

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico de Ciências Exatas e Educação  
Departamento de Engenharia de  
Controle, Automação e Computação



Guilherme Adami Geske

Implementação de uma Bancada Experimental de um Sistema  
de Dois Tanques

Blumenau

2022

**Guilherme Adami Geske**

# **Implementação de uma Bancada Experimental de um Sistema de Dois Tanques**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação.  
Orientador: Prof. Dr. Daniel Martins Lima

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico de Ciências Exatas e Educação  
Departamento de Engenharia de  
Controle, Automação e Computação

Blumenau  
2022

Guilherme Adami Geske

# Implementação de uma Bancada Experimental de um Sistema de Dois Tanques

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

**Comissão Examinadora**

---

Prof. Dr. Daniel Martins Lima  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Orientador

---

Prof. Dr. Ebrahim Samer El Youssef  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Luiz Antônio Maccari Jr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 30 de março de 2022

Dedico este trabalho aos meus pais. Esta monografia é a prova de que todo seu investimento e dedicação valeram a pena.

# Agradecimentos

Agradeço imensamente meus pais Claudio e Leda, e meu irmão Enrique pelo suporte em meus estudos, me permitindo chegar até aqui.

Aos meus amigos e colegas pelos momentos de convivência e distração nas épocas tranquilas e conturbadas da faculdade, especialmente ao Allan, que esteve comigo desde o início.

E ao professor Daniel pelos ensinamentos dentro e fora da sala de aula e pela orientação e paciência no desenvolvimento deste trabalho

*"Always place your becoming above your current being."*  
(Jordan B. Peterson)

# Resumo

Neste trabalho é realizada a construção e testes de uma bancada experimental desenvolvida para experimentos práticos na disciplina de Sistemas de Controle do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina. A bancada consiste em um sistema de controle de nível de dois tanques, sendo um deles de dinâmica não linear. A fim de demonstrar o efeito de atrasos de transporte no controle de sistemas, atrasos artificiais foram inseridos no sistema e, para lidar com os mesmos, um preditor de Smith foi adicionado à estrutura de controle. A lógica de controle do sistema foi programada utilizando o software *Labview*, assim como sua interface de usuário. Para validar a estrutura de controle criada e a possibilidade do uso da bancada em experimentos didáticos, testes em malha fechada foram feitos, com objetivo de controlar o nível do tanque e rejeitar perturbações inseridas, além de lidar com os atrasos no sistema. Os resultados obtidos indicam que a estrutura de controle desenvolvida é capaz de controlar o sistema, mostram os grandes efeitos dos atrasos no sistema e a efetividade do preditor de Smith em lidar com os mesmos.

**Palavras-Chave:** 1. Controle. 2. Tanque Não-Linear. 3. Preditor de Smith. 4. Bancada Experimental.

# Abstract

In this study, the construction and testing of an experimental bench developed for practical experiments in the course of Control Systems of the Control and Automation Engineering Course of the Federal University of Santa Catarina is carried out. The bench consists of a level control system of two tanks, one of which has non-linear dynamics. In order to demonstrate the effect of transport delays on controlled system, artificial delays were introduced into the system and, to deal with them, a Smith predictor was added to the control structure. The system's control logic was programmed using the *Labview* software, as well as its user interface. To validate the created control structure and the possibility of using the bench in didactic experiments, closed-loop tests were carried out, with the objective of controlling the tank level and rejecting disturbances, in addition of dealing with the delays in the system. The results obtained indicate that the developed control structure is able to control the system, they show the major effects of delays in the system and the effectiveness of the the Smith predictor in dealing with them.

**Keywords:** 1. Control. 2. Non-Linear Tank. 3. Smith Predictor. 4. Experimental Bench.



# Lista de figuras

Figura 1 – Malha fechada do controlador PID. . . . .	23
Figura 2 – Malha fechada com preditor de Smith. . . . .	26
Figura 3 – Sistema idealizado. . . . .	27
Figura 4 – Sensor de pressão, sistema de aquisição, bomba e sensor de fluxo. . . . .	28
Figura 5 – Circuito para sensores. . . . .	29
Figura 6 – Circuito para bombas. . . . .	29
Figura 7 – Interface do usuário antiga. . . . .	30
Figura 8 – Estante para suporte dos tanques. . . . .	31
Figura 9 – Estante montada. . . . .	33
Figura 10 – Tanque trapezoidal montado. . . . .	34
Figura 11 – Tanque retangular montado. . . . .	34
Figura 12 – Válvula tanque trapezoidal. . . . .	35
Figura 13 – Válvula tanque retangular. . . . .	35
Figura 14 – Circuito sensores. . . . .	36
Figura 15 – Circuito bombas. . . . .	36
Figura 16 – Placa de aquisição. . . . .	37
Figura 17 – Circuito antigo de acionamento das bombas. . . . .	38
Figura 18 – Tensão na bomba gerada pelo antigo circuito. . . . .	38
Figura 19 – Circuito novo de acionamento das bombas. . . . .	39
Figura 20 – Aproximação de reta de tensão desejada e tensão na bomba. . . . .	40
Figura 21 – Relação tensão e vazão das bombas. . . . .	41
Figura 22 – Nova modelagem do sistema de tanques. . . . .	42
Figura 23 – Interface do usuário atualizada. . . . .	43
Figura 24 – Opções extras do sistema de controle. . . . .	44
Figura 25 – Ajustes para calibrar sensores de nível. . . . .	44
Figura 26 – Diagrama de blocos antigo. . . . .	45
Figura 27 – Diagrama de blocos atualizado. . . . .	45
Figura 28 – Leituras de vazão na interface do usuário. . . . .	46
Figura 29 – Diagrama de controle com controlador PID em sistema sem atraso e perturbações. . . . .	48
Figura 30 – Diagrama de controle com controlador PID e preditor de Smith em sistema com atraso e perturbação artificiais. . . . .	49
Figura 31 – Nível do tanque trapezoidal. . . . .	52
Figura 32 – Nível do tanque retangular. . . . .	52
Figura 33 – Tensão da bomba do tanque trapezoidal. . . . .	53

Figura 34 – Tensão da bomba do tanque retangular. . . . .	53
Figura 35 – Nível do tanque trapezoidal. . . . .	54
Figura 36 – Nível do tanque retangular. . . . .	55
Figura 37 – Tensão da bomba do tanque trapezoidal. . . . .	55
Figura 38 – Tensão da bomba do tanque retangular. . . . .	56
Figura 39 – Nível do tanque trapezoidal. . . . .	57
Figura 40 – Nível do tanque retangular. . . . .	57
Figura 41 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal. . . . .	58
Figura 42 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular. . . . .	58
Figura 43 – Nível do tanque trapezoidal. . . . .	59
Figura 44 – Nível do tanque retangular. . . . .	60
Figura 45 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal. . . . .	61
Figura 46 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular. . . . .	61
Figura 47 – Nível do tanque trapezoidal. . . . .	62
Figura 48 – Nível do tanque retangular. . . . .	62
Figura 49 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal. . . . .	63
Figura 50 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular. . . . .	63
Figura 51 – Nível do tanque trapezoidal. . . . .	64
Figura 52 – Nível do tanque retangular. . . . .	65
Figura 53 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal. . . . .	65
Figura 54 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular. . . . .	66
Figura 55 – Nível do tanque trapezoidal. . . . .	67
Figura 56 – Nível do tanque retangular. . . . .	67
Figura 57 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal. . . . .	68
Figura 58 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular. . . . .	68
Figura 59 – Nível do tanque trapezoidal. . . . .	69
Figura 60 – Nível do tanque retangular. . . . .	70
Figura 61 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal. . . . .	71
Figura 62 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular. . . . .	71
Figura 63 – Nível do tanque trapezoidal. . . . .	72
Figura 64 – Nível do tanque retangular. . . . .	72
Figura 65 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal. . . . .	73
Figura 66 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular. . . . .	73
Figura 67 – Nível do tanque trapezoidal. . . . .	74
Figura 68 – Nível do tanque retangular. . . . .	75
Figura 69 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal. . . . .	75
Figura 70 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular. . . . .	76
Figura 71 – Nível do tanque trapezoidal. . . . .	77
Figura 72 – Nível do tanque retangular. . . . .	77

Figura 73 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal. . . . .	78
Figura 74 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular. . . . .	78

# Lista de Siglas e Abreviaturas

DC	<i>Direct Current</i>
FF	<i>Foundation Fieldbus</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PI	<i>Proporcional Integral</i>
PID	<i>Proporcional Integral Derivativo</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
UFSC	<i>Universidade Federal de Santa Catarina</i>

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	14
1.1	A importância das aulas práticas para os cursos de graduação em engenharia . . . . .	14
1.2	Motivação . . . . .	15
1.2.1	Controle de níveis na indústria . . . . .	15
1.2.2	Sistemas com atraso . . . . .	16
1.3	Objetivos . . . . .	16
1.3.1	Objetivo geral . . . . .	16
1.3.2	Objetivos específicos . . . . .	16
1.4	Organização . . . . .	17
2	REVISÃO DE LITERATURA . . . . .	18
2.1	Disciplina de Sistemas de Controle . . . . .	18
2.2	Controle de sistemas . . . . .	19
2.3	Sistemas de tanques . . . . .	19
2.3.1	Tanques não lineares . . . . .	21
2.4	Controle de tanques não lineares . . . . .	21
2.5	Controle PID . . . . .	23
2.6	Sistemas com atraso . . . . .	24
2.6.1	Preditor de Smith . . . . .	25
2.7	Resultados anteriores . . . . .	26
2.7.1	Sistema idealizado . . . . .	26
2.7.2	Tanques . . . . .	27
2.7.2.1	Dinâmica dos tanques . . . . .	27
2.7.3	Componentes eletrônicos e circuitos . . . . .	28
2.7.4	Software . . . . .	30
2.7.5	Estante . . . . .	31
2.8	Comentários . . . . .	31
3	MONTAGEM DA BANCADA E TESTES PRELIMINARES	33
3.1	Montagem Completa . . . . .	33
3.1.1	Tanques . . . . .	34
3.1.1.1	Válvulas . . . . .	35
3.1.2	Circuitos . . . . .	36
3.2	Problemas Identificados . . . . .	37

3.3	Revisão dos circuitos de acionamento das bombas . . . . .	38
3.4	Correção tensão bomba . . . . .	39
3.5	Dinâmica das Bombas . . . . .	40
3.6	Nova modelagem da dinâmica dos tanques . . . . .	41
3.7	Software . . . . .	42
3.7.1	Interface Atualizada . . . . .	43
3.7.2	Leitura de Vazão . . . . .	45
3.7.3	Perturbações e atrasos artificiais . . . . .	46
3.7.4	Preditor de Smith . . . . .	46
3.8	Diagramas de Controle . . . . .	47
3.9	Comentários . . . . .	50
4	TESTES DE CONTROLE E DISCUSSÃO . . . . .	51
4.1	Controlador PI . . . . .	51
4.1.1	Teste 1 - referência do tanque trapezoidal de 10cm . . . . .	51
4.1.2	Teste 2 - referência do tanque trapezoidal de 20cm . . . . .	54
4.2	Controladores PI em Sistema com Perturbação de Entrada . . . . .	56
4.3	Controladores PI em sistema com Atraso . . . . .	59
4.3.1	Testes com variação de tempo de atraso . . . . .	59
4.3.1.1	Teste em sistema sem atraso . . . . .	59
4.3.1.2	Teste em sistema com 10s de atraso . . . . .	61
4.3.1.3	Teste em sistema com 15s de atraso . . . . .	64
4.3.1.4	Teste em sistema com 20s de atraso . . . . .	66
4.4	Controle PI com Preditor de Smith . . . . .	69
4.4.1	Teste em sistema sem atraso . . . . .	69
4.4.2	Teste em sistema com atraso . . . . .	71
4.4.3	Teste em sistema com atraso com preditor de Smith . . . . .	74
4.5	Controlador PI com Preditor de Smith em Sistema com Per- turbação de Entrada e Atraso . . . . .	76
4.6	Comentários . . . . .	79
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	80
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .	81

# 1 Introdução

Grande parte dos processos industriais apresentam sistemas não lineares e, por conta disso, se faz necessária a utilização de técnicas de controle adequadas. Métodos tradicionais de controle podem até cumprir o seu papel, mas é inegável que técnicas mais avançadas de controle são capazes de produzir resultados superiores, não só em otimização de recursos mas também impactando na qualidade do produto final.

Na graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina, a base do conhecimento necessário para o projeto de controle de sistemas é aprendida em sala de aula, especificamente na disciplina de Sistemas de Controle, ofertada no sexto semestre. Experiências práticas ajudam na melhor compreensão e retenção do conhecimento transmitido na disciplina. No entanto, o uso de sistemas mais simples nas aulas práticas é insuficiente para estreitar o conhecimento teórico da realidade prática na indústria. Assim, este trabalho tem como motivação a construção de uma bancada didática para mitigar este problema.

## 1.1 A importância das aulas práticas para os cursos de graduação em engenharia

As aulas práticas auxiliam o aprendizado, pois aproximam o conhecimento teórico da realidade dos alunos. Porém não é sempre que um tópico abordado em sala consegue ser testado e demonstrado de maneira prática. Esse fator impacta negativamente na aprendizagem dos alunos, pois aliar a teoria à prática é uma forma de motivá-los, além de promover sua compreensão sobre o assunto estudado.

As aulas práticas permitem que os alunos visualizem os fenômenos relatados no conteúdo teórico, aproximando-os da realidade. A falta de aulas experimentais leva principalmente ao desânimo do aluno, muitas vezes fazendo com que ele perca o interesse pelo assunto devido à insuficiente compreensão do que está aprendendo (SOARES et al, 2016).

Desta maneira, o laboratório desempenha um papel importante na formação do aluno, pois torna a teoria uma realidade, viabiliza problemas e permite que o aluno se adapte às mais diversas condições que podem ser favoráveis ou desfavoráveis que vai encontrar na futura prática profissional. As disciplinas desenvolvidas em laboratório destinam-se a aplicar os conceitos teóricos aprendidos em sala de aula, proporcionando aos alunos a consolidação desses conceitos e uma melhor compreensão do processo, além da demonstração em todo o laboratório de equipamentos relacionados a operações e processos industriais e como cada um funciona.

Aulas de laboratório podem ser classificadas como forma de aprendizagem ativa, ou seja, o processo pelo qual os alunos descobrem, processam e aplicam informações, em vez de apenas ouvir um professor ou seguir os slides mostrados em sala de aula. O laboratório deve estar orientado para o ensino de aplicações nas suas disciplinas afins e pode também servir de apoio à investigação científica. As práticas de laboratório dão suporte a um conteúdo teórico sólido e à formação profissional, permitindo aos alunos pensar e resolver problemas. O mercado de trabalho está cada vez mais aquecido e com profissionais altamente qualificados; sendo assim, há uma demanda crescente por profissionais capacitados para iniciar suas carreiras (SOARES et al. 2016).

Hoje, a preparação adequada é fundamental para ser um profissional de sucesso no mercado, e para isso é necessário subsidiar os alunos durante sua formação acadêmica. Sendo assim, fica evidente a importância de se disponibilizar conteúdos práticos para que os alunos saiam cada vez mais preparados para o mercado de trabalho e para a vida.

## 1.2 Motivação

Esta seção aborda as motivações que levaram ao desenvolvimento deste trabalho.

### 1.2.1 Controle de níveis na indústria

Controlar o nível em tanques é um fator importante a ser considerado em sistemas de controle (MENDES, 2017). Tanques com base cilíndrica ou reta são mais utilizados na indústria, porém, estes tipos construtivos não garantem uma drenagem completa dos líquidos existentes no interior do tanque. Por conta disso, modelos cônicos passam a ser utilizados. Em processos industriais, o controle de nível de líquido em um tanque cônico é requisito básico, pois neste tipo construtivo a forma do tanque varia de maneira contínua.

“O controle de nível de líquido nos tanques e o controle de vazão entre os tanques é um problema básico nas indústrias. Em muitos processos tais como, colunas de destilação, evaporadores, rebolisadores e tanques de mistura, o nível de líquido no recipiente é de grande importância na operação do mesmo. Um nível muito elevado pode, por exemplo, perturbar o equilíbrio da reação, causar danos nos equipamentos ou resultar em derramamento de material. Além do mais, se o nível for muito baixo, pode ter consequências ruins para as operações sequenciais. Assim percebe-se que o controle do nível de líquido é uma tarefa importante e comum nas indústrias de processos” (JOSEPH; ISAAC, 2013 apud MENDES 2017, p. 1).

Sendo assim, a principal motivação deste trabalho de conclusão de curso é a implementação de um sistema de controle de nível em dois tanques com uma geometria que



foge das normalmente utilizadas na indústria. Além disso, este trabalho possui importância didática, pois o sistema desenvolvido poderá ser utilizado nas aulas de sistemas de controle. Desta maneira, o aluno terá a oportunidade de realizar experimentos práticos, interagindo em tempo real com o sistema físico, com aplicações em sistemas de controle, controle não linear, modelagem, instrumentação, entre outros.

## 1.2.2 Sistemas com atraso

A maioria dos processos industriais possui um “tempo morto”, ou seja, um atraso de propagação em sua dinâmica. Esse tempo morto é o tempo que o sistema leva para responder a uma aplicação de entrada, causado principalmente pelo tempo que leva para transportar massa, energia ou informação. Há também um caso mais extremo em que os atrasos presentes no sistema são tão grandes que acabam se sobrepondo à dinâmica do processo. Esses casos são chamados de sistemas dominados por atraso. Para o caso de apenas uma malha de controle, a compensação desse atraso dominante geralmente é feita usando um preditor de Smith, dependendo do modelo em estudo.

Com isso em mente, são motivações deste trabalho simular atrasos no sistema de controle, assim demonstrando os efeitos causados pelos mesmos, e implementar um preditor de Smith na estrutura de controle desenvolvida, para então demonstrar sua efetividade em lidar com os atrasos.

## 1.3 Objetivos

Nesta seção são apresentados os objetivos geral e específicos que deram embasamento a este trabalho de conclusão de curso.

### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a validação da bancada experimental de controle de nível de um sistema de dois tanques, projetada para uso didático na disciplina de Sistemas de Controle. A bancada foi inicialmente proposta e projetada como parte de um projeto de iniciação científica, disponível em Geske (2021), o objetivo deste trabalho é finalizar o trabalho previamente iniciado. A estrutura proposta consiste de dois tanques de água de formatos diferentes interligados, formando um sistema não-linear de múltiplas entradas e saídas.

### 1.3.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Finalizar a montagem da bancada;

- Testar os circuitos de atuação e sensoriamento;
- Realizar testes com controladores PID;
- Realizar testes de controle com atrasos artificiais no sistema;
- Implementar um preditor de Smith na lógica de controle.

## 1.4 Organização

O restante do trabalho é dividido em 4 capítulos, organizados conforme descrito a seguir. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão das fontes consultadas sobre conceitos de controle de sistemas e trabalhos similares que motivaram o direcionamento deste trabalho. Também são comentadas nesse capítulo os resultados previamente conquistados durante o projeto de Iniciação científica. No Capítulo 3 é descrita a finalização da construção da bancada e os desafios encontrados e superados durante o processo. Os testes de controle realizados para validação da estrutura e uma discussão sobre os mesmos são abordados no Capítulo 4. Para finalizar, estão sintetizadas no Capítulo 5 as conclusões do trabalho realizado e propostas para trabalhos futuros.

## 2 Revisão de Literatura

Nesta seção serão abordados os artigos, teses, dissertações e demais documentos que deram embasamento a este Trabalho de Conclusão de Curso.

