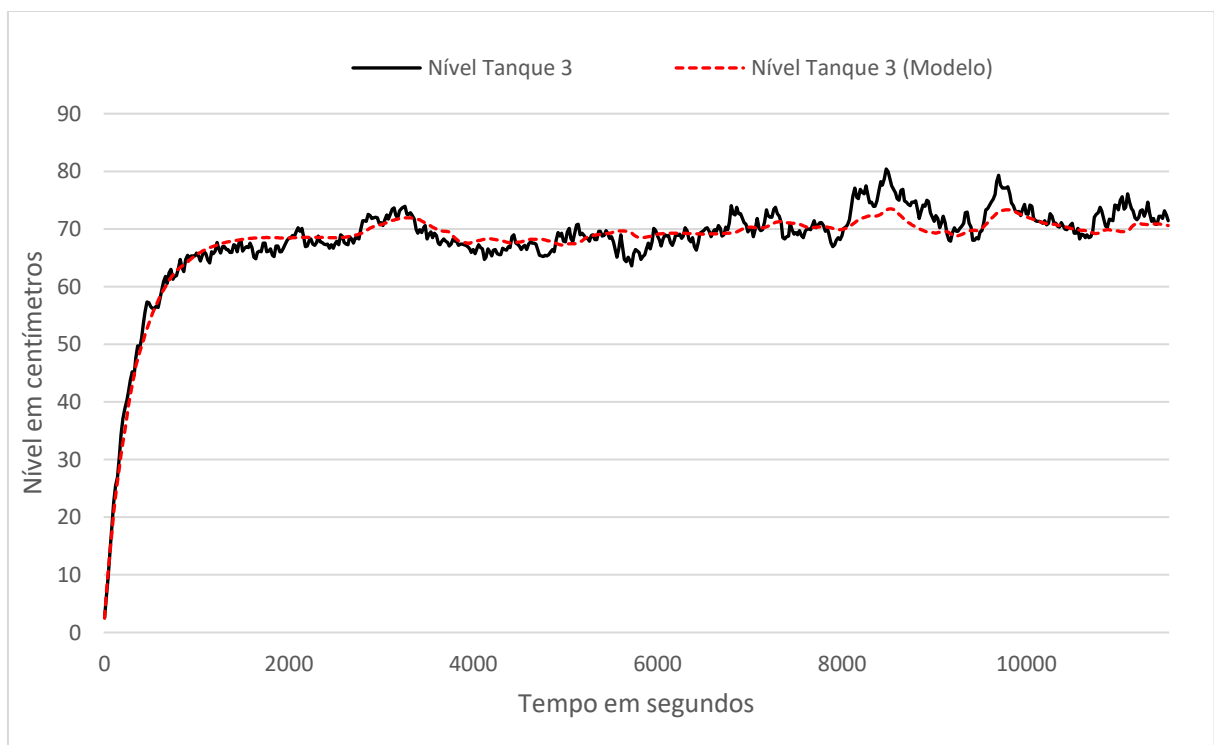


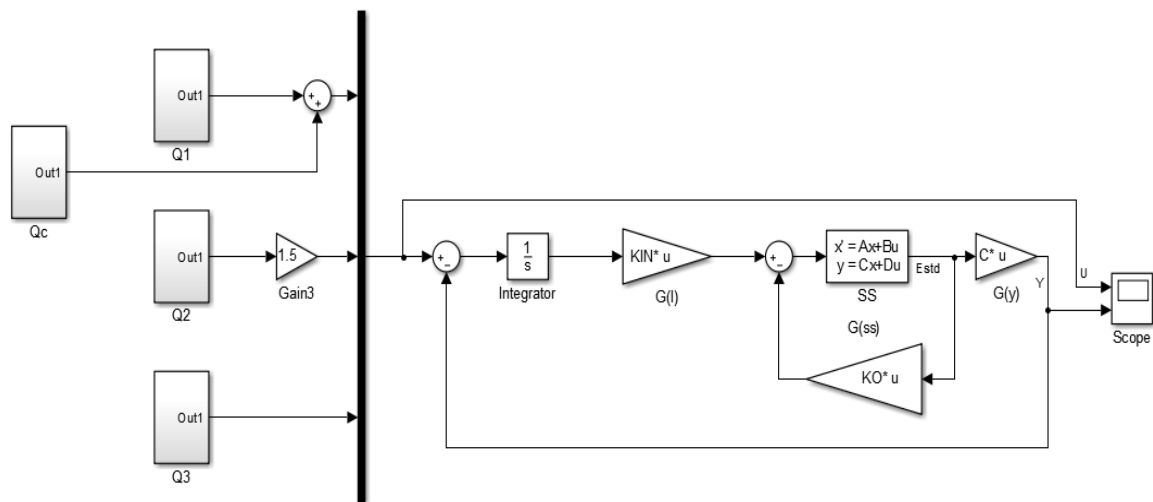
Figura 31 – Resposta do nível do tanque 3 do modelo obtido.



5 Proposta de Controle

Após ter uma identificação do sistema satisfatória, uma proposta de método de controle pode ser aplicada ao sistema identificado. O método escolhido para realizar o controle do sistema é o Regulador Linear Quadrático que se baseia na aplicação realimentação por estados com controladores integradores. Para isso foi construído um código no software MATLAB, indicado no Anexo 01, que retorna a matriz de espaços de estados do sistema construído e calcula todos os ganhos necessários para a construção da malha fechada do sistema indicado na figura 32.

Figura 32 - Sistema com controlador implementado em malha fechada.



Para que fosse possível a implementação do método do regulador linear quadrático no sistema, o mesmo foi modelado para uma representação de matriz de espaço de estados. Para a construção da representação do sistema em matriz de espaço de estados, foi necessário a determinação das matrizes A, B, C e D para a realização do equacionamento matricial. O programa indicado no Anexo 01 foi o responsável por calcular o valor de todos os termos das matrizes do equacionamento, levando em consideração a diferenciação das equações (29), (30) e (31) garantindo os respectivos valores através de fórmulas encontradas nas linhas 29 até 80 do Anexo 01, nos dando como resposta os termos das matrizes A, B, C e D como indicado na figura 33.

O seguinte procedimento mostra o procedimento que o código desenvolvido utilizou para a determinação das matrizes A, B, C e D.