### 2.1 Disciplina de Sistemas de Controle

O presente Trabalho de Conclusão de Curso aborda o desenvolvimento e validação de uma bancada experimental que sirva de apoio para as aulas da disciplina de Sistemas de Controle, ofertada no sexto semestre do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Blumenau.

Esta disciplina tem por objetivo introduzir os alunos ao controle de sistemas e os ensina a realizar o projeto de controladores, o que é algo corriqueiro na atividade profissional de um Engenheiro de Controle e Automação. Estes são os conteúdos teóricos abordados na disciplina de Sistemas de Controle:

- Sistemas contínuos/discretos/amostrados.
- Objetivos de controle.
- Controle com dois graus de liberdade.
- Respostas de sistemas no domínio do tempo e na frequência.
- Sistemas com zeros, fase não-mínima e com atraso de transporte.
- Estabilidade de sistemas.
- Métodos de Projeto: Lugar das raízes; Lugar das raízes como ferramenta de projeto.
- Projeto de sistemas de controle contínuos e discretos.
- Rejeição de perturbações e seguimento de referências em sistemas de controle.
- Controladores por realimentação e pré-alimentação.
- Controladores PID: estruturas, técnicas de ajuste e implementação prática.
- PID industriais.
- Introdução ao controle robusto.
- Compensação de sistemas com atraso, Preditor de Smith e modificações.

Nas subseções seguintes serão abordados de forma mais aprofundada os conteúdos teóricos que permitirão o desenvolvimento da estação de trabalho proposta e validada no presente Trabalho de Conclusão de Curso.

## 2.2 Controle de sistemas

Os sistemas de controle podem ser encontrados em toda a indústria de controle de processos: regulando os níveis de líquidos em tanques de armazenamento, concentrações químicas em tanques, espessura de materiais de fabricação, temperaturas de processo e muito mais.

Os processos modernos aderiram ao uso generalizado de computadores digitais como parte de sistemas de controle à medida que a tecnologia foi se desenvolvendo. Por exemplo, os computadores são usados para sistemas de controle robótico industrial, naves espaciais e indústrias de controle de processos. É difícil imaginar um sistema de controle moderno que não use computadores digitais. No entanto, por mais que se aprenda a parte teórica, relacionar a teoria à prática nem sempre é trivial.

É importante que o futuro engenheiro entenda a necessidade de modelos teóricos para a análise e projeto do controle de sistemas, além de saber verificar se um sistema atende a determinados requisitos de desempenho.

Também é importante que saiba como projetar um controle simples de modo a obter o melhor desempenho possível de um sistema de controle. Este entendimento acaba sendo o primeiro passo em direção a um vasto campo do conhecimento que serve para dar base e segurança necessárias para a atuação do engenheiro de controle e automação.

## 2.3 Sistemas de tanques

O controle de nível de tanques é um problema comum abordado no estudo de controle de sistemas. Por ser algo com um efeito visível (o nível da água subindo/descendo), diferente de controle de temperatura, por exemplo, é um estudo de caso bastante relevante para mostrar aos alunos o controle atuando.

Gatzke et al. (2000), há mais de 20 anos reconheciam a importância dos experimentos práticos para a consolidação do conteúdo teórico aprendido em sala de aula. Eles desenvolveram um laboratório multidisciplinar para ensino de controle de processos na Universidade de Delaware, com o intuito de expor os alunos a aplicações de sistemas de controle de processos realistas e métodos de controle avançados. Um dos experimentos realizados foi o controle de nível de um sistema de quatro tanques, foco do estudo aqui citado. Neste trabalho, os autores descrevem dois métodos baseados em modelos que permitiram aos alunos a implementação de controle desse sistema interativo. A modelagem

foi realizada usando testes em etapas e software Aspen para uso com matriz dinâmica de controle (DMC).

Gosmann (2002) desenvolveu um sistema multivariável não linear de tanques acoplados para avaliação de técnicas de controle, construindo um processo em escala de laboratório com três tanques acoplados, com o objetivo de controlar a altura dos níveis de água. Os resultados mostraram que o desempenho do controlador PID e de um controlador no espaço-de-estados é prejudicado quando o processo opera em um ponto distante do ponto de operação utilizado para linearizar o modelo.

Melo e Bernardes (2006) realizaram a instrumentação e o controle de uma maquete de nível de líquido utilizando quatro tanques interligados. Eles projetaram um sistema modular constituído de sensores de pressão para medição do nível de líquidos, módulo de controle com microcontrolador e módulo de acionamento com MOSFETs. Os autores verificaram, que este sistema mostrou-se superior aos implementados anteriormente, principalmente no quesito de medição do nível da coluna de líquido devido ao tipo de sensor utilizado. Neste estudo também foram realizados diversos testes com diferentes valores de parâmetros para o controlador e configurações para os tanques, a fim de comprovar a eficiência do sistema desenvolvido. Por fim, foi realizada uma identificação do sistema de nível de líquidos, e os autores propuseram um modelo que permitiu obter estimativas para os parâmetros da planta.

Silva et al. (2007) estudaram o controle de nível em tanques acoplados usando sistemas inteligentes, através de uma investigação sobre estratégias de controle fazendo uso de sistemas inteligentes para o controle de nível em uma planta não linear. Os sistemas inteligentes utilizados pelos autores consistiam em lógica Fuzzy e algoritmos genéticos, sendo a primeira para determinar o controlador e os algoritmos genéticos para sintonizar os parâmetros dos controladores que foram implementados. O sistema não linear utilizado para testar as estratégias de controle era constituído de um modelo de dois tanques acoplados. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que, para o modelo não linear utilizado, os controladores inteligentes tiveram melhor performance do que os clássicos.

Likun et al. (2010) propuseram um método de controle de nível baseado em uma combinação de sistema e controlador PID. Na simulação do sistema pseudo-linear que passa conectando o sistema inverso ao primeiro do modelo, o resultado mostrou que o sistema inverso consegue o desacoplamento do sistema de tanque de água de retenção dupla, enquanto que para obter um nível estável, um regulador PD é projetado com base na análise do diagrama de Bode do sistema pseudo-linear. Tanto a simulação quanto o experimento mostraram que o método é mais eficaz, não tem sobressinal e possui tempo de ajuste mais curto do que o método de controle PID tradicional utilizado.

Pereira (2016) realizou em seu trabalho de conclusão de curso o controle e monitoramento de nível em tanques reservatórios de líquidos, através da análise e implantação de um controlador PID, gerenciado por um Arduino em uma planta exemplo, utilizando

recursos com alta disponibilidade, confiabilidade e baixo custo.

Gouta et al. (2016) em seu artigo abordaram o problema de projeto de controle não linear para um sistema de medição do nível de líquido de dois tanques acoplados. Para a dinâmica deste sistema, duas abordagens de controle radicalmente diferentes foram apresentadas e comparadas: o modelo de controle preditivo e o controle de retrocesso. Para destacar a eficiência e aplicabilidade dos esquemas de controle propostos, comparações teóricas bem como resultados experimentais foram fornecidos e discutidos.

Urrea e Páez (2021) realizaram o design e comparação de Estratégias de controle de nível em um tanque cônico não linear. Este tipo de tanque possui características matemáticas e dinâmicas altamente não lineares. Quatro estratégias de controle foram projetadas, aplicadas e comparadas: PID, Ganho de Escalonamento (GS), Controle de Modelo Interno (IMC) e Lógica Fuzzy (FL). Para determinar quais das estratégias de controle projetadas seriam as mais adequadas para um tanque cônico invertido, foi realizado um estudo comparativo do comportamento do sistema.

### 2.3.1 Tanques não lineares

A ideia de usar tanques não lineares vem para adicionar um nível a mais de dificuldade para o controle do sistema, ensinando os alunos sobre como lidar com os sistemas. O formato do tanque pode levar à não linearidade assim como a saída de água.

Aravind et al. (2013) realizaram a modelagem e simulação de um tanque não-linear em tempo real utilizando o software SIMULINK. O controle de nível de um tanque cônico é uma questão complexa devido à natureza não linear do tanque. Para cada ponto de operação estável, um modelo de processo de primeira ordem foi identificado usando o método da curva de reação do processo; o controle foi feito e a comparação do método de síntese e do método Skogestad foram esclarecidos.

## 2.4 Controle de tanques não lineares

Sistemas não lineares são um problema para o controle, necessitando ser trabalhados de maneira especial. Dependendo do tipo da não linearidade, várias técnicas podem ser aplicadas.

Pan et al. (2005) estudaram o problema de projeto de controle não linear para um sistema de nível de líquido de dois tanques de estado acoplado. Motivado por um desejo de fornecer controle preciso do nível de líquido, um conjunto de técnicas de realimentação não linear foi desenvolvido. Especificamente, um controlador baseado em modelo e um controlador adaptativo foram projetados para o sistema de nível de líquido de dois tanques. Utilizando o teorema de Lyapunov, o conjunto de esquemas de controle é comprovado por produzir uma resposta de rastreamento exponencialmente e assintoticamente estável para

trajetórias que são contínuas e têm derivadas limitadas para ordens superiores a dois. Para mostrar a eficácia do projeto de controle adaptativo, comparações experimentais detalhadas à um controlador PID foram fornecidas.

Lima et al. (2005) estudaram a implementação de redes neurais artificiais no ambiente de redes industriais, através do uso de blocos funcionais padronizados pela Fieldbus Foundation. Isso possibilita implementar uma vasta gama de aplicações que envolvem esta ampla ferramenta matemática, como controle inteligente, detecção de falhas, etc. em qualquer sistema padrão FF. Para validar a proposta, os autores apresentaram uma aplicação de controle neural em um sistema não linear.

Bernardes et al. (2006) desenvolveram uma plataforma de nível de líquido a ser utilizada no estudo de estratégias de controle para processos multivariáveis não lineares. Ele é composto de quatro tanques, um deles cuja área depende do nível de líquido. O sistema pode ser reconfigurado fisicamente para diferentes números de entradas, saídas e ordem. Seu design segue uma abordagem modular, contendo sensores de pressão para medição do nível de líquido, uma placa de controle multifuncional micro-controlada e um driver para motor DC baseado em MOSFETs de baixo RDS. Ele pode ser operado de forma autônoma através de controle por microcontrolador, conectado a um microcomputador, controlador analógico ou controlador lógico programável.

Sundaravadivu et al. (2011) projetaram um Controlador PID de Ordem Fracionária (FOPID) para controlar o nível de líquidos de um tanque esférico. A resposta do controlador FOPID projetado foi comparada com o controlador tradicional PID de ordem inteira (IOPID) em simulação e com o controlador IOPI na configuração experimental. Este método oferece uma forma prática e sistemática de projeto de controladores para a classe considerada de planta FOPDT. A partir da simulação e dos resultados experimentais apresentados, os autores concluíram que o projeto do controlador de ordem fracionária funciona de forma eficiente e com bom desempenho se comparado com o controlador de ordem inteira.

Sastry et al. (2012) implementaram diferentes algoritmos de controle PID no sistema de controle de nível de um tanque e observaram as respostas. O sistema consistia num tanque retangular que tem entrada de líquido no tanque e fluxo de saída através de válvula. O Sistema de controle destina-se a manter o nível de líquido no tanque em algum valor pré definido, independentemente da entrada do tanque. O controlador PID convencional forneceu melhores resultados devido a mudanças na carga. Assim, a mudança no fluxo de entrada ou alterações nos valores predefinidos são tratadas como perturbações do processo. Assim, o uso de um controlador PID não linear deve incluir os parâmetros de perturbação ao controlador PID convencional.

As maneiras diferentes de tentar lidar com o controle de tanques não lineares demonstra que é um tópico com muito potencial de estudo. Assim, demonstrar esses sistemas de maneira prática pode auxiliar na compreensão das dificuldades de controlar um sistema

não-linear.

## 2.5 Controle PID

O controle proporcional é utilizado para minimizar a característica de oscilação do controle de liga/desliga (WEST, 2012).

“O controle PID vai um pouco além para reduzir erros e fornecer precisão e estabilidade em um processo. Ele faz isso usando a ação integral e ações derivativas. Dessa forma, elimina erros de desvio de controle e para gerenciar movimentos rápidos do processo. Todos os três termos PID precisam ser ajustados adequadamente com os requisitos da aplicação para alcançar o melhor controle. Para um alto nível de controle, os controladores digitais PID são frequentemente usados. Estes normalmente vêm na forma de controladores de temperatura PID ou controladores de processo PID e podem ser instrumentos simples, duplos ou multi-loop. O Controle PID é usado para uma variedade de variáveis de processo, tais como; Temperatura, Fluxo e Pressão. Tipicamente, aplicações desafiadoras, tais como processos industriais de tratamento térmico, e fornos usam controladores PID, bem como no setor científico e de laboratório, onde precisão e confiabilidade são essenciais para a qualidade de uma aplicação de controle” (WEST, 2012, p. 1).

Este tipo de controlador é muito utilizado na indústria, por isso é de grande importância que os alunos consigam entender como eles funcionam e estejam aptos a utilizar, testar e calibrar os controladores PID.

Um controlador PID ideal pode ser descrito por:

$$C = \frac{U}{E} = K_C \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.1)$$

sendo  $U$  o sinal de controle,  $E$  o erro entre a saída  $Y$  e a referência  $R$  e  $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$  os ganhos do controlador. O sistema de malha fechada de um controlador PID convencional pode ser visto na Figura 1.

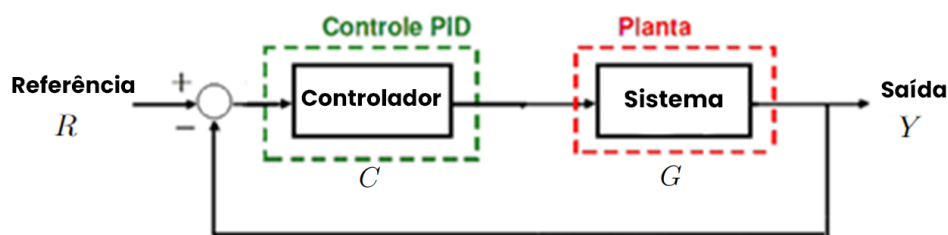


Figura 1 – Malha fechada do controlador PID.



Esse sistema de malha fechada tem comportamento regido pela equação

$$\frac{Y}{R} = \frac{CG}{1 + CG} \quad (2.2)$$

sendo  $G$  a planta, ou sistema a ser controlado. Assim, através da calibração do controlador, que é feita modificando os ganhos  $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$ , é possível modificar o comportamento de malha fechada.

## 2.6 Sistemas com atraso

Assim como os sistemas não lineares, sistemas com atraso apresentam um nível de dificuldade maior para a realização do controle. É muito comum encontrar atrasos em sistemas reais, e por isso, é igualmente interessante abordar esse tipo de exemplo com os alunos em sala de aula.

De acordo com Normey-Rico e Camacho (2007), muitos processos na indústria, assim como em outras áreas, apresentam atraso em seu comportamento dinâmico. De fato, a maioria dos métodos de ajuste para controladores PID usados na indústria consideram os tempos mortos como parte integrante dos modelos de dinâmica de processo. Esses atrasos são causados principalmente por fenômenos de informação, energia ou transporte de massa, mas também podem ser causados por tempo de processamento ou pelo acúmulo de defasagens de tempo em uma série de simples sistemas conectados em série.

Para processos que exibem atraso, toda ação executada na variável manipulada do processo só afetará a variável controlada após o tempo morto do processo. Por isso, analisar e projetar controladores para sistemas com atraso é mais difícil.

Ainda de acordo com os autores, os atrasos estão presentes em quase todos os lugares. Por exemplo, no sistema de aquecimento central de um edifício. A caldeira está normalmente localizada no subsolo e ligada a todas as divisões por tubos que transportam água quente. Quando a posição da válvula de gás é aumentada, a temperatura da água dentro da caldeira começa a subir; no entanto, é necessário esperar um certo tempo para que esta água aquecida chegue aos quartos. Este atraso se dá por conta do tempo gasto para que a água quente seja transportada do aquecedor central para os quartos e depende da distância e dos valores do fluxo. Outro exemplo do atraso sendo uma parte importante da dinâmica de um processo é o caso de uma cadeia de suprimentos de manufatura. Dentro tal processo, o nível de estoque da cadeia de suprimentos depende do início da fábrica e da demanda. O problema de controle é manter o nível de estoque dentro de certos valores pré-especificados e, ao mesmo tempo, proporcionar operação; em outras palavras, mudanças rápidas no estoque e partidas de fábrica são indesejáveis. O atraso neste caso tem uma influência importante e é causado pelo tempo necessário para que os pedidos de produtos sejam processados e entregues.

Processos com atrasos significativos são difíceis de controlar usando controladores por realimentação principalmente por: (a) o efeito das perturbações não é sentido até que se tenha decorrido um tempo considerável, (b) o efeito da ação de controle leva algum tempo para ser sentido na variável controlada e (c) a ação de controle aplicada com base no erro real tenta corrigir uma situação que se originou algum tempo antes. Essas dificuldades também podem ser explicadas no domínio da frequência: O atraso introduz uma diminuição extra na fase do sistema, o que pode causar instabilidade.

Processos com pequenos atrasos podem ser controlados através de PID. No entanto, se for especificada uma resposta em malha fechada mais rápida ou for considerado um processo com um atraso maior, o avanço de fase do PID poderá não ser suficiente para tentar o desempenho de malha fechada desejado. Então, a ordem do controlador pode ser aumentada novamente para melhorar o desempenho do mesmo, mas este processo não terá fim. Uma abordagem diferente para este problema pode ser considerada: o uso do Preditor de Smith.

### 2.6.1 Preditor de Smith

Uma das maneiras abordadas na disciplina de Controle De Sistemas para lidar com sistemas com atraso é a utilização do Preditor de Smith.

“O preditor de Smith consiste em uma estrutura de controle que desloca o atraso para fora da malha de realimentação, fazendo com que o controlador atue sobre o processo como se a dinâmica de malha fechada não apresentasse atraso. Essa estratégia de controle foi concebida supondo que o retardo fosse constante e que um modelo exato da planta estivesse disponível. O seu desempenho, portanto, é bastante sensível às incertezas do modelo do processo” (OLIVEIRA, 2016, p. 2).

No trabalho desenvolvido por Oliveira (2016), a autora propôs uma estratégia de controle baseada no preditor de Smith para sistemas incertos com retardo no tempo. O principal objetivo do trabalho foi melhorar a robustez do preditor de Smith na presença de erros de modelagem, principalmente no que tange ao atraso. Com a finalidade de compensar as incertezas do modelo, o observador em malha aberta da estrutura tradicional do preditor de Smith é substituído por um estimador em malha fechada.

Além disso, uma vez que o atraso do sistema pode não ser precisamente conhecido, ou ainda ser variante no tempo, a estrutura proposta leva em consideração apenas o valor nominal constante do retardo, que representa uma estimativa do retardo incerto ou a média estimada do retardo variante no tempo. Na abordagem proposta foram considerados controladores PI/PID e o problema foi formulado por meio de Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs). De acordo com a autora, a principal vantagem do método proposto é a

garantia da estabilidade do sistema em malha fechada sob certas condições estabelecidas para as incertezas.