Primeiramente pegou-se as equações diferenciais do sistema nas equações (29), (30) e (31) e também a representação genérica da matriz de espaço de estado para um sistema com três estados e três entradas indicados no equacionamento (33):

$$\tau_1 \frac{dx_1(t)}{dt} = K_1(u_1(t) - 140) + K_2(u_2(t) - 140) + w_1 + (x_2 - 2x_1) \quad (29)$$

$$\tau_2 \frac{dx_2(t)}{dt} = K_3(u_3(t) - 140) + w_2 + (x_1 - 3x_2 + x_3) \quad (30)$$

$$\tau_3 \frac{dx_3(t)}{dt} = K_4(u_3(t) - 140) + w_3 + (x_2 - 2x_3) \quad (31)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (32)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (33)$$

Onde:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & b_{1,3} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & b_{2,3} \\ b_{3,1} & b_{3,2} & b_{3,3} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (39)$$

Onde as matrizes $\mathbf{x}$ e $\mathbf{u}$ são as matrizes que representam os estados e as entradas respectivamente levando em consideração a hipótese $u1 = uc1(t) + u1(t)$, hipótese que pode ser validada pelo fato da entrada que seria um distúrbio ser fixada apenas no tanque 1 durante todo o desenvolvimento do projeto possibilitando essa simplificação. Para simplificação e melhor entendimento dos cálculos as equações (29), (30) e (31) serão chamadas de F1, F2 e F3 respectivamente.

Para encontrarmos os termos da matriz $\mathbf{A}$ e da matriz $\mathbf{B}$ o software desenvolvido realizou o seguinte cálculo de derivadas parciais:

$$a_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \quad (40)$$

$$b_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial u_j} \quad (41)$$

Onde i e j variam de acordo com a linha e coluna, respectivamente, que o parâmetro está na matriz de origem. Após encontrar os parâmetros das matrizes $\mathbf{A}$ (matriz de estados) e $\mathbf{B}$ (matriz de entradas), a matriz $\mathbf{C}$ foi ajustada como uma matriz identidade de três dimensões e a matriz $\mathbf{D}$ (matriz de transmissão direta) foi ajustada como matriz nula, e a partir desse procedimento o *software* desenvolvido gerou as seguintes respostas observadas na figura 33. Possibilitando a montagem da seguinte representação para o sistema em matriz de espaço de estados:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -0,0079 & 0,0039 & 0 \\ 0,0028 & -0,0085 & 0,0028 \\ 0 & 0,0036 & -0,0073 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0,00084 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0013 & 0 \\ 0 & 0 & -0,00026 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (42)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (43)$$

Figura 33 - Determinação das matrizes de espaço de estado.

```
Command Window
>> A

A =

    -0.0079    0.0039         0
     0.0028   -0.0085     0.0028
         0     0.0036   -0.0073

>> B

B =

    0.0008         0         0
         0     0.0014         0
         0         0   -0.0003

>> C

C =

     1     0     0
     0     1     0
     0     0     1

>> D

D =

     0     0     0
     0     0     0
     0     0     0

fx >>
```

script Ln 36 Col 19

A metodologia de controle através da teoria do regulador linear quadrático apresentado, necessita da criação de uma matriz de ajuste de ganhos para os três estados do sistema e também a criação de uma matriz de ganhos para os três integradores de cada estado correspondente. O método construído no diagrama de blocos conta com três ganhos fundamentais para o entendimento da resposta do sinal controlado do sistema que são os termos $G(I)$, $G(ss)$ e $G(y)$ representados na figura 32.

O ganho $G(I)$ foi encontrado e ajustado para modelar a compensação de dados dos integradores para cada estado do sistema, ou seja, é a matriz criada para o ajuste de ganhos dos integradores, $G(ss)$ é o compensador para a realimentação dos estados, ou seja, como dito anteriormente o ganho $G(ss)$ é a matriz de ajuste de ganhos de cada estado e por fim o ganho $G(y)$ foi inserido na modelagem de blocos para que possam ser vistos os estados do sistema na resposta. Os ganhos $G(ss)$ e $G(I)$, explicados anteriormente, são matrizes com três linhas e três colunas da seguinte forma.

$$G(I) = \begin{bmatrix} 9,9986 & -0,1173 & -0,0156 \\ 0,1660 & 7,0527 & 1,5674 \\ 0,0047 & 0,4957 & -22,3057 \end{bmatrix}$$

$$G(ss) = \begin{bmatrix} 148,0383 & 2,6433 & -0,3065 \\ 4,3164 & 100,6125 & 26,2612 \\ 0,0940 & -4,9328 & -387,2214 \end{bmatrix}$$

A aplicação dessa proposta de controle foi realizada sobre o modelo determinado o capítulo 4 levando em consideração os ajustes de parâmetros da tabela 3 inseridos nas equações (29), (30) e (31), no capítulo 7 serão apresentados os resultados obtidos através da implementação matemática do modelo proposto em malha fechada com o sistema, gerando uma análise de dados.

6 Componentes e custos para a construção da estrutura do projeto.

Para que um sistema de controle seja executado é necessário a utilização de determinadas ferramentas e componentes que são facilitadores ou até mesmo essenciais para o funcionamento do projeto. Para o manuseio dos mesmos foi necessário utilizar todo o conhecimento adquirido durante as aulas, seminários e projetos desenvolvidos durante a graduação do curso de controle e automação.

Para o desenvolvimento da interface que monitora em tempo real o funcionamento da planta e os dados enviados e recebidos através da placa Arduino, foi escolhido o ambiente *Simulink* do *software MatLab*, pois além de ser um sistema altamente intuitivo para a realização da comunicação com a plataforma Arduino, oferece uma licença gratuita para estudantes possibilitando e facilitando a execução e desenvolvimento do sistema de monitoramento.

Este capítulo apresenta um detalhamento completo, através de tabelas, dos gastos financeiros para a construção estrutural do projeto, pois além do objetivo de realizar uma proposta de controle para a planta, é também de interesse do projeto a construção da mesma com um baixo custo e com uma estrutura flexível.

Será descrito de forma geral os componentes que compõem a planta construída, bem como suas funções para o funcionamento ideal do processo de controle. As tabelas 4 e 5 mostram os gastos consolidados ao fim da construção ao todo do projeto, os gastos detalhados com o projeto nos meses de fevereiro, março e abril.

O fluxo de gastos é controlado com o intuito de gerar comparações ao final do projeto, entre possibilidades de plantas já prontas que podem ser compradas por fornecedores externos e uma planta construída como parte de um projeto, gerando uma economia de investimento enorme e possibilitando em alguns casos uma variedade de aplicações muito maior para os estudantes.

Tabela 4 - Tabela com os gastos consolidados para a construção do projeto

Mês	Gastos
Fevereiro	R\$ 1.038,53
Março	R\$ 969,22
Abril	R\$ 744,69
Soma	R\$ 2.752,44

Tabela 5 - Tabela com os gastos detalhados para a construção do projeto.

Item	Gasto	Nº de peças	Preço Unitário	Descrição do componente
1	R\$ 132,20	10	R\$ 13,22	Medidor de vazão de efeito Hall (0,3-6L/min), rosca G1/4
2	R\$ 5,71	1	R\$ 5,71	Custo de envio (Frete China)
3	R\$ 417,60	4	R\$ 104,40	Sensor de pressão 4-20mA, aço inoxidável 316L
4	R\$ 55,30	1	R\$ 55,30	Custo de envio (Frete China)
5	R\$ 2,32	1	R\$ 2,32	IOF sobre a compra Aliexpress
6	R\$ 39,80	2	R\$ 19,90	Motor Shield Arduino L293D Driver Ponte H
7	R\$ 199,00	5	R\$ 39,80	Mini Bomba de Água para Arduino RS-385 - Alto Fluxo
8	R\$ 76,90	1	R\$ 76,90	Board Arduino Mega 2560 R3 + Cabo USB
9	R\$ 19,90	1	R\$ 19,90	Case para Arduino Mega com Parafusos em Acrílico Transparente
10	R\$ 47,90	1	R\$ 47,90	Board Arduino Uno R3 + Cabo USB
11	R\$ 14,90	1	R\$ 14,90	Case para Arduino Uno com Parafusos em Acrílico Transparente
12	R\$ 104,00	13	R\$ 8,00	Espigão Inox macho BSP 1/4 x 1/4
13	R\$ 40,50	9	R\$ 4,50	Niple Inox 304 BSP/NPT - 1/4
14	R\$ 25,20	4	R\$ 6,30	Conector Inst. Reto 1/4 x 12 mm
15	R\$ 16,25	2,5	R\$ 6,50	Tubo Pun Azul 12 x 8 mm
16	R\$ 18,00	2	R\$ 9,00	Conector Inst. Cotov. Macho 90 1/4 x 12 mm
17	R\$ 21,00	3	R\$ 7,00	Cotovelo Inox 150LBS 304 90 - 1/4 BSP
18	R\$ 19,60	2	R\$ 9,80	Tee Inox 150LBS rosca BSP/NPT - 1/4
19	R\$ 6,50	1	R\$ 6,50	Cotovelo Inox 150 LBS 304 90 - 1/4 BSP
20	R\$ 12,90	3	R\$ 4,30	Niple Inox 304 BSP/NPT - 1/4
21	R\$ 7,20	1	R\$ 7,20	Espigão Inox macho BSP - 1/4 x 1/4
22	R\$ 17,00	2	R\$ 8,50	Conector Inst. Cotov. Macho 90 1/4 x 12 mm
23	R\$ 10,00	2	R\$ 5,00	Niple Inox 304 BSP/NPT - 1/4
24	R\$ 32,00	4	R\$ 8,00	Espigão Inox macho BSP - 1/4 x 1/4
25	R\$ 70,90	1	R\$ 70,90	Caixa de Passagem 300 x 220 x 120 transparente
26	R\$ 12,29	1	R\$ 12,29	Abraçadeira plástica T30R Natural 150X3 6 mm Hell
27	R\$ 15,49	1	R\$ 15,49	Abraçadeira plástica T50R Natural 20043 6 mm Hell
28	R\$ 62,36	4	R\$ 15,59	Rodízio Gel c/ freio 50 mm
29	R\$ 44,21	2	R\$ 22,11	Ventilador 12V 60x60x45 mm rol/nylon
30	R\$ 13,20	6	R\$ 2,20	Conector KRE 3V passo 5mm VD/AZ F1650+C
31	R\$ 42,00	6	R\$ 7,00	Tubo Silicone Transparente 8 x 4 mm
32	R\$ 36,00	4	R\$ 9,00	Tubo Silicone Transparente 9 x 5 mm
33	R\$ 36,90	1	R\$ 36,90	Registro de pressão Base REGI PRES 20mm FABRIMA
34	R\$ 1,86	1	R\$ 1,86	Prensa cabo CZ PVC 1/2 BSP
35	R\$ 1,71	1	R\$ 1,71	Prensa cabo CZ PVC 3/8 BSP
36	R\$ 2,80	1	R\$ 2,80	Terminal Pre-Isol TP 22 4 INTELLI
37	R\$ 2,80	1	R\$ 2,80	Terminal Pre-Isol TPF 22 4 1,5-2,5
38	R\$ 2,80	1	R\$ 2,80	Terminal Pre-Isol TPF 21 4 0,5-1,5
39	R\$ 2,80	1	R\$ 2,80	Terminal Pre-Isol TP 22 4 INTELLI
40	R\$ 10,80	2	R\$ 5,40	Terminal Pre-Isol FET 22-6-903 INTELLI
41	R\$ 4,43	7	R\$ 0,63	Fio p/ som bicolor 2x 0,75mm "B" 18 Mega
42	R\$ 7,33	15	R\$ 0,49	Cabo flexível 1 mm 750V COR/MEG/BR
43	R\$ 9,24	3	R\$ 3,08	Cabo Manga 8x26AWG ET Preto c/ malha
44	R\$ 9,81	3	R\$ 3,27	Cabo Manga 6x26AWGBT B9 c/ malha
45	R\$ 2,20	1	R\$ 2,20	Espaguete termoretrátil 1,6 mm
46	R\$ 2,50	1	R\$ 2,50	Espaguete termoretrátil 2,4 mm
47	R\$ 9,00	1	R\$ 9,00	Terminal de Encaixe DSC-01
48	R\$ 11,11	5	R\$ 2,22	Fita espiral 1/2 F7112PE Frontec
49	R\$ 293,68	10	R\$ 29,37	Válvula Solenoide para Água 220V 180° (¼ x ¼) VA 06
50	R\$ 92,88	2	R\$ 46,44	Arduino Modulo Relé 8 Canais 5v Relay
51	R\$ 103,37	1	R\$ 103,37	Chapa acrílico cristal (PMMA) - 5 mm x 500 mm x 1.000 mm
52	R\$ 70,45	1	R\$ 70,45	Tubo acrílico cristal (PMMA) - 50 mm (DE) x 46 (DI) x 1.000 mm
53	R\$ 68,14	1	R\$ 68,14	Tubo acrílico cristal (PMMA) - 70 mm (DE) x 64 (DI) x 1.000 mm
54	R\$ 146,10	1	R\$ 146,10	Tubo acrílico cristal (PMMA) - 100 mm (DE) x 94 (DI) x 1.000 mm
55	R\$ 119,60	1	R\$ 119,60	Conversor De 4 A 20ma Para 0 A 5v Conv. Corrente/Tensão
Total	R\$ 2.650,44			