A malha fechada com preditor de Smith, representada na Figura 2, pode ser descrita por

$$\frac{Y}{R} = \frac{C_{eq}Ge^{-sL}}{1 + C_{eq}Ge^{-sL}} \quad (2.3)$$

sendo  $e^{-sL}$  o atraso do sistema,  $G$  o sistema sem atraso e onde o controlador equivalente  $C_{eq}$ , é dado por

$$C_{eq} = \frac{C}{1 + C(G_{apr} - Ge^{-sL})} \quad (2.4)$$

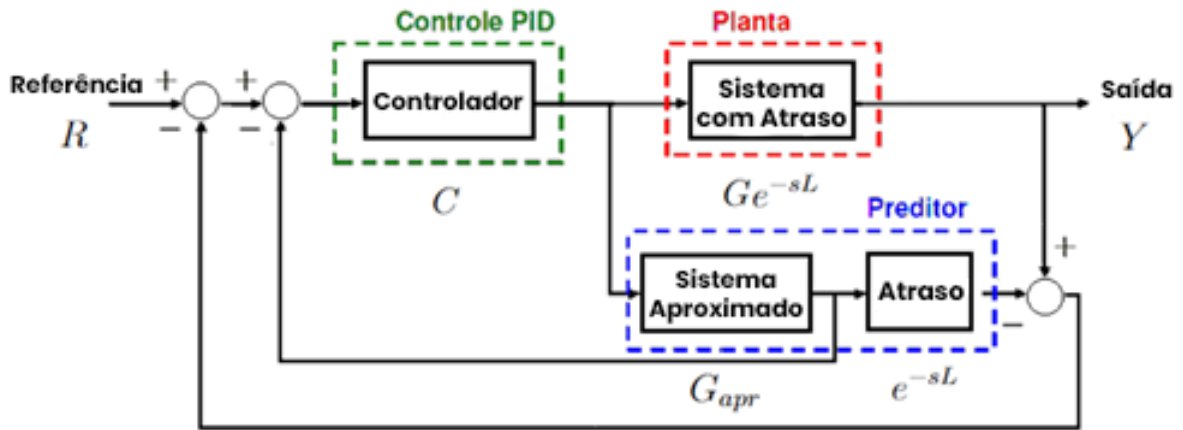


Figura 2 – Malha fechada com preditor de Smith.

Assim, para conseguir um sistema de malha fechada que se assemelhe ao descrito em (2.2),  $C_{eq}$  deve se aproximar o máximo possível do controlador  $C$ , para isso é de suma importância encontrar um sistema aproximado  $G_{apr}$  que represente bem o sistema  $Ge^{-sL}$ .

## 2.7 Resultados anteriores

Este trabalho é uma continuação de um projeto feito em formato de iniciação científica. Assim, alguns resultados importantes para esse trabalho já haviam sido conquistados anteriormente. O processo para chegar nesses resultados pode ser visto com mais detalhes em Geske (2021). Os resultados mais importantes para esse trabalho serão discutidos nesta seção.

### 2.7.1 Sistema idealizado

De maneira a demonstrar os processos não-lineares e utilizar isso de forma didática, foi proposta a construção de um sistema de dois tanques, onde cada um dos tanques possuiria dinâmica não linear, como visto na Figura 3.

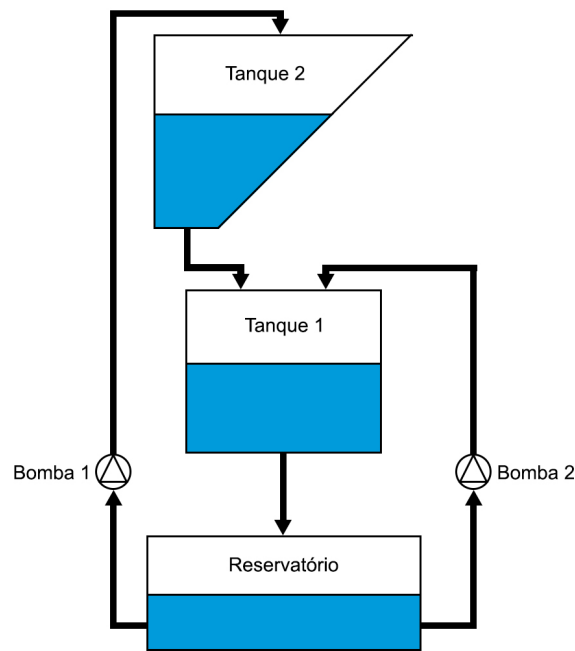


Figura 3 – Sistema idealizado.

Esse sistema consiste em dois tanques organizados em uma coluna, onde o fluxo de saída do superior faz parte do fluxo de entrada do inferior, assim tendo uma vazão variável de acordo com o nível. Posteriormente, também foi optado pela instalação de válvulas manuais na saída de ambos os tanques. Os tanques também teriam formatos que tornam a relação entre ganho de volume e nível não constante ao longo de todo o tanque, caracterizando uma dinâmica não linear.

## 2.7.2 Tanques

O material escolhido para a construção dos tanques foi acrílico, devido à disponibilidade e preço. Utilizando o programa *SolidWorks*, o projeto dos tanques foi feito. Especificou-se as dimensões e, posteriormente, os furos e cortes a serem executados nas chapas de acrílico.

Após o corte, as peças foram coladas e o tanque foi vedado, os sensores de pressão foram então acoplados e um adaptador roscável foi adicionado na base para possibilitar a instalação de um tubo de saída.

### 2.7.2.1 Dinâmica dos tanques

A primeira proposta é um tanque que possui formato retangular com a largura de 30 cm, altura de 25 cm e uma espessura de 10 cm. Este tanque possui uma dinâmica linear, descrita na equação 2.5.

$$\dot{V}_R = 10 * 30 * \dot{H}_R = Q_{BR} + Q_T - Q_R, \quad (2.5)$$

Sendo  $\dot{V}_R$  a variação do volume de água no tanque e  $H_R$  o nível do mesmo.

Para o segundo tanque, de formato trapezoidal, foi escolhida uma largura superior de 40 cm e inferior de 10 cm, altura de 30 cm, sendo  $45^\circ$  o seu menor ângulo, e uma espessura de 10 cm. Sua dinâmica é não linear, como pode ser vista em (2.6).

$$\dot{V}_T = 10 * (H_T + 10) * \dot{H}_T = Q_{BT} - Q_T, \quad (2.6)$$

Sendo  $\dot{V}_T$  a variação do volume de água no tanque e  $H_T$  o nível do mesmo. As vazões  $Q_{BR}$  e  $Q_{BT}$  representam o efeito das bombas nos tanques, sendo  $Q_{BR}$  a vazão da bomba ligada ao tanque retangular e  $Q_{BT}$  a vazão da bomba ligada ao tanque trapezoidal. Como a saída do tanque trapezoidal é diretamente ligada ao outro tanque, sua vazão de saída  $Q_T$  também afeta o tanque retangular.

$Q_R$  e  $Q_T$  representam a vazão de saída dos tanques e podem ser descritas por

$$Q_R = \frac{\pi D_R^2}{4} \sqrt{2gH_R} \quad (2.7)$$

e

$$Q_T = \frac{\pi D_T^2}{4} \sqrt{2gH_T}, \quad (2.8)$$

onde  $D_R$  e  $D_T$  representam o diâmetro da saída de água dos tanques retangular e trapezoidal, respectivamente.

### 2.7.3 Componentes eletrônicos e circuitos

Para o desenvolvimento do sistema, se viu necessária a utilização dos seguintes componentes: 2 bombas, utilizadas para a atuação no sistema; 2 sensores de pressão e 2 sensores de fluxo, para o sensoriamento do sistema; placa de aquisição, que realiza a leitura do sensores, os cálculos de controle e comanda a atuação da bomba; fonte de alimentação, para alimentar todos os outros componentes.

Fotos de alguns componentes se encontram na Figura 4. Em ordem: sensor de pressão, placa de aquisição, bomba e sensor de fluxo.



Figura 4 – Sensor de pressão, sistema de aquisição, bomba e sensor de fluxo.

Para certos componentes se faz necessário um circuito auxiliar para sua utilização. Com isso em mente, foram construídas duas placas: uma placa para os sensores de pressão e uma para a ativação das bombas, as placas prontas podem ser vistas nas Figuras 5 e 6.

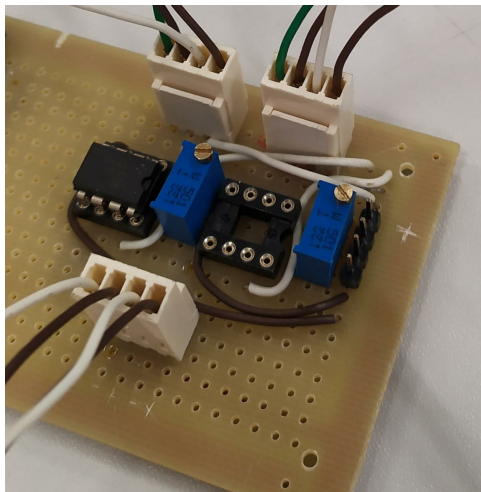


Figura 5 – Circuito para sensores.

A placa criada para os sensores de pressão tem como objetivo ampliar o sinal gerado pelos mesmos através de um amplificador operacional. O sensor de pressão diferencial MX2050GP mede pressões de 0 a  $50kPa$  numa faixa de  $40mV$ , por isso se faz necessário amplificar o sinal.

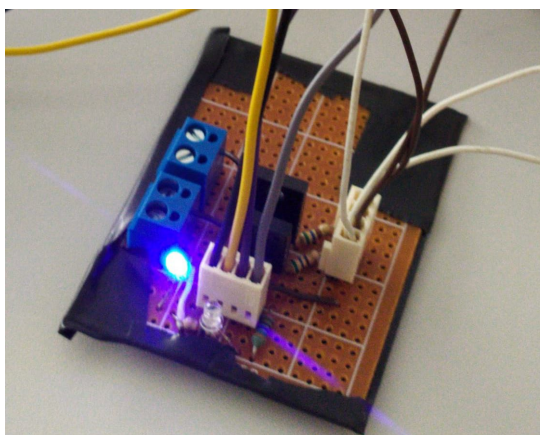


Figura 6 – Circuito para bombas.

Para o bombeamento da água para os tanques, utilizou-se uma bomba submersa de água JT-500, de 600 L/H. Ela trabalha com alimentação de 6-12 volts DC, como a placa de aquisição não tem potência para ativá-la diretamente, optou-se então por utilizar um sinal PWM da placa e um circuito com um transistor para alimentar a bomba através da tensão gerada pela fonte de alimentação.

A leitura de vazão feita pelos sensores funciona através da frequência do sinal gerado por eles quando há uma passagem de um fluido, esse sinal pode ser lido diretamente pela placa de aquisição, assim não necessitando de um circuito adicional.

## 2.7.4 Software

Para a realização do controle e supervisão do sistema, optou-se por usar o software LabView FPGA 2016. Essa escolha teve como principal motivo a utilização de uma placa de aquisição da National Instruments, a empresa desenvolvedora do software, desta forma a integração entre o equipamento físico e o software se tornou simples, devido à compatibilidade inerente entre os dois.

Em conjunto com o sistema de controle foi desenvolvido um supervisor do sistema, ou interface de usuário, que pode ser visto na Figura 7. A interface do usuário conta com dois grandes gráficos de nível, um para cada um dos tanques, assim como quatro caixas de saída que mostram o nível atual de cada tanque e a tensão atual em cada bomba, utilizados para visualizar o comportamento do sistema. Foram inseridas caixas de entrada onde são escolhidos os ganhos de controle de cada controlador PID e as referências de nível dos tanques, possibilitando assim que o usuário defina sua própria regra de controle.

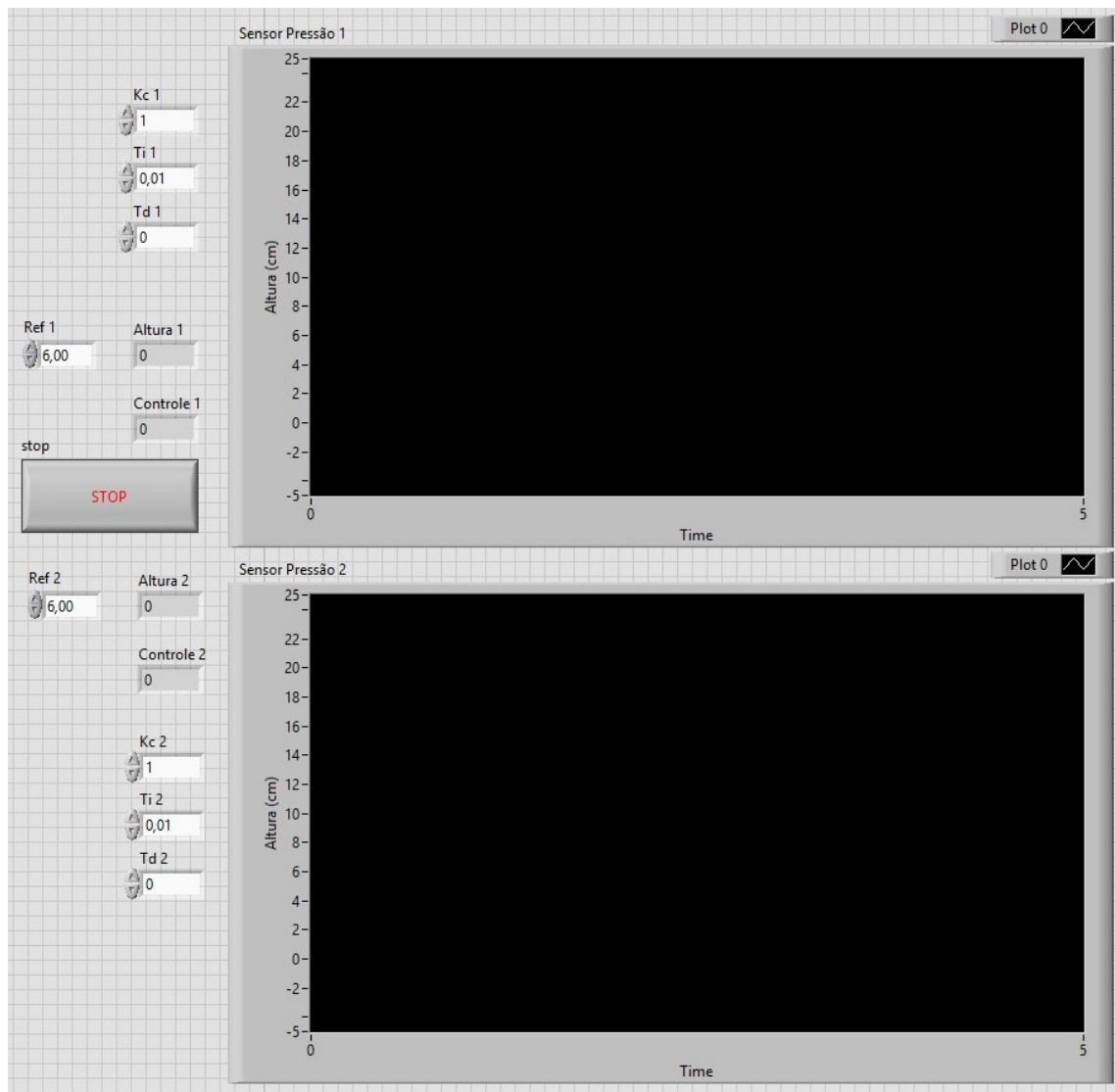


Figura 7 – Interface do usuário antiga.

### 2.7.5 Estante

Para suportar os tanques e também adicionar uma maior mobilidade ao projeto, foi projetada uma estante que comportasse os tanques e o reservatório, assim como os circuitos, cabos, e tubos. A estante pode ser vista na Figura 8.



Figura 8 – Estante para suporte dos tanques.

A estante projetada foi então desenhada no programa *SolidWorks* e foi optado pelo uso de Compensado Naval como o material de construção, assim assegurando a rigidez da estante e reduzindo o custo de construção.

## 2.8 Comentários

Percebendo a importância da disciplina de Sistemas de Controle no ensino de controle de sistemas, devido ao seu grande uso na indústria, foi idealizada uma bancada experimental, como projeto de iniciação científica, que pudesse auxiliar o ensino de tópicos abordados nesta disciplina.



Por ser um problema comum na indústria e também de fácil visualização para os alunos, foi optado pelo uso de um sistema de tanques, onde a variável controlada é o nível dos mesmos. Através do uso de um tanque não linear, torna-se possível utilizar a bancada para demonstrar o controle de sistemas não lineares.

Sabendo que o atraso também é um fator que dificulta o controle de sistemas e que o preditor de Smith pode ser uma ferramenta eficiente para lidar com sistemas que possuem atrasos, foi optado por incluir atrasos artificiais e um preditor de Smith na lógica de controle da bancada.

Com a bancada idealizada, os tanques e a estante construídos, os circuitos montados e a interface de usuário e lógica de controle desenvolvidos, o projeto iniciado na iniciação científica tem prosseguimento neste trabalho de conclusão de curso.

## 3 Montagem da Bancada e Testes Preliminares

Nesta seção serão discutidos os passos realizados para finalizar a bancada experimental, desde a sua montagem completa, os primeiros testes e as correções feitas ao sistema após os testes.

### 3.1 Montagem Completa

Com todos os componentes prontos, o primeiro passo foi realizar a montagem da bancada. Assim os tanques foram encaixados nos seus devidos locais, o tanque trapezoidal acima do tanque retangular e abaixo dele a caixa reservatória de água. A bancada completa pode ser vista na Figura 9.



Figura 9 – Estante montada.

As próximas seções entrarão em mais detalhes sobre como os tanques, válvulas e circuitos foram instalados e interligados.

### 3.1.1 Tanques

Para interligar os tanques e o reservatório foram utilizadas mangueiras. De maneira similar, mangueiras foram encaixadas às bombas, conectando-as aos tanques. Essas bombas foram então posicionadas dentro da caixa reservatória. Também foram acoplados sensores de vazão aos tubos conectados às bombas. Os tanques montados podem ser vistos nas Figuras 10 e 11.



Figura 10 – Tanque trapezoidal montado.



Figura 11 – Tanque retangular montado.

No caso do tanque retangular, foi optado por ligar o tubo da bomba até o fundo do mesmo. Essa escolha teve como objetivo diminuir o movimento da água dentro do tanque,

que causava ruído na leitura do sensor de pressão. Isso não se fez necessário para o tanque trapezoidal, pois a sua geometria permite com que a água desça pelo seu lado de ângulo não reto sem gerar muita movimentação da água no tanque.

### 3.1.1.1 Válvulas

Para possibilitar a modificação da dinâmica do sistema manualmente, válvulas esfera foram instaladas nas saídas de água dos tanques, como mostram as Figuras 12 e 13.



Figura 12 – Válvula tanque trapezoidal.



Figura 13 – Válvula tanque retangular.

As válvulas atuam diminuindo a área de saída da água, que impacta diretamente na vazão de saída de água, podendo até mesmo bloquear totalmente o fluxo da saída.

### 3.1.2 Circuitos

Como foram utilizados conectores KK na construção dos circuitos, a montagem foi relativamente simples: Os sensores de pressão e as bombas foram conectados aos seus respectivos circuitos, que também foram conectados à fonte de tensão para a alimentação dos mesmos. Os circuitos montados podem ser vistos nas Figuras 14 e 15.

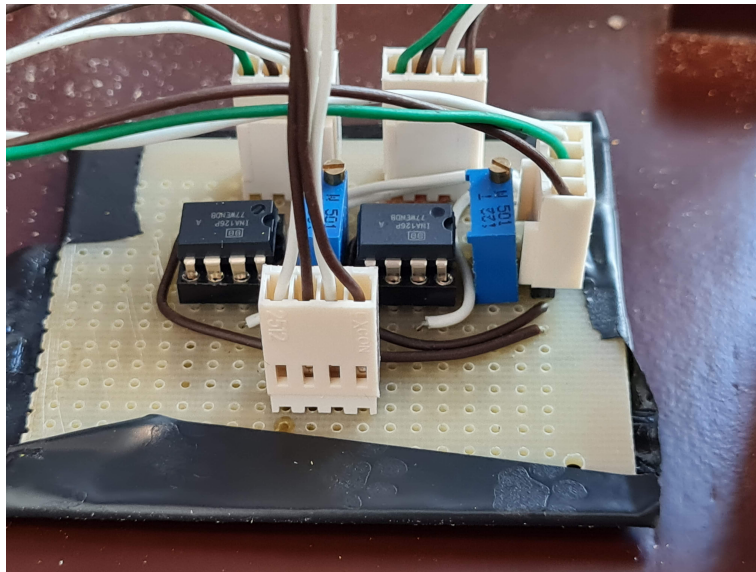


Figura 14 – Circuito sensores.



Figura 15 – Circuito bombas.

Estes circuitos foram então conectados à placa de aquisição, que é a responsável por realizar a leitura do sinal dos sensores e enviar sinais para ativação das bombas. Os sensores de vazão não necessitam de circuitos extras, então foram ligados diretamente à placa de aquisição. A placa de aquisição pode ser vista na Figura 16.



Figura 16 – Placa de aquisição.

## 3.2 Problemas Identificados

Após a finalização da construção e montagem da bancada, um primeiro teste foi realizado. A partir desse teste foi percebido que alguns problemas estavam fazendo com que o resultado não fosse condizente com as simulações e cálculos realizados no trabalho anterior.

Os principais problemas encontrados foram:

- Circuito de acionamento das bombas não funcionando como desejado;
- Tensão medida na bomba diferente da tensão de entrada;
- Dinâmica das bombas mudando por conta dos tubos de água;
- A modelagem do sistema completo não condizia com a realidade.

As seções a seguir descrevem como esses problemas foram resolvidos.

### 3.3 Revisão dos circuitos de acionamento das bombas

O circuito previamente construído para o acionamento das bombas, representado na Figura 17, estava causando um sinal de tensão muito problemático nas bombas. Quando o sinal do PWM era zero, não havia caminho para a corrente da bomba continuar seguindo, o que gerava uma tensão negativa muito alta, como pode ser visualizada na Figura 18.

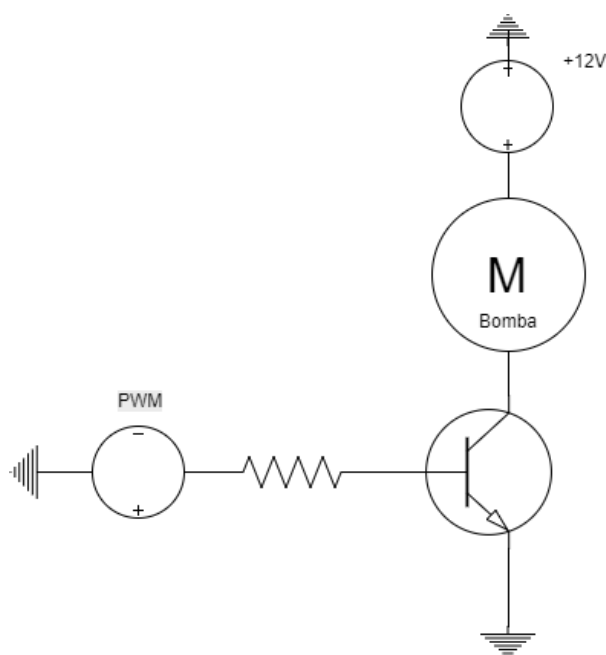


Figura 17 – Circuito antigo de acionamento das bombas.

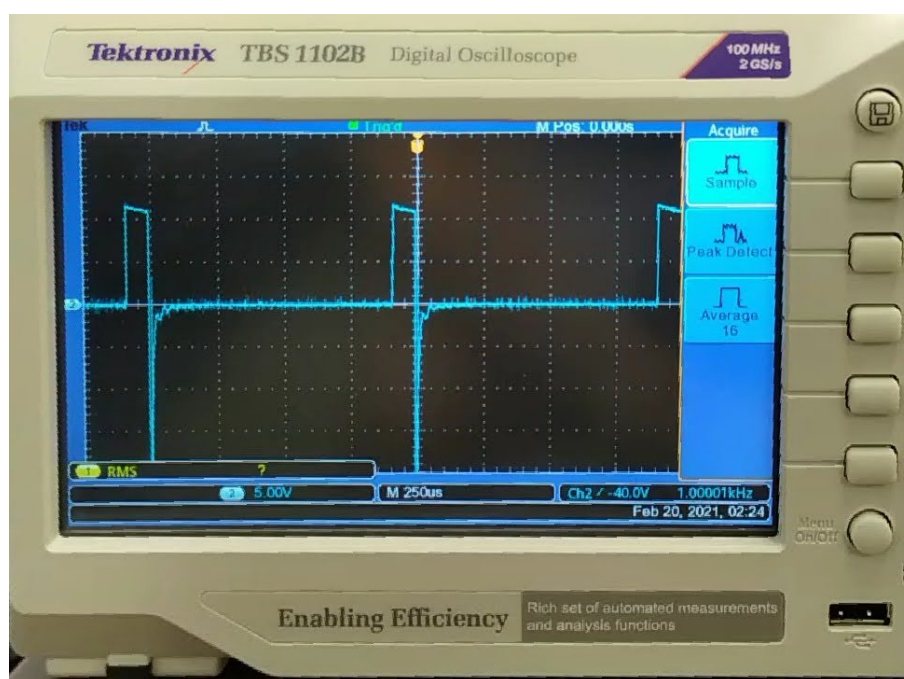


Figura 18 – Tensão na bomba gerada pelo antigo circuito.

Foi então optado pela construção de um novo circuito que não causasse o mesmo problema. O novo circuito, representado na Figura 19, conta com um opto-acoplador 4N35, um transistor TIP31 e um diodo 1N4001. O diodo utilizado tem função de permitir que a corrente flua quando o transistor estiver aberto, ou seja, quando o PWM é zero, assim evitando o problema descrito anteriormente.

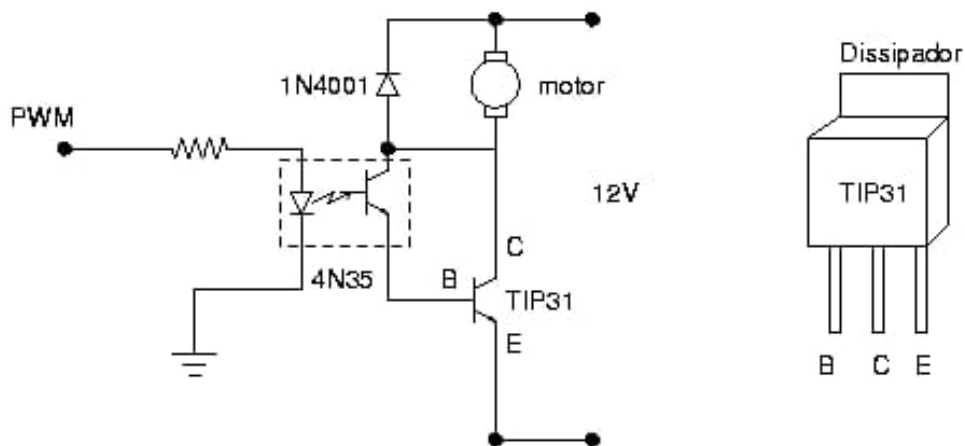


Figura 19 – Circuito novo de acionamento das bombas.

Com o novo circuito, foi obtido o comportamento desejado para a tensão na bomba de água. A utilização do opto-acoplador também gerou o ponto positivo de isolar os circuitos de controle e alimentação do motor, assim também diminuindo possíveis ruídos e interferências.

### 3.4 Correção tensão bomba

Após realizar testes com o novo circuito de ativação da bomba, foi percebido que a tensão de entrada no cálculo do ciclo de trabalho do PWM, ou tensão desejada, era diferente da tensão real medida na bomba. Esse efeito é causado pela interação entre os componentes do circuito. O resultado desses testes, assim como a relação da tensão desejada e tensão real na bomba pode ser vista na Figura 20.

Nesses resultados é possível ver que utilizar o ciclo de trabalho proporcional a uma certa tensão desejada, nem sempre gerava uma tensão igual na bomba. Um exemplo disso é que para uma tensão desejada de 6V, ou seja um ciclo de trabalho de 50%, a tensão medida na bomba era de 6,19V.

Para corrigir esse problema, e obter uma tensão na bomba igual à tensão desejada, foi necessário achar a relação entre essas tensões. A reta aproximada descreve a seguinte relação para a tensão na bomba:

$$v_B = \frac{v_{PWM} + 0.495}{1.0494} \quad (3.1)$$



onde  $v_B$  é a tensão medida na bomba e  $v_{PWM}$  a tensão desejada. Note que o coeficiente de inclinação da reta é quase igual a 1, indicando uma relação quase direta entre a tensão de entrada e a efetiva. No entanto, a existência do coeficiente independente causa um offset relevante que precisa ser corrigido, especialmente para tensões próximas de 0.

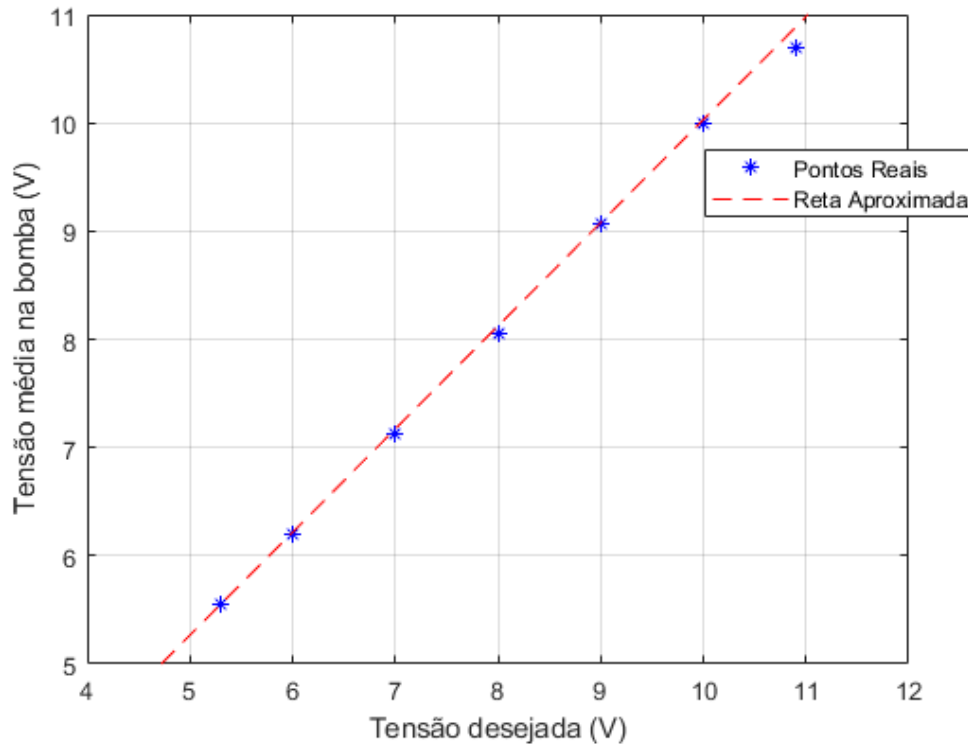


Figura 20 – Aproximação de reta de tensão desejada e tensão na bomba.

Assim, pode-se dizer que para atingir uma tensão na bomba, a tensão de entrada do cálculo do ciclo de trabalho do PWM deve seguir

$$v_{PWM} = 1.0494(v_B - 0.495) \quad (3.2)$$

Adicionando essa fórmula na saída do controlador é possível ignorar esse efeito, fazendo com que a tensão na bomba seja a mesma do sinal de controle.

### 3.5 Dinâmica das Bombas

Ao testar as bombas após a montagem completa da bancada, foi percebido que a relação de tensão e vazão das mesmas era diferente da medida inicialmente. Essa diferença se dá pelo efeito pressão da coluna de água que as bombas precisam vencer para bombear a água. A Figura 21 mostra a relação de tensão e vazão medida em cada uma das bombas após a montagem na estante em comparação com o cálculo antigo.

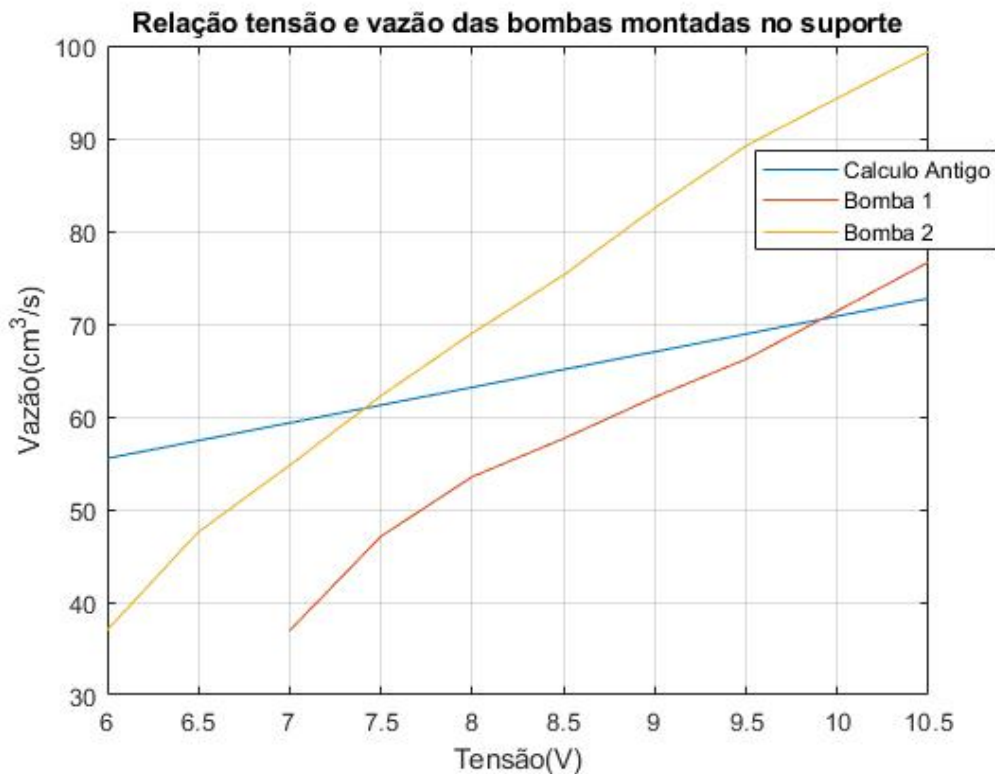


Figura 21 – Relação tensão e vazão das bombas.

O gráfico mostra que não apenas há uma diferença em relação ao cálculo antigo, mas também entre as duas bombas há uma variação. Como a bomba 1 está ligada ao tanque superior, a coluna de água que atua nela é maior, assim necessitando uma tensão maior do que a bomba 2.

As aproximações lineares das vazões das bombas após a montagem são descritas por

$$Q_{BT} = 9.8578(v_T - 2.7228) \quad (3.3)$$

e

$$Q_{BR} = 12.3793(v_R - 2.4719), \quad (3.4)$$

onde  $Q_{BT}$  e  $Q_{BR}$  são a vazão da bomba do tanque trapezoidal e do tanque retangular respectivamente e  $v_T$  e  $v_R$  são as tensões de entrada das bombas do tanque trapezoidal e do tanque retangular.

### 3.6 Nova modelagem da dinâmica dos tanques

Na modelagem inicial feita anteriormente a este trabalho, não foi percebido o efeito que o nível do tanque retangular faria na saída de água do tanque trapezoidal. Devido ao uso de uma mangueira que conecta a saída do tanque superior ao fundo do tanque inferior, é gerada uma diferença de pressão causada pelas colunas de água.

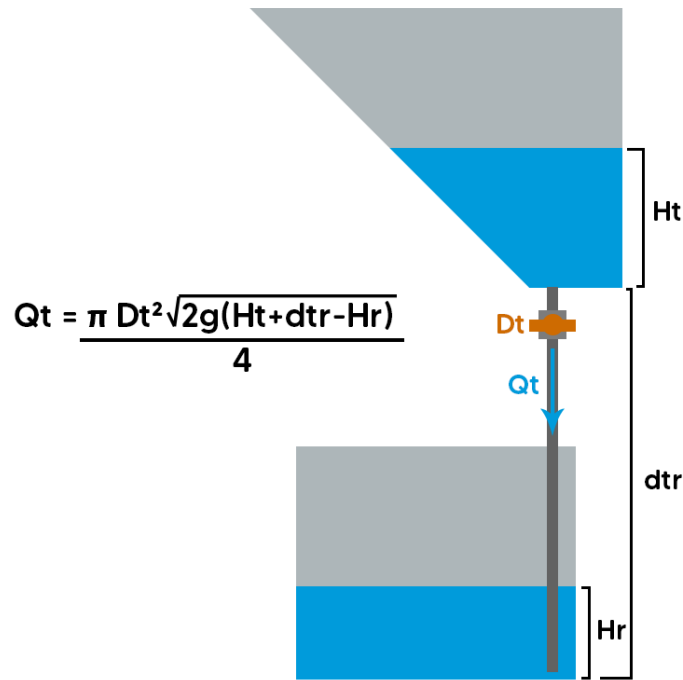


Figura 22 – Nova modelagem do sistema de tanques.

Assim, atualizando as equações de vazão de saída dos tanques, antes descritas em (2.8) e (2.7), tem-se

$$Q_T = \frac{\pi D_T^2}{4} \sqrt{2g(H_T + d_{TR} - H_R)} \quad (3.5)$$

e

$$Q_R = \frac{\pi D_R^2}{4} \sqrt{2g(H_R + d_{RC} - H_C)}, \quad (3.6)$$

onde  $Q_T$  e  $Q_R$  são a vazão de saída do tanque trapezoidal e do tanque retangular respectivamente,  $D_T$  e  $D_R$  são os diâmetros das válvulas de saída do tanque trapezoidal e do tanque retangular,  $H_T$  é o nível de água do tanque trapezoidal,  $H_R$  do tanque retangular e  $H_C$  da caixa reservatória,  $d_{TR}$  é a diferença de altura entre os tanques e  $d_{RC}$  a diferença de altura entre o tanque retangular e a caixa reservatória.

Vale notar que devido ao tamanho relativo da caixa reservatória de água, há pouca variação no seu nível, assim é possível adotar um valor constante para  $H_C$  para os cálculos.

### 3.7 Software

Nesta seção serão discutidas as modificações e adições feitas ao programa de controle e supervisionamento feito no *Labview*.

### 3.7.1 Interface Atualizada

Para melhorar a experiência do aluno que for utilizar o programa criado para os testes, uma atualização foi feita na interface de usuário. Essa atualização incluiu:

- Gráficos de tensão das bombas;
- Gráficos de vazão das bombas;
- Réguas de nível atual dos tanques;
- Botões para funções especiais:
  - Liga/Desliga controle;
  - Liga/Desliga perturbação artificial (+1V) no sinal de controle;
  - Liga/Desliga atraso artificial (10s) no sinal de controle;
  - Liga/Desliga preditor de Smith;
- Ajustes dos sensores;

A nova interface de usuário e suas adições podem ser vistas nas Figuras 23, 24 e 25.