7 Resultados

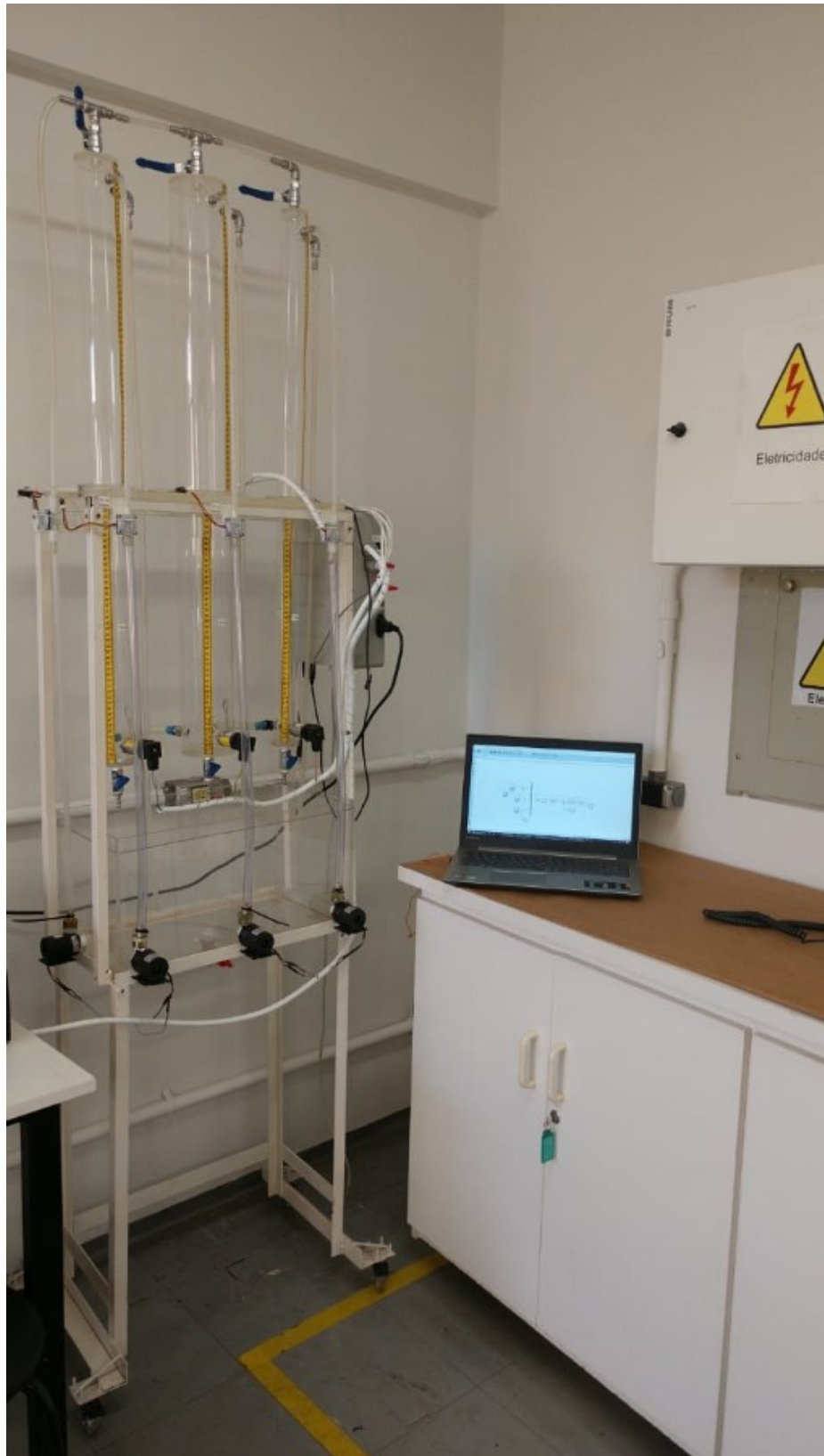
7.1 Construção da planta

A construção física final da planta está representada na figura 34 com todos os periféricos funcionando bem como os elementos do painel elétrico descritos na seção 3. A planta de 3 tanques acoplados está disponível para estudos e testes experimentais nos laboratórios da faculdade de Engenharia Química.

A planta de nível conta com um suporte metálico para a sustentação da mesma, tubulações de mangueira de poliuretano para estabelecer a comunicação entre os tanques e também entre os recipientes e as minibombas e uma fita métrica em cada tanque para facilitar a visibilidade do nível durante os experimentos bem como auxiliar nos processos de calibração e instrumentação da planta.

As maiores dificuldades, já resolvidas, encontradas durante os experimentos no sistema foram os vazamentos de água encontrados no recipiente de armazenamento dos tanques, a organização dos componentes dentro do painel elétrico para evitar a possibilidade de curto circuito no sistema durante a realização dos experimentos e a quantidade de interferências e ruídos apresentados pelo sistema devido a velocidade da coleta de dados dos periféricos do sistema.

Figura 34 - Planta didática construída.



7.2 Modelo matemático

Através do procedimento experimental e estatístico visto no capítulo 4, foi possível a determinação do modelo matemático que represente o sistema construído. Após a obtenção do modelo matemático, foi construída as curvas que representam o erro existente entre o modelo encontrado com as coletas em tempo real do sistema e o modelo aproximado gerado através do método de ajuste de parâmetros, ou seja, os gráficos apresentados nas figuras 35, 36 e 37 representam a subtração dos valores dos dados coletados e do modelo proposto.

Figura 35 - Erro de modelagem para o tanque 1.

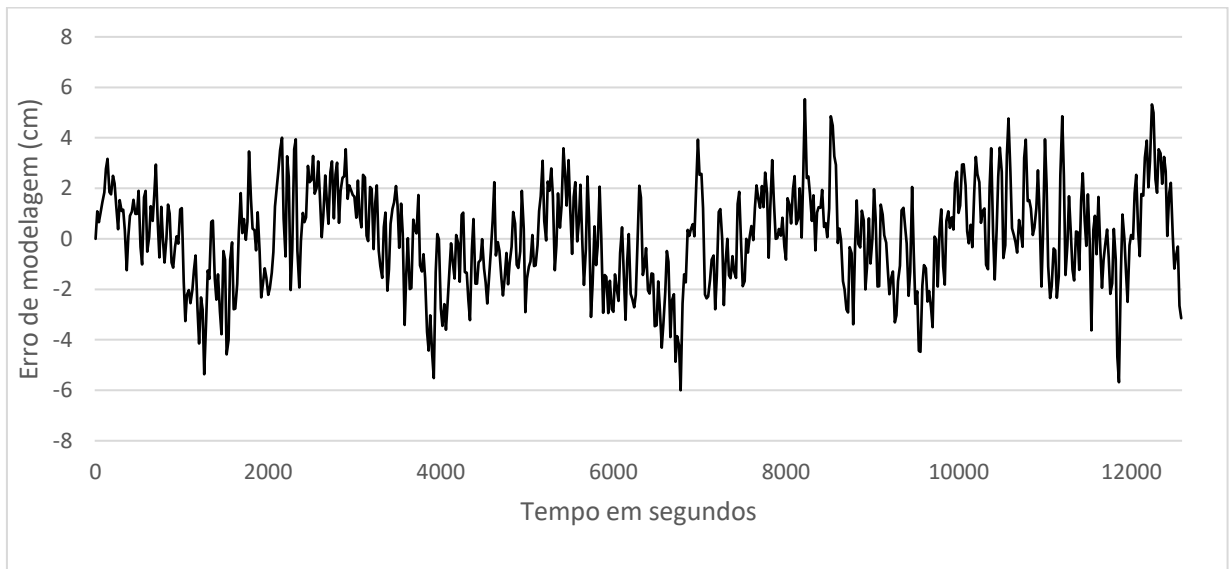


Figura 36 - Erro de modelagem para o tanque 2.

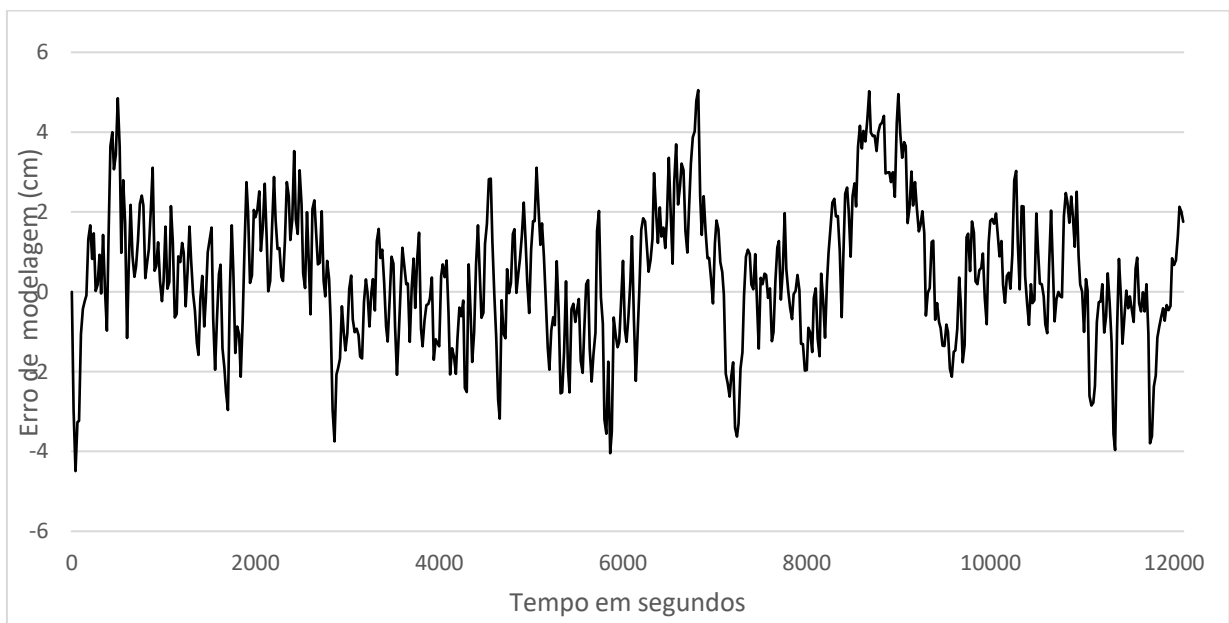
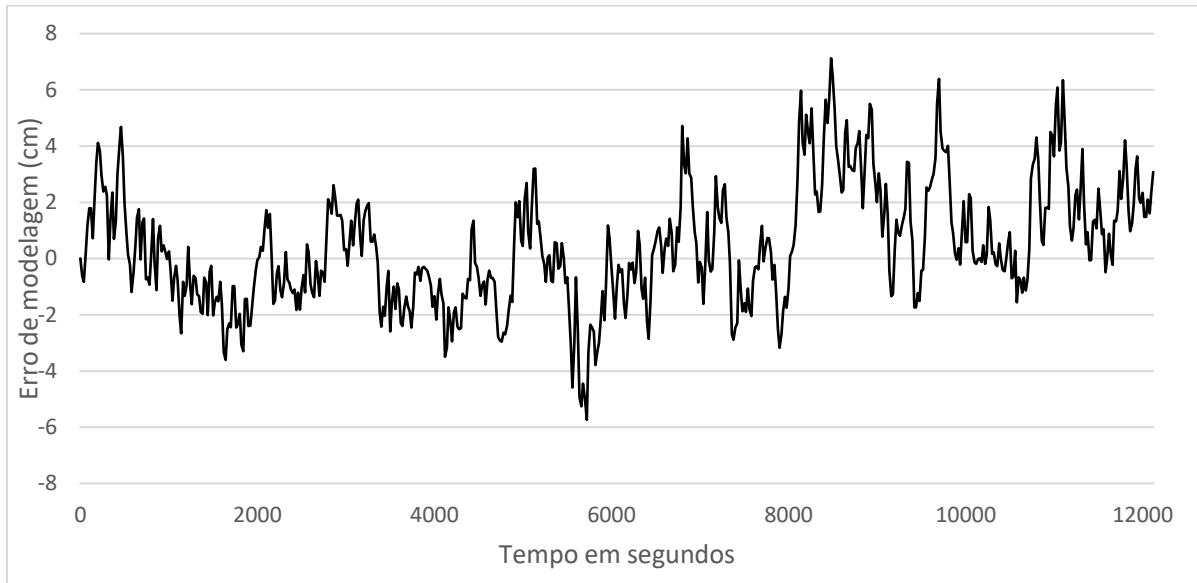


Figura 37 – Erro de modelagem para o tanque 3.



As curvas representadas nas figuras 35, 36 e 37 tem a finalidade de mostrar o erro de modelagem para os tanques 1, 2 e 3 respectivamente. O erro médio para a curva de cada tanque ficou limitado entre 0% e 8% para o pareto entre o modelo experimental e o teórico, valor que pode ser uma oportunidade de melhoria para projetos futuros, porém mesmo com o erro na faixa encontrada o sistema pode ser controlado de forma satisfatória devido ao fato de ser um sistema que não depende de respostas rápidas e com precisão muito elevada.

7.3 Resultados obtidos da proposta de controle

Após determinar todos os parâmetros e ganhos necessários para aplicar o método da proposta de controle escolhida para o sistema, foram gerados os resultados para a aplicação da proposta de controlador no sistema em malha fechada.

Figura 38 - Resposta em malha fechada do sistema para o tanque 1.