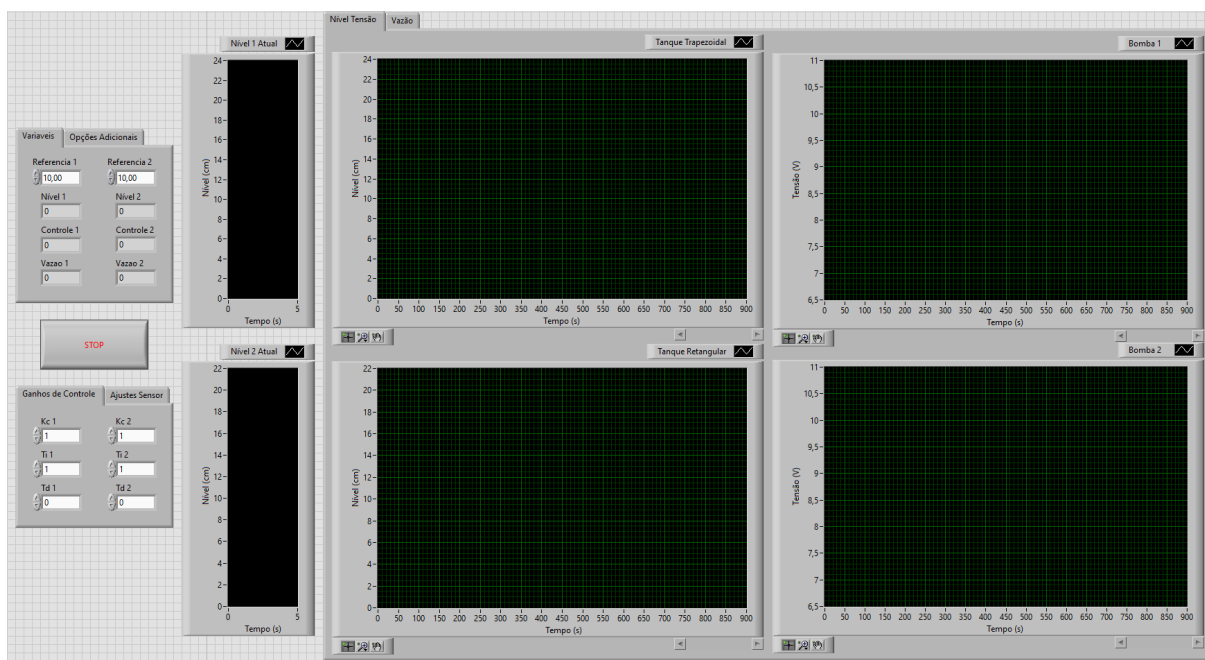


Figura 23 – Interface do usuário atualizada.

Devido aos erros e histerese que os sensores de pressão sofrem, se viu necessário adicionar as opções de ajustes dos sensores, visto que era necessário calibrar os mesmos frequentemente entre os testes. As opções de ajustes são ganho e *offset*, pra ajustar a relação entre a tensão medida dos circuitos do sensor e o nível de água em centímetros, e uma medida que foi chamada de “tubo”, usada pra corrigir a diferença de nível causada pela coluna de água presente no tubo onde o sensor é acoplado.

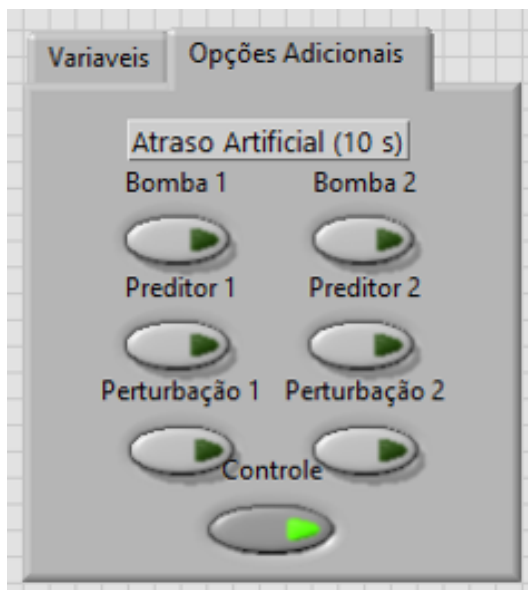


Figura 24 – Opções extras do sistema de controle.

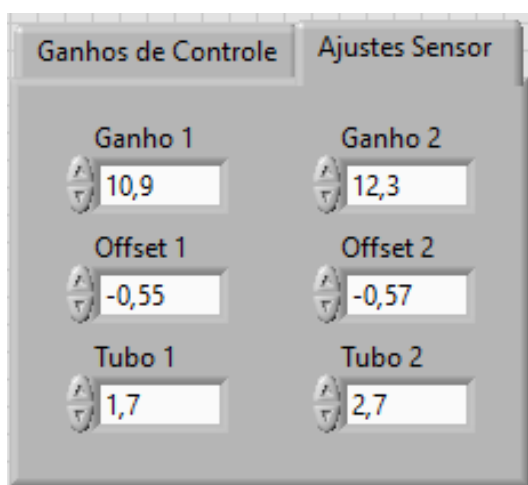


Figura 25 – Ajustes para calibrar sensores de nível.

De maneira a acomodar as adições feitas à interface, o diagrama de blocos do programa do *Labview* também precisou ser alterado. As Figuras 26 e 27 mostram respectivamente o diagrama de blocos antigo e o atualizado.

Como é possível ver nas imagens, o diagrama de blocos novo é consideravelmente maior. Isso se deve à adição da leitura de vazão, perturbações e atrasos artificiais e da estrutura do preditor de Smith, a lógica por trás dessas adições será discutida nas próximas seções.



Os gráficos de vazão das bombas da interface de usuário podem ser vistos na Figura 28.

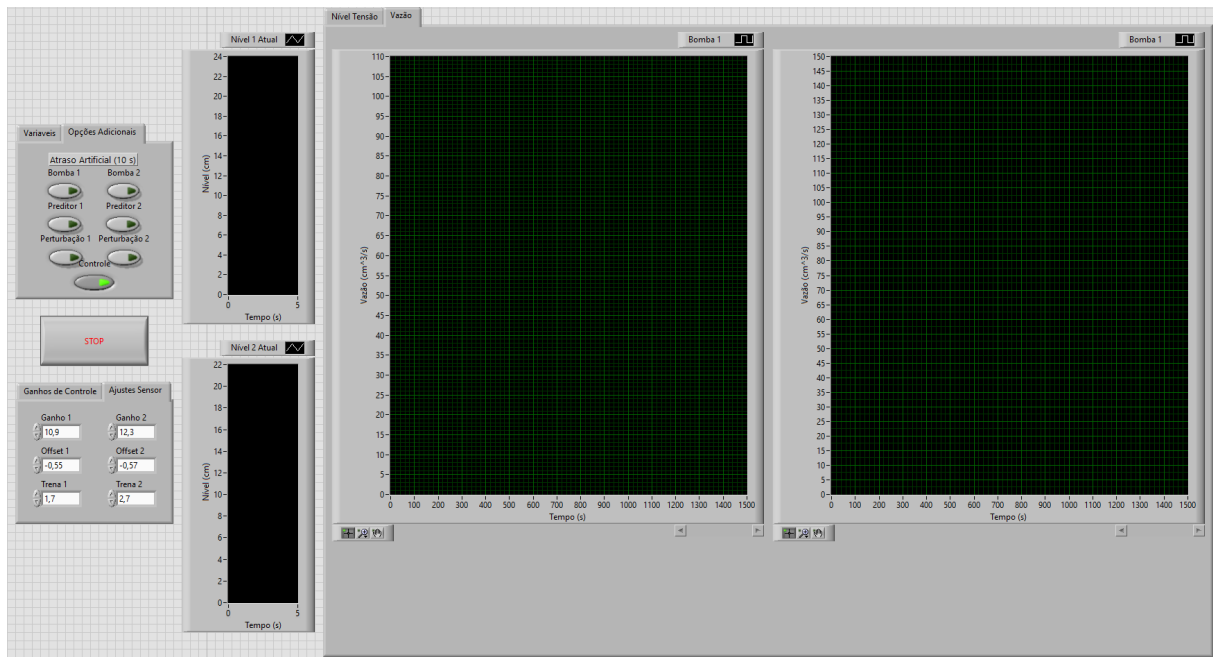


Figura 28 – Leituras de vazão na interface do usuário.

### 3.7.3 Perturbações e atrasos artificiais

Ao ser acionado um dos botões de perturbação, é adicionado +1V ao sinal de controle da respectiva bomba, isso simula uma uma perturbação de entrada. Essa funcionalidade pode ser utilizada para testes de rejeição de perturbação.

Similarmente, ao acionar um dos botões de atraso, o sinal de controle respectivo é atrasado em 10 segundos. Esse atraso pode ser utilizado para demonstrar o efeito de atrasos em malhas de controle e a efetividade de tratar esses sistemas com atraso utilizando o Preditor de Smith.

### 3.7.4 Preditor de Smith

A partir da estrutura do preditor de Smith, apresentada na Figura 2, é possível perceber que para implementar o preditor na estrutura de controle criada, é necessário achar um meio de calcular a resposta do sistema sem o atraso.

Admitindo que a saída do sistema aproximado seja a saída atual somada a uma variação da mesma, ou no caso de um dos tanques:

$$\tilde{H}_i(t + dt) = \tilde{H}_i(t) + \dot{H}_i(t)dt \quad (3.8)$$

onde  $\tilde{H}_i(t + dt)$  é o nível aproximado de um tanque da próxima iteração do sistema de controle,  $\tilde{H}_i(t)$  o nível aproximado do tanque atual,  $\dot{H}_i$  a variação do nível do tanque e  $dt$  o tempo de uma iteração do sistema de controle.

A partir de (2.5) e (2.6), sabe-se que as relações das variações de nível dos tanques com relação às vazões de entrada e saída são

$$\dot{H}_T(t) = \frac{Q_{BT}(t) - Q_T(t)}{10 * (H_T(t) + 10)} \quad (3.9)$$

e

$$\dot{H}_R(t) = \frac{Q_{BR}(t) + Q_T(t) - Q_R(t)}{300} \quad (3.10)$$

Utilizando as equações atualizadas da vazão das bombas (3.4) e (3.3) e das vazões de saída dos tanques (3.6) e (3.5), são encontradas:

$$\dot{H}_T(t) = \frac{9,8578(v_{BT}(t) - 2.7228) - \frac{\pi D_T^2}{4} \sqrt{2g(H_T(t) + d_{TR} - H_R(t))}}{10 * (H_T(t) + 10)} \quad (3.11)$$

e

$$\dot{H}_R(t) = \frac{12,3793(v_{BR}(t) - 2.4719) + \frac{\pi D_T^2}{4} \sqrt{2g(H_T(t) + d_{TR} - H_R(t))} - \frac{\pi D_R^2}{4} \sqrt{2g(H_R(t) + d_{RC} - H_C)}}{300} \quad (3.12)$$

Como  $v_{BR}$  e  $v_{BT}$  são os sinais de controle,  $H_T$  e  $H_R$  são medidos pelos sensores,  $d_{RC} - H_C$  e  $d_{TR}$  podem ser medidos e  $D_T$  e  $D_R$  calculados pelos usuários do programa, é possível realizar os cálculos de  $\dot{H}_R$  e  $\dot{H}_T$  a cada iteração do sistema de controle.

Então, desde que o nível inicial dos tanques seja conhecido, é possível calcular os níveis aproximados  $\tilde{H}_T$  e  $\tilde{H}_R$  a cada iteração, possibilitando assim a implementação do preditor de Smith.

## 3.8 Diagramas de Controle

Para melhor representar e facilitar o entendimento do sistema completo, dois diagramas de controle foram desenhados. Através deles é possível visualizar como todas as correções feitas nas seções anteriores afetam o sistema completo.

A Figura 29 apresenta o diagrama de controle do sistema utilizando apenas controladores PID e sem adicionar atrasos e perturbações artificiais a ele. A Figura 30 apresenta o diagrama de controle do sistema que utiliza controladores PID e preditor de Smith, neste caso também foram adicionadas perturbações e atrasos artificiais.

Nos diagramas é possível visualizar como os valores são tratados dentro do software da placa de aquisição, os valores digitais, e como sinal PWM emitido pela placa se transforma até chegar a afetar os níveis dos tanques, através dos valores reais. Para o caso do preditor de Smith, é possível perceber a interconexão entre os dois tanques no cálculo da aproximação do sistema.



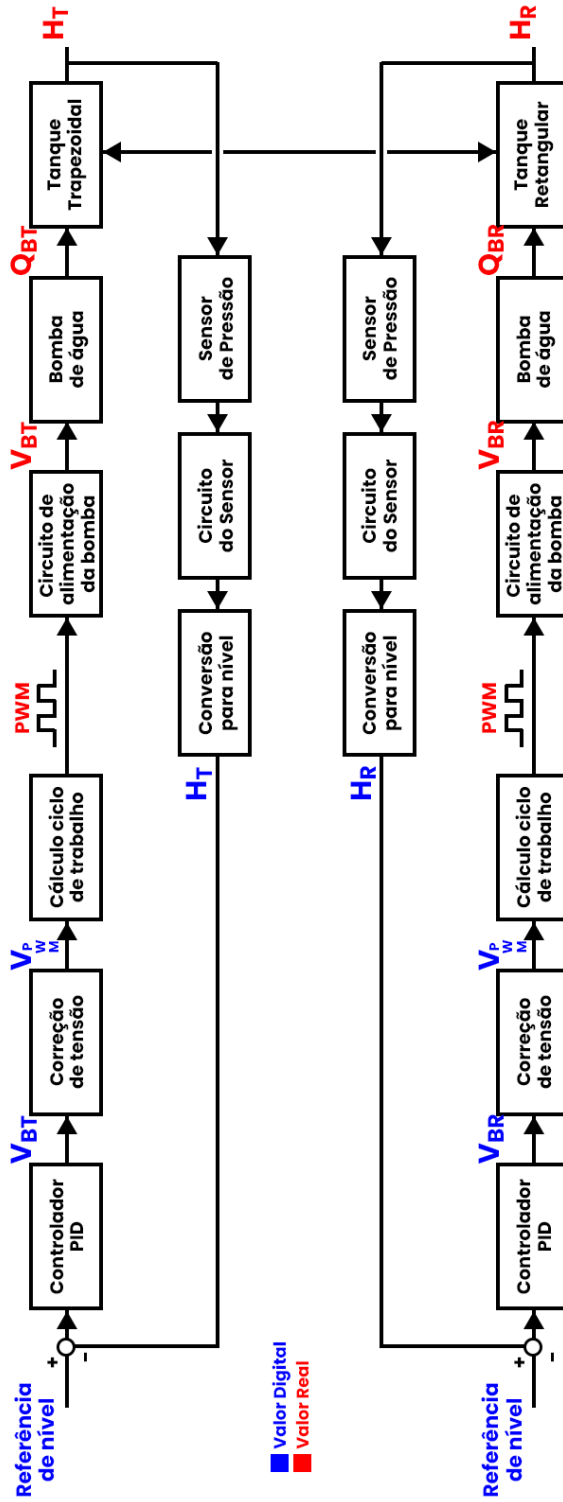


Figura 29 – Diagrama de controle com controlador PID em sistema sem atraso e perturbações.

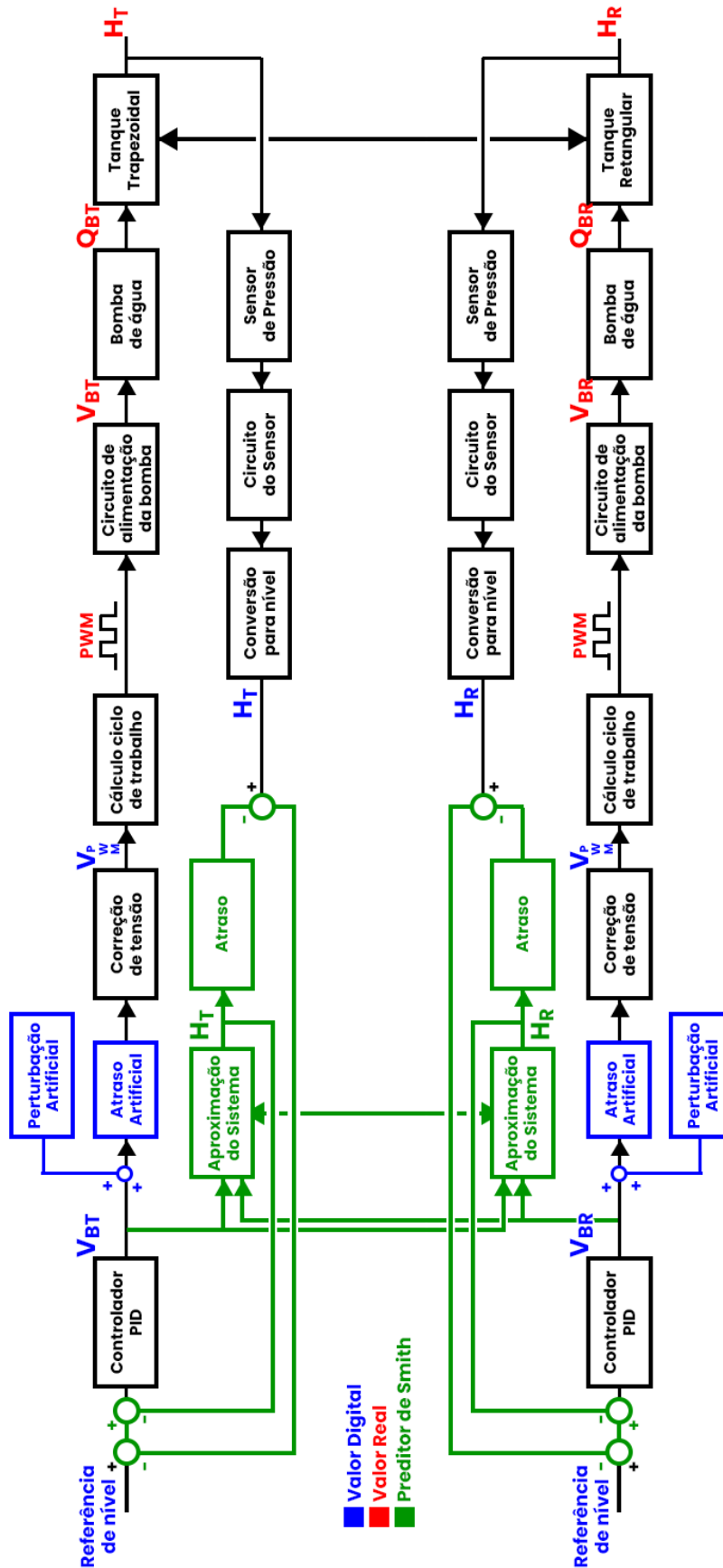


Figura 30 – Diagrama de controle com controlador PID e preditor de Smith em sistema com atraso e perturbação artificiais.

## 3.9 Comentários

Com a montagem completa e os primeiros testes, problemas inesperados ocorreram, fazendo com que o sistema de atuação não operasse da maneira desejada. Ao analisar o que estava ocorrendo, percebeu-se que os problemas eram provenientes de detalhes que foram ignorados na idealização do sistema, como a dinâmica das bombas e dos tanques, que foram alteradas por causa da pressão gerada pelas colunas de água dos tubos, ou o circuito de acionamento não possuir um caminho de escape para as correntes das bombas.

Após a correção do circuito e das novas equações encontradas para as dinâmicas das bombas e dos tanques, o sistema passou a se comportar de maneira desejada.

Assim, o próximo passo foi a atualização do software, modificando a interface gráfica, para melhor apresentar as informações e configurações do sistema, e a adição de novas funções, como inserir perturbações e atrasos artificiais ou um preditor de Smith à lógica de controle, possibilitando experimentos mais complexos.