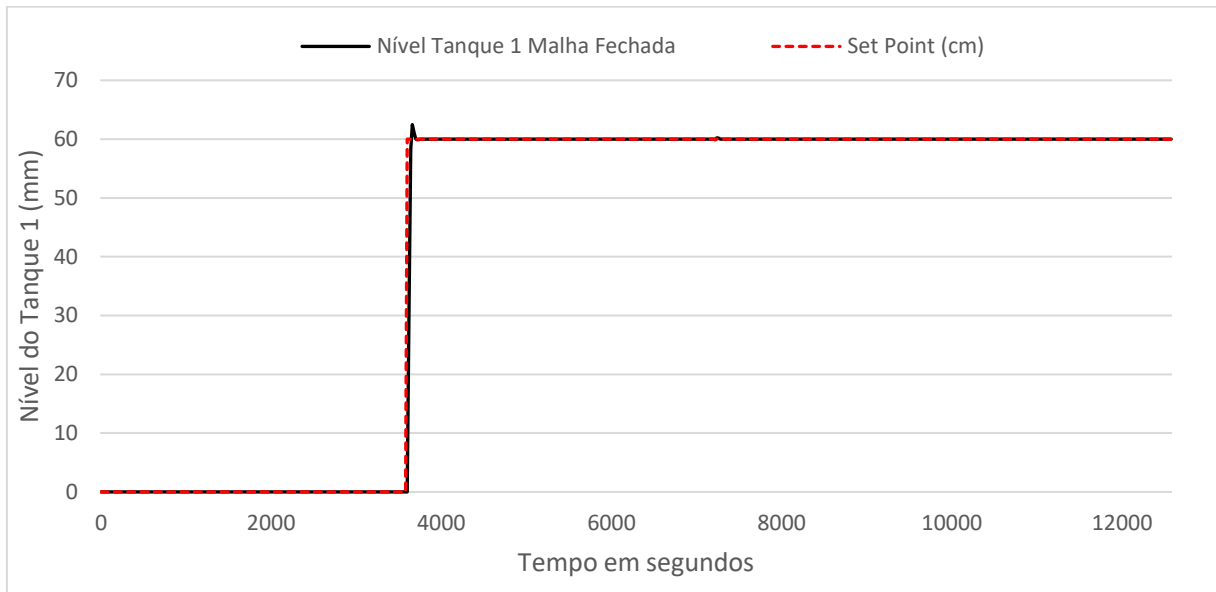


Figura 39 - Resposta em malha fechada do sistema para o tanque 2.

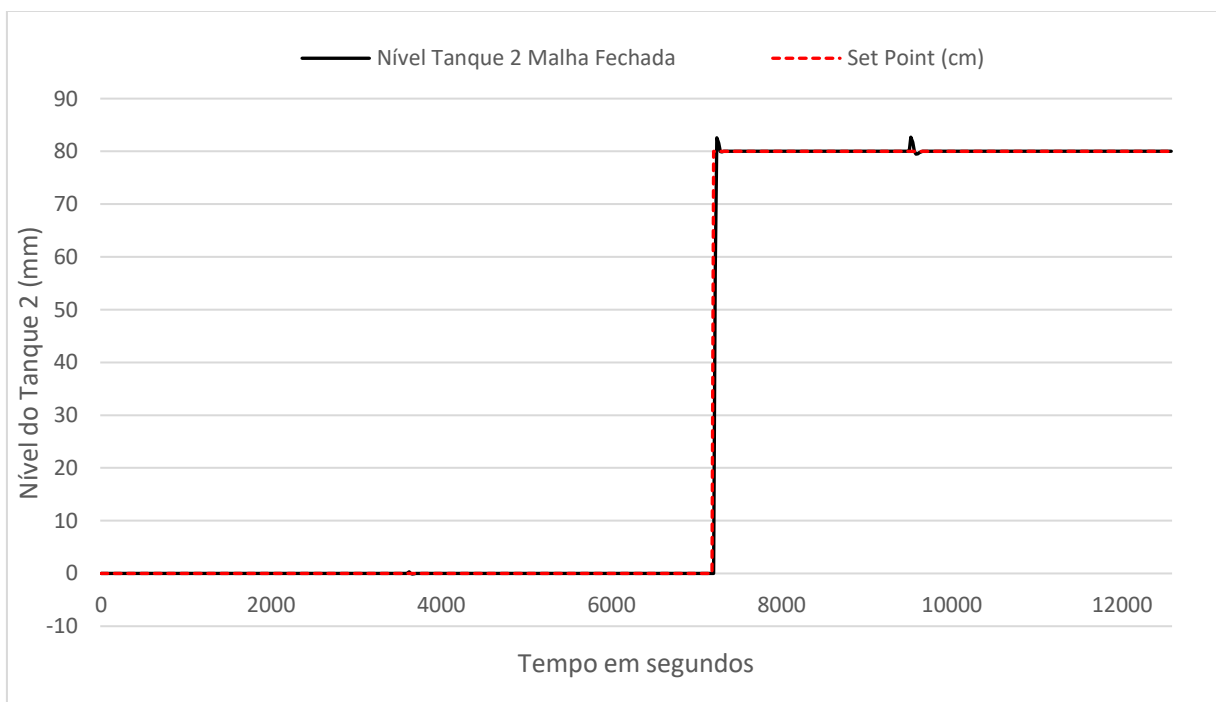
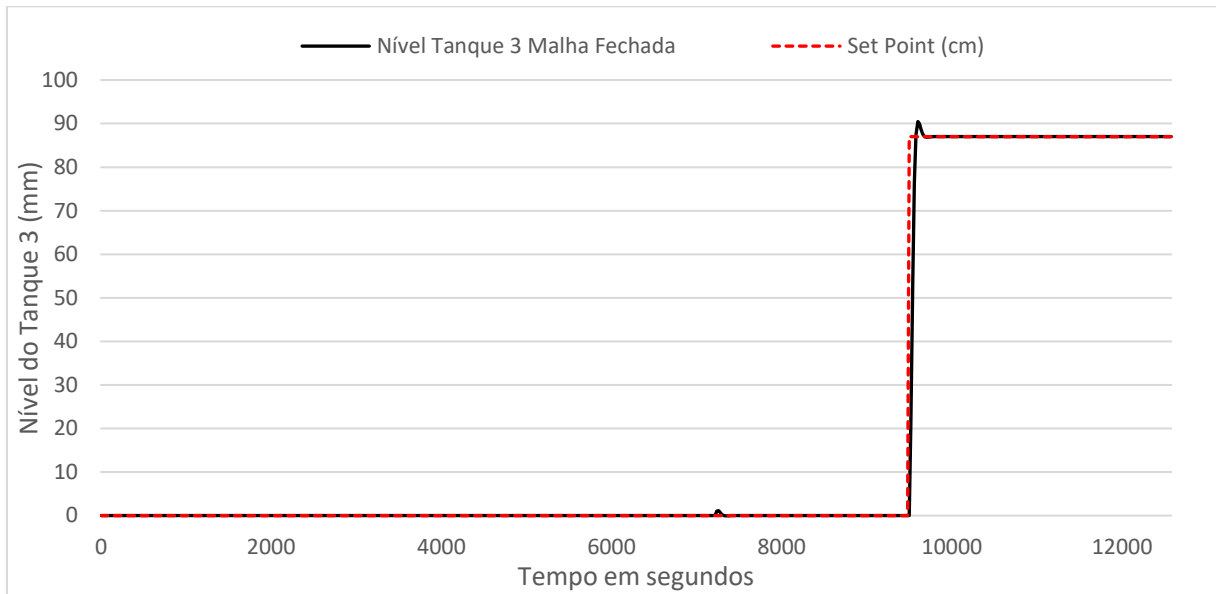


Figura 40 - Resposta em malha fechada do sistema para o tanque 3.