## 4 Testes de Controle e Discussão

Para validar a estrutura de controle projetada e toda a construção física da bancada experimental, assim garantindo que ela possa ser utilizada nas disciplinas de controle, foram realizados testes de controle em situações variadas do sistema.

Como a ideia era apenas provar a efetividade e não encontrar o sistema de controle ideal, não houve uma preocupação em calcular ganhos ótimos para os controladores, assim, foram utilizados controladores PI com ganhos  $K_p = 1$  e  $T_i = 1$ .

Nessa seção serão apresentados e discutidos os resultados dos testes de controle de nível feitos. Os testes realizados foram: controle de nível usando controladores PI no sistema completo, controle de nível usando controladores PI em sistema com atraso na entrada, controle de nível usando controladores PI com Preditor de Smith em sistema com atraso na entrada, controle de nível usando controladores PI em sistema com perturbação de entrada, controle de nível usando controladores PI com preditor de Smith em sistema com atraso e perturbação de entrada.

### 4.1 Controlador PI

Os primeiros testes foram realizados no sistema de dois tanques sem adição de atrasos nem de perturbações, nesses testes foram utilizados apenas controladores PI para o controle de nível.

Os testes foram feitos mantendo uma referência de nível no tanque trapezoidal e realizando mudanças na referência do tanque retangular, sendo essas referências de  $10cm$ ,  $15cm$  e  $20cm$ .

Além de testar a capacidade dos controladores PI de seguir as referências de nível para o sistema, esses testes também tiveram como motivação observar o efeito que a mudança de nível do tanque retangular causa no tanque trapezoidal.

Foram realizados 3 testes, a diferença entre eles sendo a referência de nível do tanque trapezoidal, no primeiro teste foi utilizada a referência de  $10cm$ , no segundo a referência foi de  $15cm$  e no terceiro foi de  $20cm$ . Nas seções abaixo serão discutidos os resultados desses testes.

#### 4.1.1 Teste 1 - referência do tanque trapezoidal de $10cm$

O primeiro teste foi feito utilizando uma referência de nível de  $10cm$  para o tanque trapezoidal. Os gráficos de nível do tanque trapezoidal e do tanque retangular desse teste de controle podem ser vistos nas Figuras 31 e 32 respectivamente.

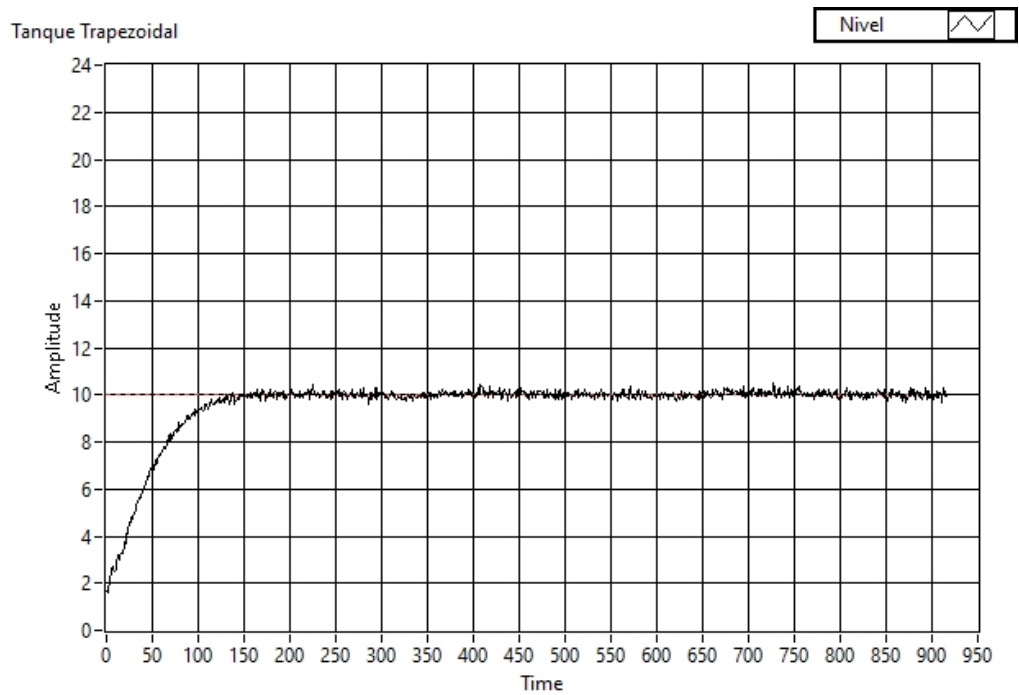


Figura 31 – Nível do tanque trapezoidal.

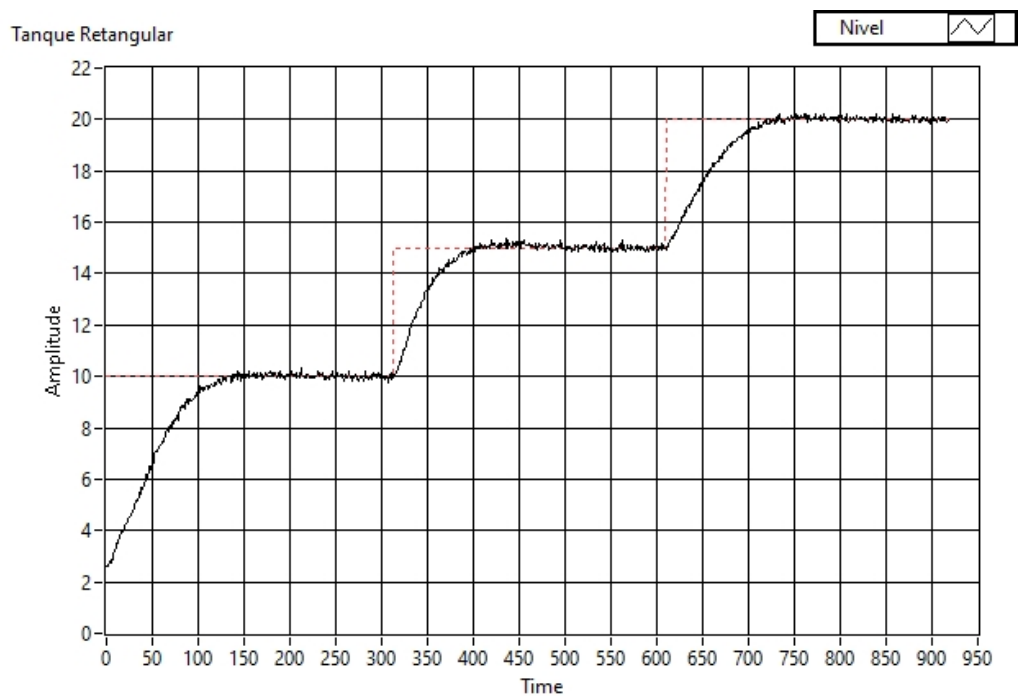


Figura 32 – Nível do tanque retangular.

Através dos gráficos de nível nota-se que, utilizando controladores PI, foi possível realizar o seguimento de referência em ambos os tanques simultaneamente, assim como seguir mudanças de referência do tipo degrau.

Devido às fontes de erros de medição, nota-se um comportamento ruidoso na curva dos níveis dos tanques, porém mesmo com esses erros, o sistema de controle foi capaz de

seguir as referências desejadas.

Os gráficos de tensão da bomba do tanque trapezoidal e da bomba do tanque retangular desse teste de controle podem ser vistos nas Figuras 33 e 34 respectivamente.

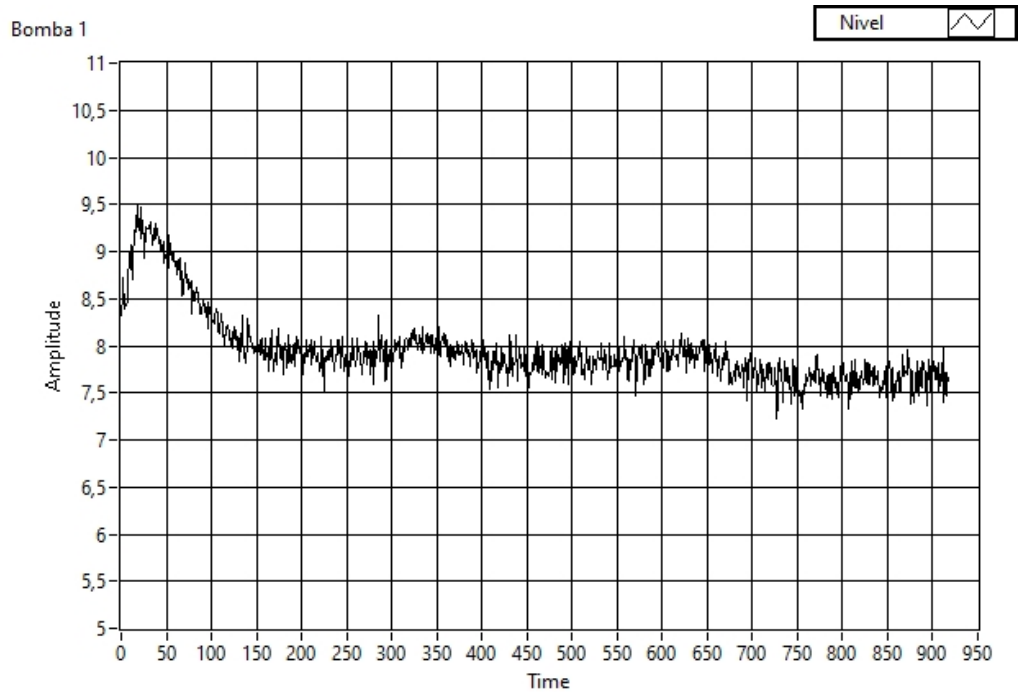


Figura 33 – Tensão da bomba do tanque trapezoidal.

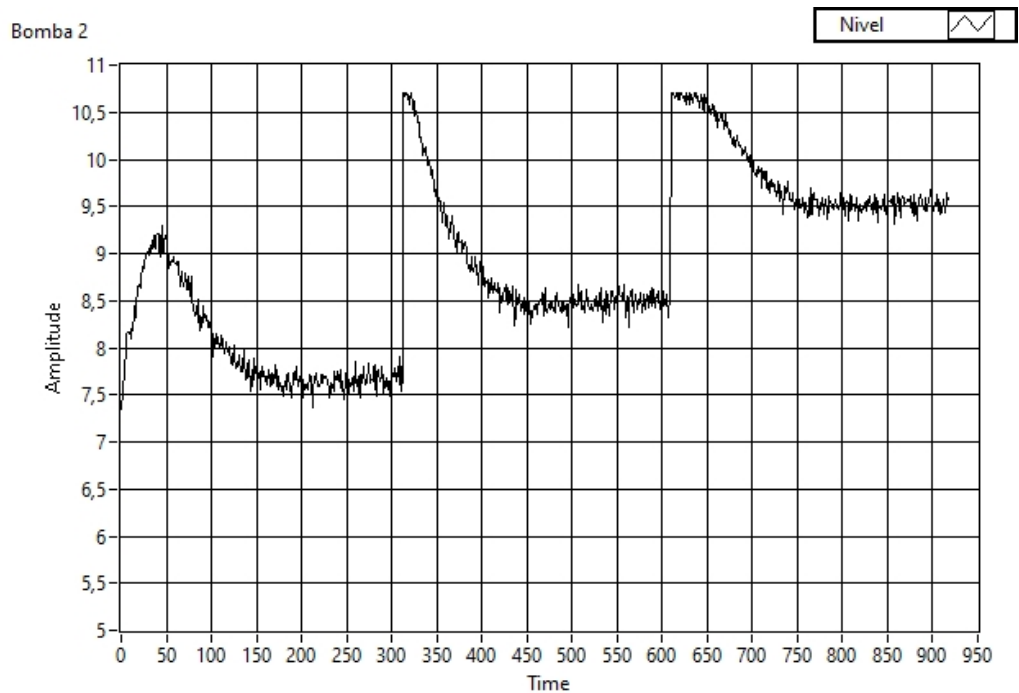


Figura 34 – Tensão da bomba do tanque retangular.

Analisando os gráficos de tensão das bombas, nota-se uma alteração na tensão necessária para manter o nível do tanque trapezoidal quando ocorre uma mudança de referência

no tanque retangular. Essa mudança se deve à relação entre a vazão de saída do tanque trapezoidal com o nível do tanque retangular discutida na Seção 3.7, assim, ao elevar o nível do tanque retangular, a vazão de saída do tanque trapezoidal diminui, fazendo com que a vazão da bomba necessária para manter o tanque em 10cm também diminua, o que causa a diminuição da tensão de saída do controlador.

O comportamento ruidoso que foi visto nas curvas de nível dos tanques, é ainda mais perceptível nas curvas de tensão. Isso se deve ao comportamento das curvas de nível, porém, como já citado, mesmo com esses erros, o sistema de controle foi capaz de seguir as referências desejadas.

#### 4.1.2 Teste 2 - referência do tanque trapezoidal de 20cm

O segundo teste foi feito utilizando uma referência de nível de 20cm para o tanque trapezoidal. Os gráficos de nível do tanque trapezoidal e do tanque retangular podem ser vistos nas Figuras 35 e 36 respectivamente.

Através dos gráficos de nível nota-se que utilizando controladores PI, foi possível realizar o seguimento de referência em ambos os tanques simultaneamente, assim como seguir mudanças de referência do tipo degrau.

Similarmente ao primeiro teste, nota-se um comportamento ruidoso na curva dos níveis dos tanques, porém mesmo com esses erros, o sistema de controle foi capaz de seguir as referências desejadas.

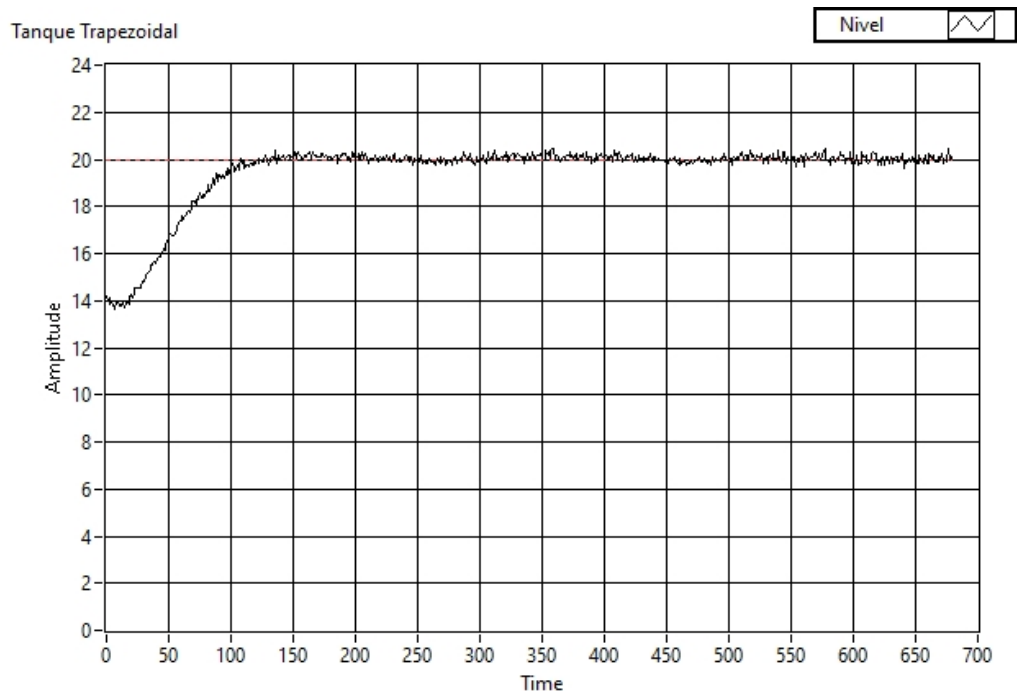


Figura 35 – Nível do tanque trapezoidal.

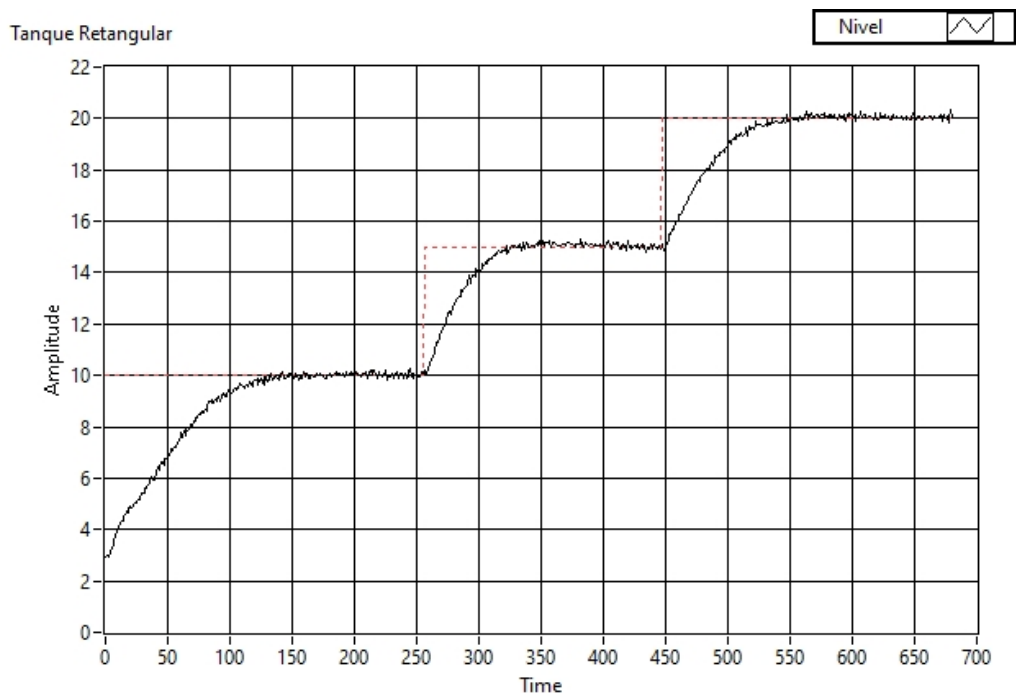


Figura 36 – Nível do tanque retangular.

Os gráficos de tensão da bomba do tanque trapezoidal e da bomba do tanque retangular desse teste de controle podem ser vistos nas Figuras 37 e 38 respectivamente.

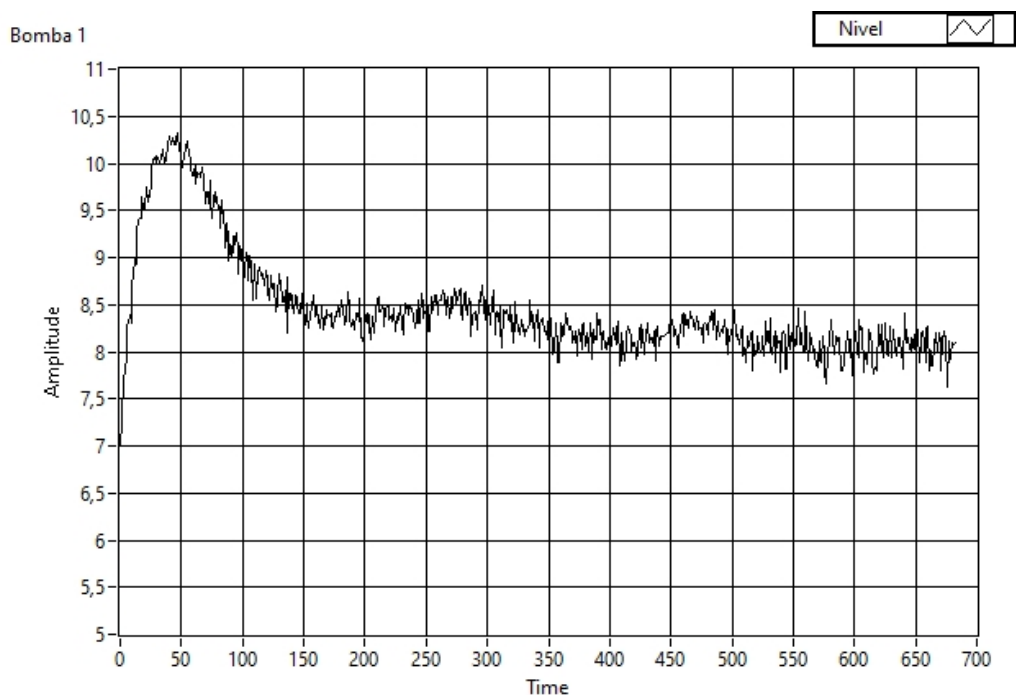


Figura 37 – Tensão da bomba do tanque trapezoidal.



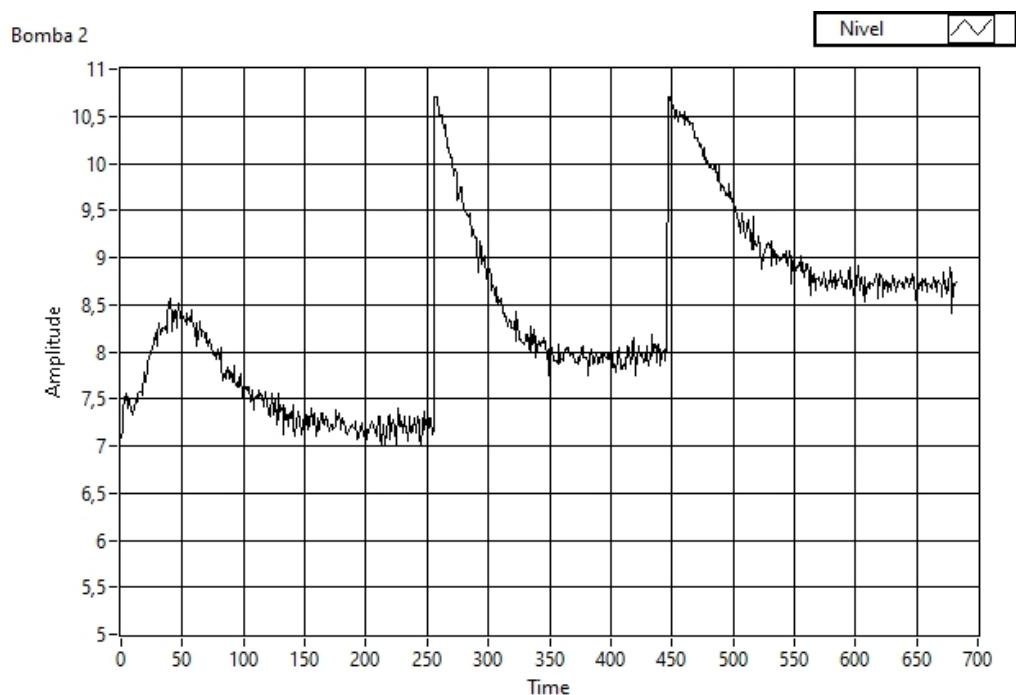


Figura 38 – Tensão da bomba do tanque retangular.

Observando os gráficos de tensão da bombas, nota-se que assim como nos testes com referência de nível do tanque trapezoidal de  $10\text{cm}$  e  $15\text{cm}$ , há uma alteração na tensão necessária para manter o nível desse tanque quando ocorre uma mudança de referência no tanque retangular, e também um comportamento ruidoso devido aos ruídos das leituras de nível.

Nos dois testes realizados, os controladores foram capazes de seguir as referências desejadas e as mudanças de referências do tipo degrau. Isso mostra que os controladores PI são suficientes para controlar o sistema de dois tanques.

## 4.2 Controladores PI em Sistema com Perturbação de Entrada

Após confirmar a capacidade dos controladores PI de atuar no sistema sem perturbações, um teste para observar a efetividade desses controladores em um sistema com perturbação foi realizado, para isso foram inseridas perturbações artificiais na saída dos controladores.

O teste se inicia sem adição de perturbação e quando o sistema chegou nos níveis desejados, perturbações de  $+1\text{V}$  foram inseridas e após o sistema se re-estabilizar, essas perturbações foram retiradas.

Os gráficos de nível do tanque trapezoidal e do tanque retangular resultantes do teste podem ser vistos nas Figuras 39 e 40 respectivamente.

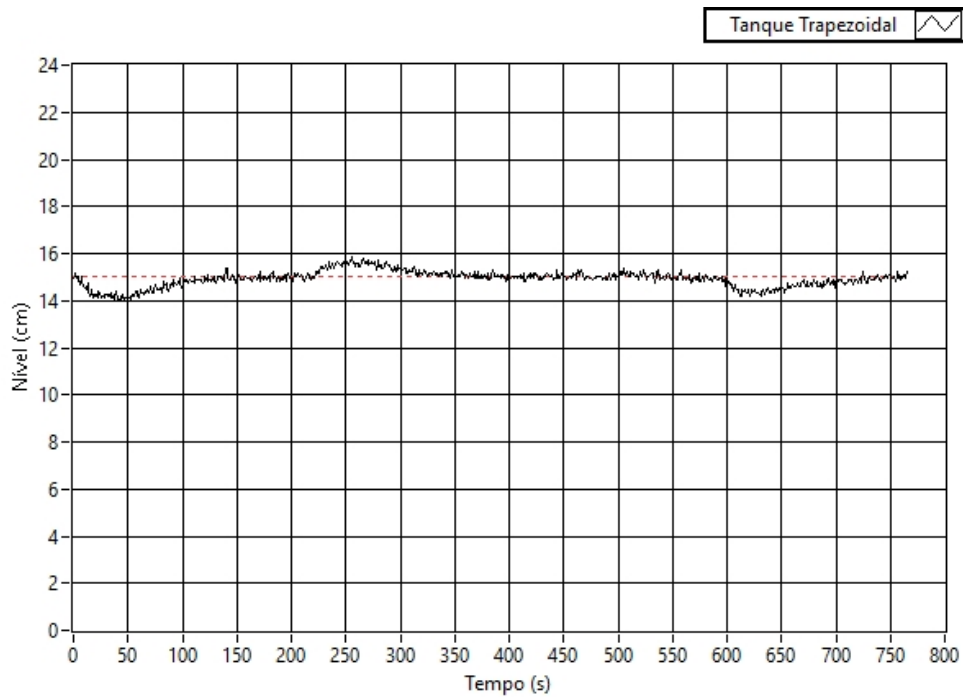


Figura 39 – Nível do tanque trapezoidal.

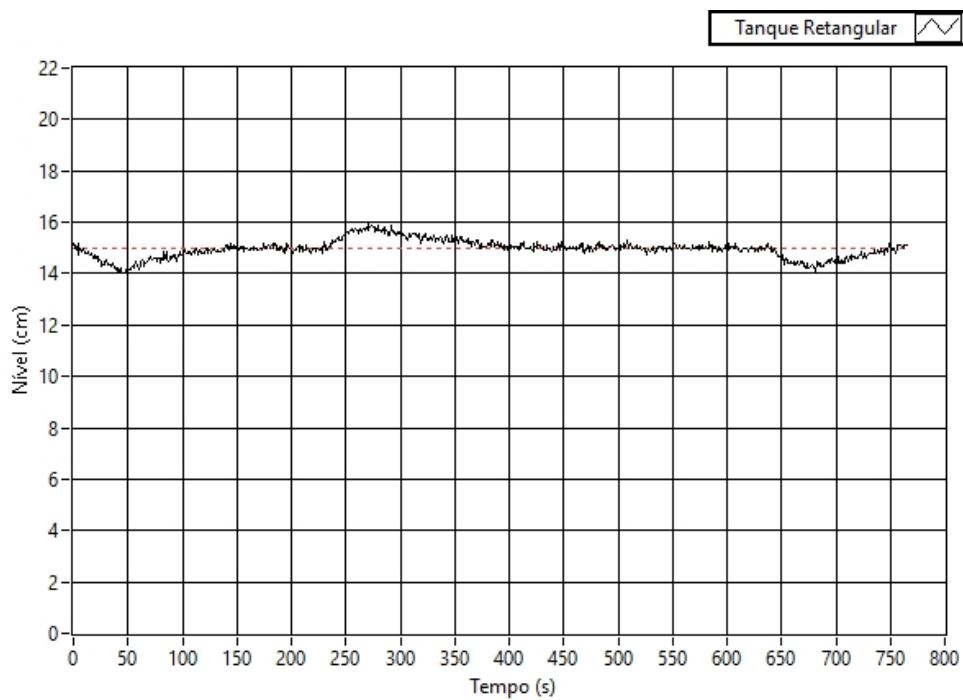


Figura 40 – Nível do tanque retangular.

Os gráficos de nível mostram que os controladores PI são capazes de lidar com as perturbações inseridas no sistema, o sistema segue as referências desejadas mesmo após inserir e retirar as perturbações.

Os gráficos de tensão das saída do controlador do tanque trapezoidal e das saída do controlador do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 41 e 42.

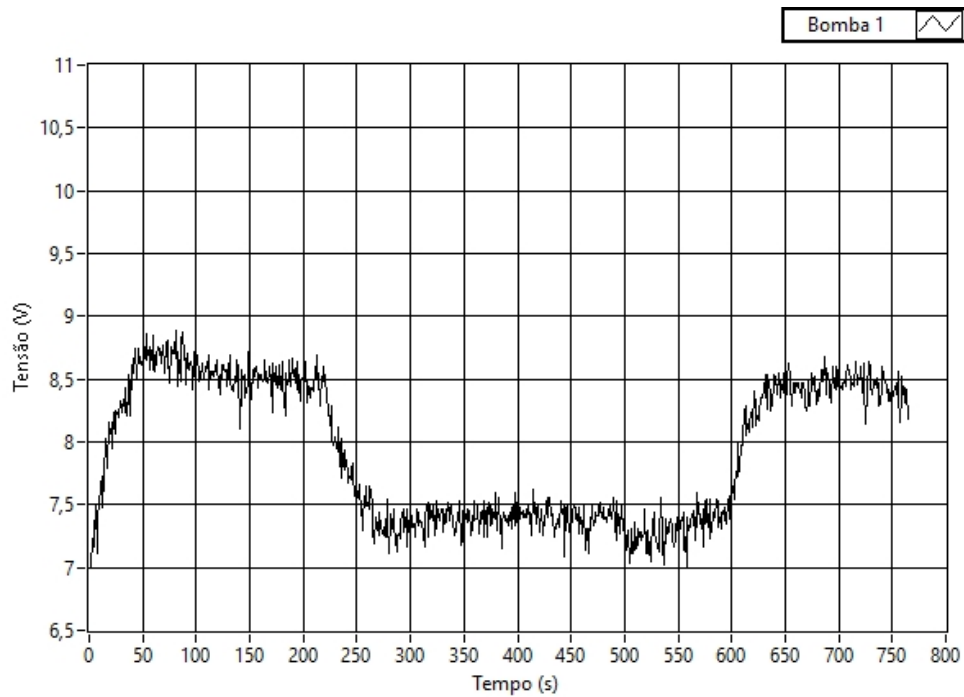


Figura 41 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal.

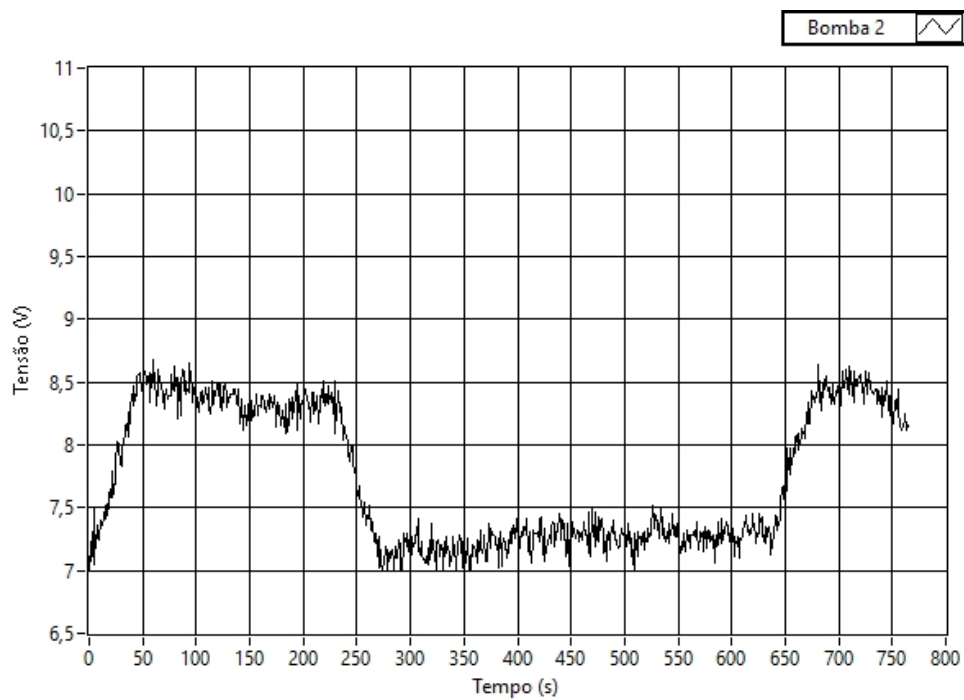


Figura 42 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular.

Observando as curvas de tensão, nota-se que para conseguir manter os tanques nos níveis desejados, os sinais de controle diminuíram 1V. Essa diminuição, somada às perturbações inseridas, fazem com que as tensões que chegam nas bombas antes e depois de inserir as perturbações sejam do mesmo valor.

O resultados desse teste mostram que além de realizar seguimento de referência no

sistema de dois tanques, os controladores PI são capazes de rejeitar perturbações inseridas no sistema.

### 4.3 Controladores PI em sistema com Atraso

Para analisar a efetividade dos controladores PI no sistema com atrasos, foram realizados testes onde atrasos artificiais foram inseridos no sistema de atuação através de blocos do *LabView*, os blocos de atraso foram inseridos nas saídas do controladores. Nas seções a seguir serão demonstrados e discutidos os testes dos controladores PI no sistema com atraso.

#### 4.3.1 Testes com variação de tempo de atraso

Primeiramente foram feitos quatro testes, onde as referência de nível de ambos os tanques eram de 15 cm, porém variando o tempo de atraso aplicado em cada um dos testes. O primeiro teste foi feito sem atraso, e os subsequentes foram feitos com atrasos de 10, 15 e 20 segundos.

##### 4.3.1.1 Teste em sistema sem atraso

De maneira a ter uma base para comparação, um primeiro teste foi feito visando controlar o sistema de dois tanques sem adicionar o atraso artificial. Os gráficos de nível do tanque trapezoidal e do tanque retangular podem ser vistos nas Figuras 43 e 44.

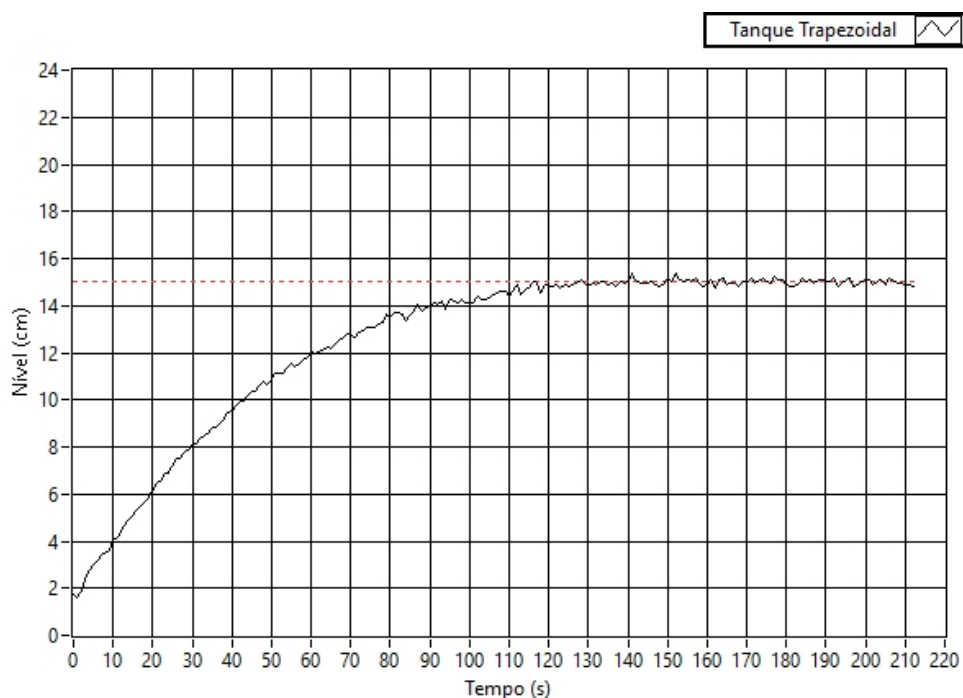


Figura 43 – Nível do tanque trapezoidal.

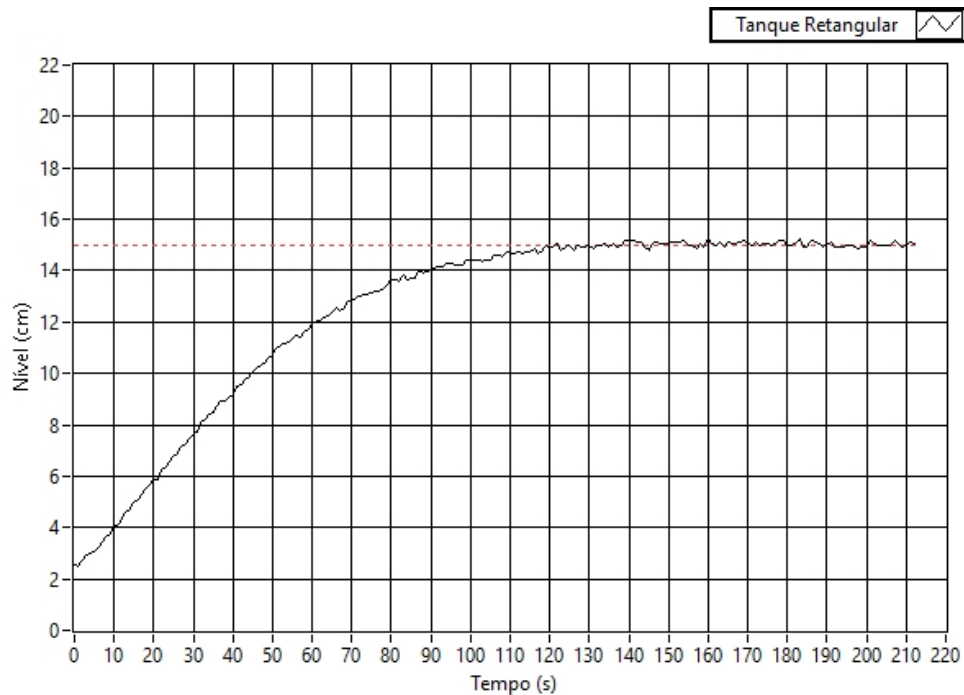


Figura 44 – Nível do tanque retangular.

Como já era esperado, os controladores PI foram capazes de seguir a referência desejada. Como já comentado em seções anteriores, devido aos erros da leitura de nível, as curvas de nível apresentam comportamento ruidoso, apesar disso, após chegar ao valor de referência, os níveis se mantêm estáveis.