O método de controle RLQ foi utilizado pelo fato de garantir a estabilidade do sistema através do ajuste de ganhos e observa-se nas figuras 38, 39 e 40 que quando aplicado ao modelo encontrado no capítulo 4 possui respostas muito satisfatórias ao sistema, mesmo um sistema de tanques não necessitando de respostas rápidas e imediatas, a proposta de controle aplicada ao sistema garantiu uma resposta adequada e funcional. Além dos gráficos dos estados de níveis controlados em malha fechada foram obtidos também os polos do sistema através do algoritmo desenvolvido indicado no Anexo 01:

$$p_{1,2} = -0,0728 \pm 0,0665i$$

$$p_{3,4} = -0,0666 \pm 0,0634i$$

$$p_{5,6} = -0,0545 \pm 0,0533i$$

O fato de todos os polos estarem situados no semiplano da esquerda é mais um resultado satisfatório para a proposta que reflete uma característica de estabilidade no sistema.

8 Conclusão

Neste projeto foi descrito um processo de automação na planta didática construída desde sua construção física, solução de problemas físicos e ruídos encontrados, identificação de sistemas e proposta de um controle satisfatório para o processo construído ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

O sistema físico foi construído cumprindo o planejamento de objetivos do projeto, a planta está em seu pleno funcionamento e os maiores problemas enfrentados durante a realização do projeto foram a presença de vazamentos nos reservatórios, ruídos e oscilações devido ao alinhamento dos tanques. Todos os problemas foram resolvidos durante o desenvolver da proposta através de pequenos ajustes sendo de fundamental importância para o desenvolver do projeto, pois problemas estruturais reduzem de forma significativa a confiabilidade dos dados.

As curvas de calibração construídas através de dados experimentais no transmissor de pressão tiveram resultados validados muito satisfatórios com o coeficiente de correlação igual a 1, ou seja, a curva construída segue fielmente o comportamento dos dados em tempo real. Além da calibração da curva foi equacionado um filtro digital apresentado na seção 4.2.1 para realizar um condicionamento da coleta de dados, porém devido a quantidade de ruídos oriundos da taxa de transferência entre o Arduino e MATLAB a coleta de dados, mesmo condicionada com o filtro, apresentou características ruidosas em determinados pontos.

A identificação do sistema foi realizada a partir dos ajustes de parâmetros pelo método da minimização dos erros entre os dados experimentais e a proposta estabelecida pelo algoritmo. Para a proposta de controle apresentada o modelo matemático encontrado foi satisfatório levando em consideração a análise feita dos gráficos de erros gerados na seção 7.2 e nas análises comparativas do modelo nos gráficos das figuras 29, 30 e 31, porém para projetos futuros a identificação deve ser melhorada na questão de redução de ruídos na exportação de dados entre o software MATLAB e a placa Arduino Mega.

O controle proposto pelo método do regulador linear quadrático, apresentado no capítulo 5, atendeu de forma satisfatória o objetivo proposto pelo projeto, para projetos futuros o sistema irá necessitar de uma proposta de controladores intercalando a estrutura do sistema em relação a entrada de carga (Q_c), ou seja, considerar ela não somente no tanque 1, mas elaborar uma proposta de controle que se adapte para qualquer configuração do sistema.

9 Trabalhos futuros

Após a finalização desse projeto, observou-se que é de extrema importância a continuidade do trabalho com a finalidade de refinar a identificação do sistema e sugerir novas propostas de controle para comparativos as mesmas. Além de condicionar e reforçar a parte estrutural do sistema físico e desenvolver uma interface de comunicação entre o usuário e a planta que seja mais interativa.

Para trabalhos futuros pode-se desenvolver propostas de controle que utilizem, além das leituras de pressão, as leituras dos sensores de vazão colocados com a intenção de ter mais dados a serem tratados e coletados e com isso gerando uma maior confiabilidade do sistema decorrente do cruzamento dos dados adquiridos.

10 Referências

- [1] SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. Process dynamics and control. 2^a ed., New York, John Wiley & Sons, 2004.
- [2] HALLIDAY, D. E RESNICK, R. Fundamentos de Física, volume 2. Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, RJ, 2a. edição, 1991.
- [3] MURRIL, P.W Fundamentals of Process Control Theory, Instrument Society of América, 2a. ed., 1991.
- [4] DESBOROUGH, L.; NORDH, P.; MILLER, R. Control system - process out of control. Industrial Computing, p. 5255, August 2001.
- [5] BARBOSA, N. A. Implementação e Controle de Uma Planta Didática Multivariável com Tanques Acoplados. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.
- [6] ALAVI, S. M. M.; HAYES, M. J. Quantitative feedback design for a benchmark quadruple-tank process. IEEE Computer Society, 2006.
- [7] FONSECA, D. G. V. Modelagem e Controle Adaptativo de uma Planta Didática de Nível com Instrumentação Industrial. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- [8] JOHANSSON, K. H. The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero. IEEE Transactions on Control Systems Technology, v. 8, n. 3.
- [9] ROSINOVA, D.; KOZÁKOVÁ, A. Decentralized robust control of mimo systems: Quadruple tank case study. In: Advances in Control Education. [S.l.: s.n.], 2012. v. 9, n. 1.
- [10] ROINILA, T.; JAATINEM, A.; K.VILKKO, M. Corrected mathematical model of quadruple tank process. In: PROCEEDINGS OF THE 17TH IFAC WORLD CONGRESS. COEX, Korea, South: International Federation of Automatic Control, 2008.
- [11] RUSLI, E.; ANG, S.; BRAATZ, R. D. A quadruple-tank process control experiment. Chemical Engineering Education, v. 38, n. 3.

Anexo 01

```

clc;
clear;
format short;
s=tf('s');

%-----

%paremetros

K2=0.1765;
K1=0.038;
K3=0.4884;
K4=-0.0714;
Tau1= 253.97;
Tau2= 354.124;
Tau3= 275.6135;
w1=75.63;
w2=56.50;
w3=66.89;
%-----

%Equações diferencias

syms x1 x2 x3 u1 u2 u3 u4;

f_x1 = ((K1+K2)*(u1-280)+w1-2*x1+x2)/Tau1;
f_x2 = (K3*(u2-140)+w2+x1+x3-3*x2)/Tau2;
f_x3 = (K4*(u3-140)+w3+x2-2*x3)/Tau3;

```

%Matriz A

a11=diff(f_x1,x1);

a12=diff(f_x1,x2);

a13=diff(f_x1,x3);

% a14=diff(f_x1,x4);

a21=diff(f_x2,x1);

a22=diff(f_x2,x2);

a23=diff(f_x2,x3);

% a24=diff(f_x2,x4);

a31=diff(f_x3,x1);

a32=diff(f_x3,x2);

a33=diff(f_x3,x3);

% a34=diff(f_x3,x4);

%Matriz B

b11=diff(f_x1,u1);

b12=diff(f_x1,u2);

b13=diff(f_x1,u3);

b21=diff(f_x2,u1);

b22=diff(f_x2,u2);

b23=diff(f_x2,u3);

b31=diff(f_x3,u1);

```
b32=diff(f_x3,u2);
```

```
b33=diff(f_x3,u3);
```

```
C=eye(3);
```

```
D=zeros(3,3);
```

```
%-----
```

```
A = [ a11 a12 a13
      a21 a22 a23
      a31 a32 a33 ];
```

```
A = subs(A);
```

```
A = vpa(A,5);
```

```
A = double(A);
```

```
B = [ b11 b12 b13
      b21 b22 b23
      b31 b32 b33 ];
```

```
B = subs(B);
```

```
B = vpa(B,5);
```

```
B = double(B);
```

```
%-----
```

```
%Espaço de estado
```

```
Sys=ss(A,B,C,D);
```

```
GB=tf(Sys);
```

```
A=Sys.A;
```

```
B=Sys.B;
```

```

C=Sys.C;
D=Sys.D;
GB=zpk(GB);
% GB=minreal(GB,0.1);
G=dcgain(GB);
G1=GB(1,1);
G2=GB(2,2);
G3=GB(3,3);
rga=G.*inv(G');
%-----
% LQR+Integradores

intr=3; %numero de integradores
entradas=3;
Estados=[ 50; 100 ; 100; %integradores
100;
1000;
1000];

[LC,CC]=size(C);

Ro=1;% ganho da matriz identidade RI
QI=[ Estados(1),0,0,0,0,0;
o,Estados(2),0,0,0,0;
o,o,Estados(3),0,0,0;
o,o,o,Estados(4),0,0;
o,o,o,o,Estados(5),0;
o,o,o,o,o,Estados(6)];

```

```
%QI= eye(6); % estados do sistema
```

```
RI=Ro*[ 1 0 0 ;
```

```
0 1 0 ;
```

```
0 0 1 ];
```

```
AL=[ zeros(intr) C;
```

```
zeros(3,3) A];
```

```
BL=[ zeros(intr);B];
```

```
[ KI, SI , EI]=lqr(AL,BL,QI, RI);
```

```
KIN=KI(:,1:3);
```

```
KO=KI(:,4:6);
```

Anexo 02

```

clc
close all
clear all
load corrida_final.txt -ascii;
dataexp = corrida_final;
global Y X time u K1 K2 K3 K4 Tau1 Tau2 Tau3 w1 w2 w3
t = dataexp(:,1);
Q1 = dataexp(:,2);
Q2 = dataexp(:,3);
Q3 = dataexp(:,4);
Qc = dataexp(:,5);
h1 = dataexp(:,6);
h2 = dataexp(:,7);
h3 = dataexp(:,8);
N = length(t);
Y = [h1 h2 h3];
X = [Q1 Q2 Q3 Qc];
time= t-t(1);
%x0=[0.1856793;0.1856793;0.31829675;0.25485205;101.263157;206.68421;51.6578
9;-15.3523;-7.5642;-4.35024];
x0=[9.7552;-11.4100;0.0405;-
0.2619;134.8767;188.9776;174.9272;578.3818;354.0674;437.5498];
options=optimset('TolFun',1e-06,'TolX',1e-06,'TolPCG',1e-
04,'Display','iter','MaxFunEvals',10000,'MaxIter',500,'Algorithm','levenberg-
marquardt');
x=lsqnonlin('fun',x0,[],[],options);
K1=x(1);
K2=x(2);
K3=x(3);
K4=x(4);
Tau1=x(5);
Tau2=x(6);
Tau3=x(7);
w1=x(8);
w2=x(9);
w3=x(10);
yhat=zeros(N,3);
yhat(1,1:3)=Y(1,1:3);
u=X(1,:);
for i=1:N-1,
    to=time(i);
    tf=time(i+1);
    Yo = yhat(i,1:3)';
    [t,y]=ode15s('order_1',[to tf],Yo);
    n=length(t);
    u=X(i+1,:);
    yhat(i+1,1:3)=y(n,1:3);

```

```
end
F=[Y(:,1)-yhat(:,1);Y(:,2)-yhat(:,2);Y(:,3)-yhat(:,3)];
subplot(3,2,1)
plot(time,Y(:,1),'.',time,yhat(:,1),'-');grid;
subplot(3,2,2)
plot(time,X(:,1));grid;
subplot(3,2,3)
plot(time,Y(:,2),'.',time,yhat(:,2),'-');grid;
subplot(3,2,4)
plot(time,X(:,2));grid;
subplot(3,2,5)
plot(time,Y(:,3),'.',time,yhat(:,3),'-');grid;
subplot(3,2,6)
plot(time,X(:,3));grid;
```

Anexo 03

```

function F=fun(x)
global Y X time u K1 K2 K3 K4 Tau1 Tau2 Tau3 w1 w2 w3
K1=x(1);
K2=x(2);
K3=x(3);
K4=x(4);
Tau1=x(5);
Tau2=x(6);
Tau3=x(7);
w1=x(8);
w2=x(9);
w3=x(10);
N=length(time);
yhat=zeros(N,3);
yhat(1,1:3)=Y(1,1:3);
u=X(1,:);
for i=1:N-1,
    to=time(i);
    tf=time(i+1);
    Yo = yhat(i,1:3)';
    [t,y]=ode15s('order_1',[to tf],Yo);
    n=length(t);
    u=X(i+1,:);
    yhat(i+1,1:3)=y(n,1:3);
end
F=[Y(:,1)-yhat(:,1);Y(:,2)-yhat(:,2);Y(:,3)-yhat(:,3)];
subplot(3,2,1)
plot(time,Y(:,1),'',time,yhat(:,1),'-');grid;
subplot(3,2,2)
plot(time,X(:,1));grid;
subplot(3,2,3)
plot(time,Y(:,2),'',time,yhat(:,2),'-');grid;
subplot(3,2,4)
plot(time,X(:,2));grid;
subplot(3,2,5)
plot(time,Y(:,3),'',time,yhat(:,3),'-');grid;
subplot(3,2,6)
plot(time,X(:,3));grid;
pause(1);

function F=order_1(t,y)
global u K1 K2 K3 K4 Tau1 Tau2 Tau3 w1 w2 w3
F(1,1) = ((K1+K2)*(u(1)+u(2)-280)+w1-2*y(1)+y(2))/Tau1;
F(2,1) = (K3*(u(3)-140)+w2+y(1)+y(3)-3*y(2))/Tau2;
F(3,1) = (K4*(u(4)-140)+w3+y(2)-2*y(3))/Tau3;

```