Os gráficos de tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal e de saída do controlador do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 45 e 46 respectivamente.

Assim como as curvas de nível, as curvas de tensão dos controladores apresentam comportamentos ruidosos, porém se mantêm estáveis quando o sistema está na referência desejada.

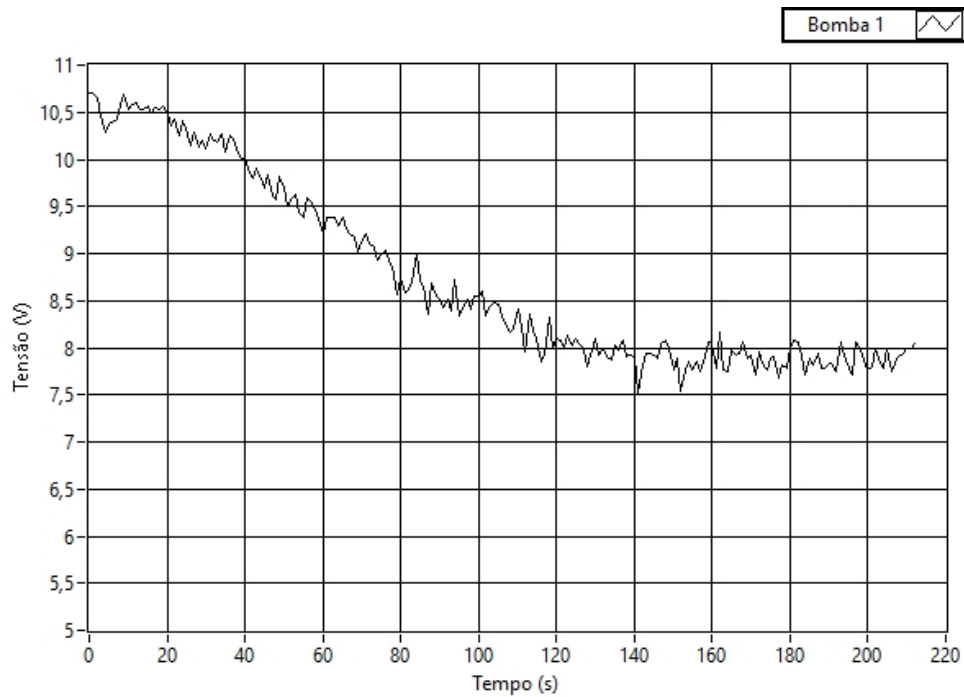


Figura 45 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal.

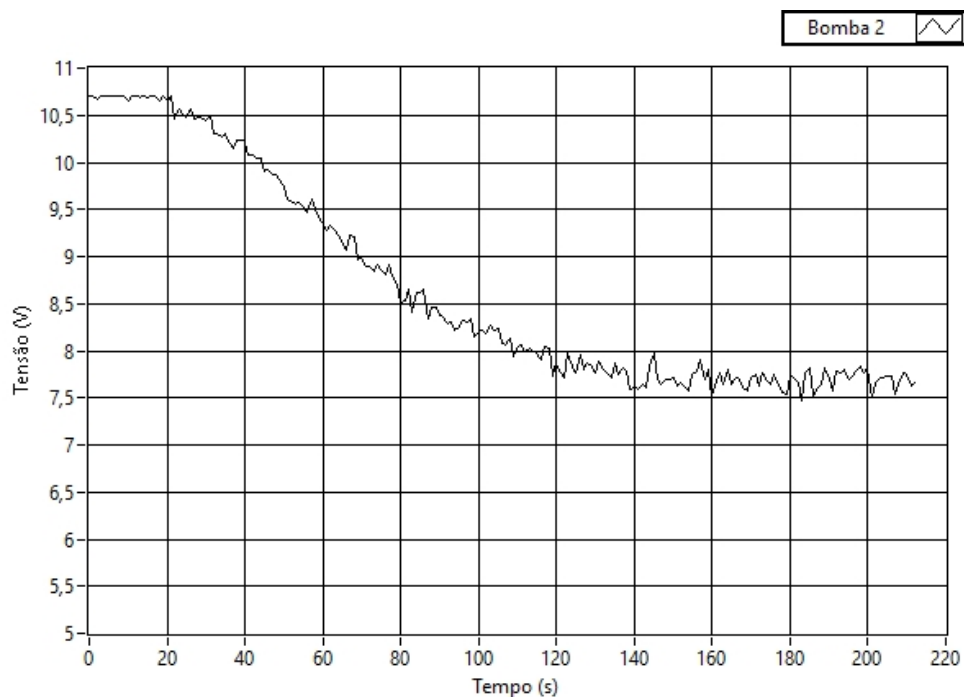


Figura 46 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular.

#### 4.3.1.2 Teste em sistema com 10s de atraso

Em sequência ao primeiro teste, foi adicionado no sistema um atraso artificial de 10s. Os gráficos de nível do tanque trapezoidal e do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 47 e 48 respectivamente.

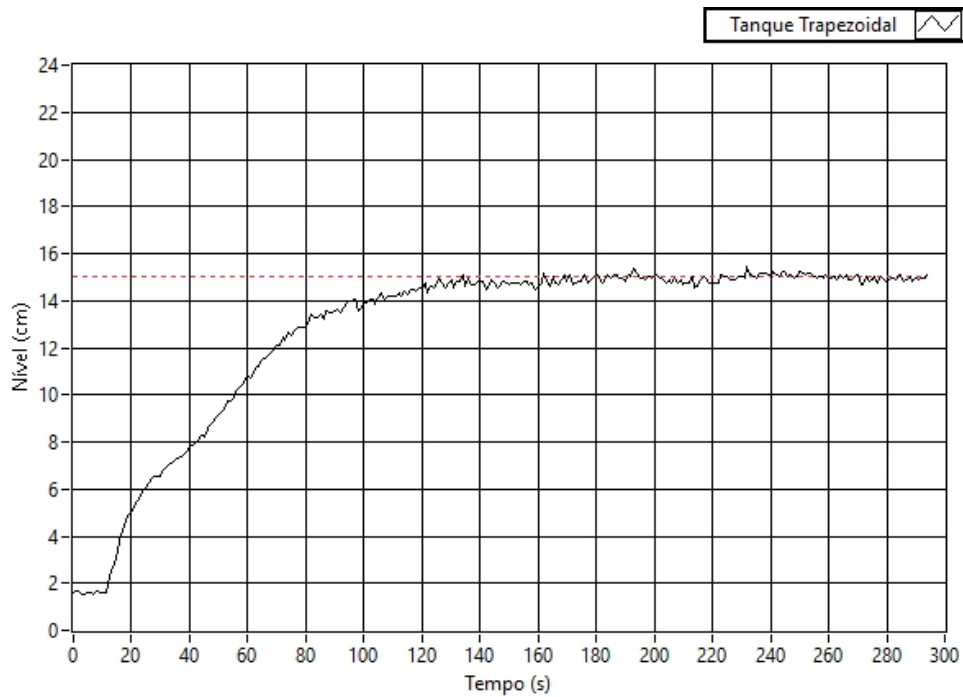


Figura 47 – Nível do tanque trapezoidal.

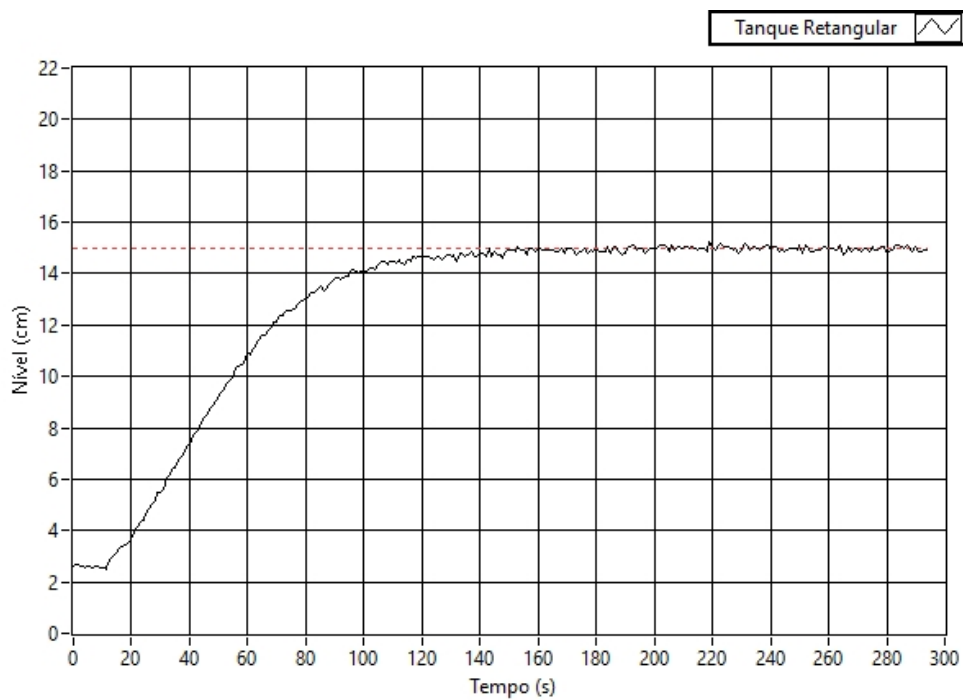


Figura 48 – Nível do tanque retangular.

Pode-se observar que inicialmente o nível dos tanques se mantêm parado, esse comportamento é esperado devido ao atraso no sinal de controle, fazendo com que os primeiros sinais de controle só cheguem às bombas após 10 segundos do início do teste.

O efeito do atraso é mais visível na curva de nível do tanque trapezoidal, onde é possível enxergar pequenas oscilações, apesar disso o sistema é capaz de se manter muito

próximo da referência desejada.

Os gráficos de tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal e de saída do controlador do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 49 e 50 respectivamente.

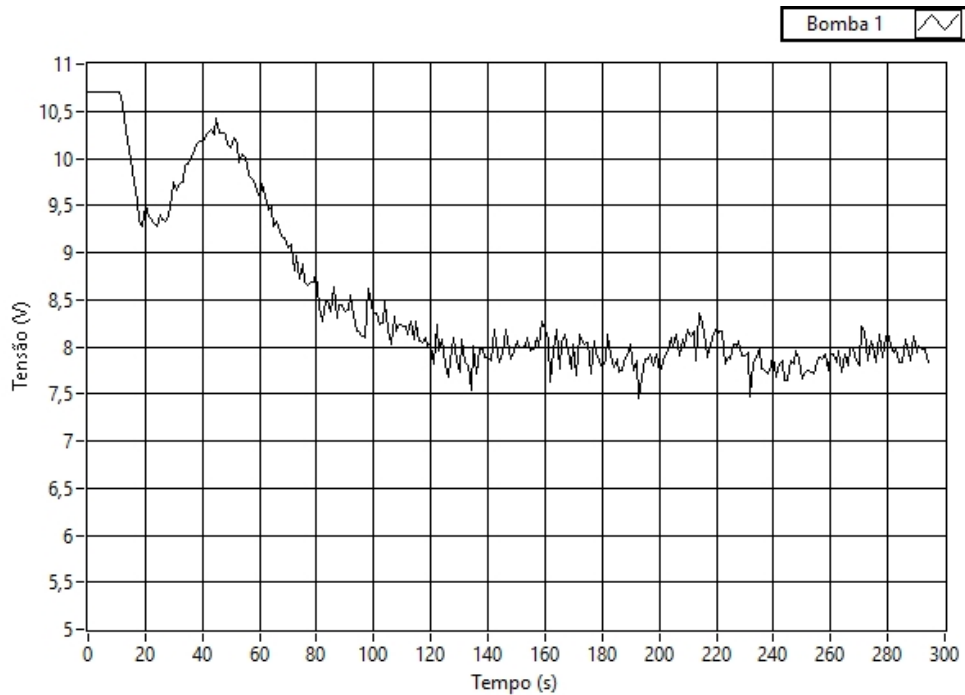


Figura 49 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal.

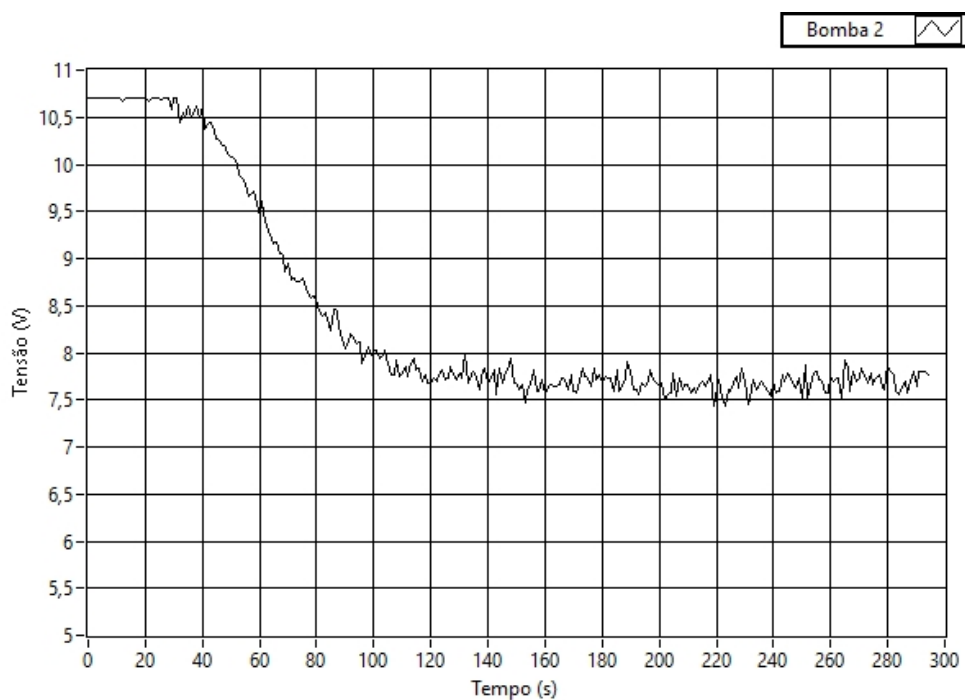


Figura 50 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular.



As curvas de tensão dos controladores também mostram efeitos do atraso. Assim como no gráfico de nível, é possível observar oscilações no gráfico de tensão do tanque trapezoidal.

Apesar de visíveis, os efeitos dos atrasos de 10 segundos não são grandes o suficientes para fazer com que o sistema não siga as referências desejadas.

#### 4.3.1.3 Teste em sistema com 15s de atraso

Visto que inserindo um atraso de 10 segundos os controladores PI foram capazes de controlar o sistema, foi optado por realizar um teste onde os atrasos inseridos eram de 15 segundos, para assim observar como um atraso maior afetaria o sistema. Os gráficos de nível do tanque trapezoidal e do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 51 e 52 respectivamente.

Ao inserir um atraso de 15 segundos, as curvas de nível apresentam efeitos maiores em comparação aos do teste anterior. A curva do tanque trapezoidal apresenta oscilações maiores e a curva do tanque retangular, que no teste anterior não se era percebido oscilações, apresenta pequenas oscilações, apesar disso o nível desse tanque é mantido muito próximo da referência desejada.

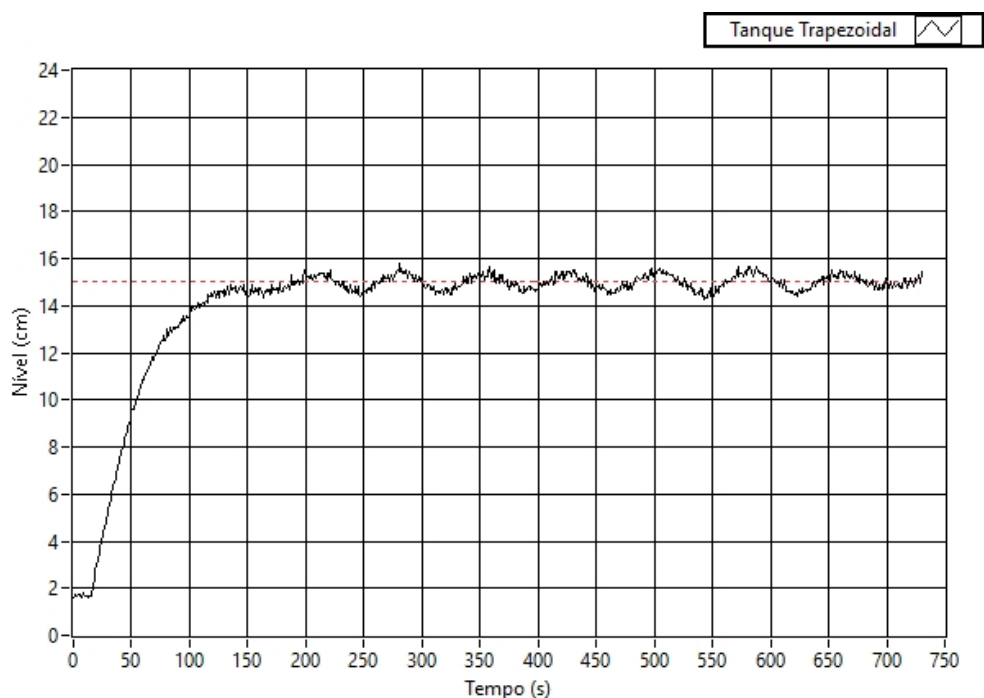


Figura 51 – Nível do tanque trapezoidal.

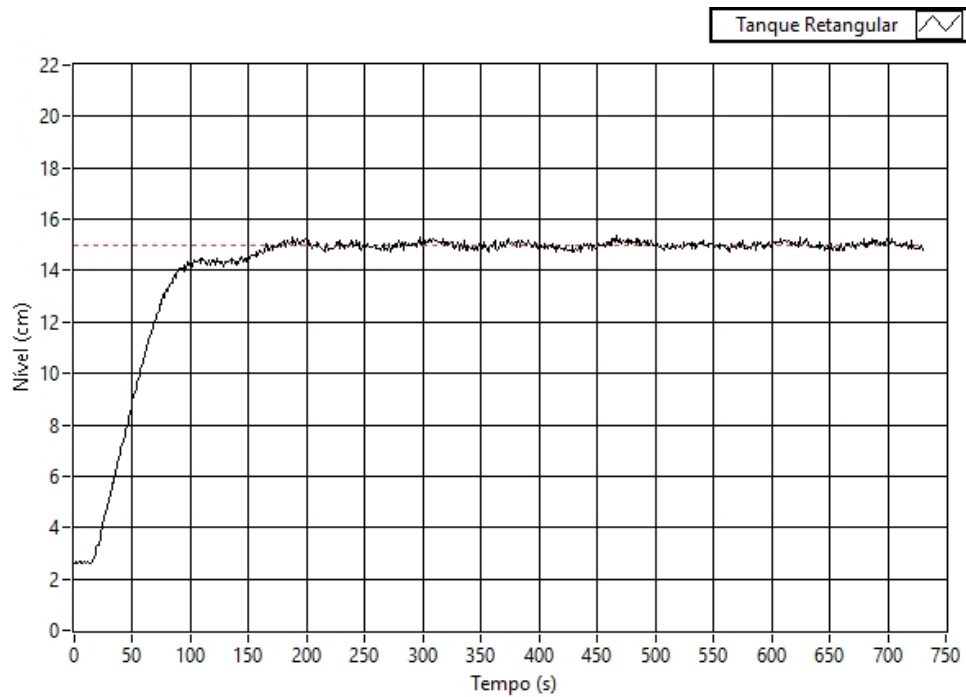


Figura 52 – Nível do tanque retangular.

Os gráficos de tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal e de saída do controlador do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 53 e 54 respectivamente.

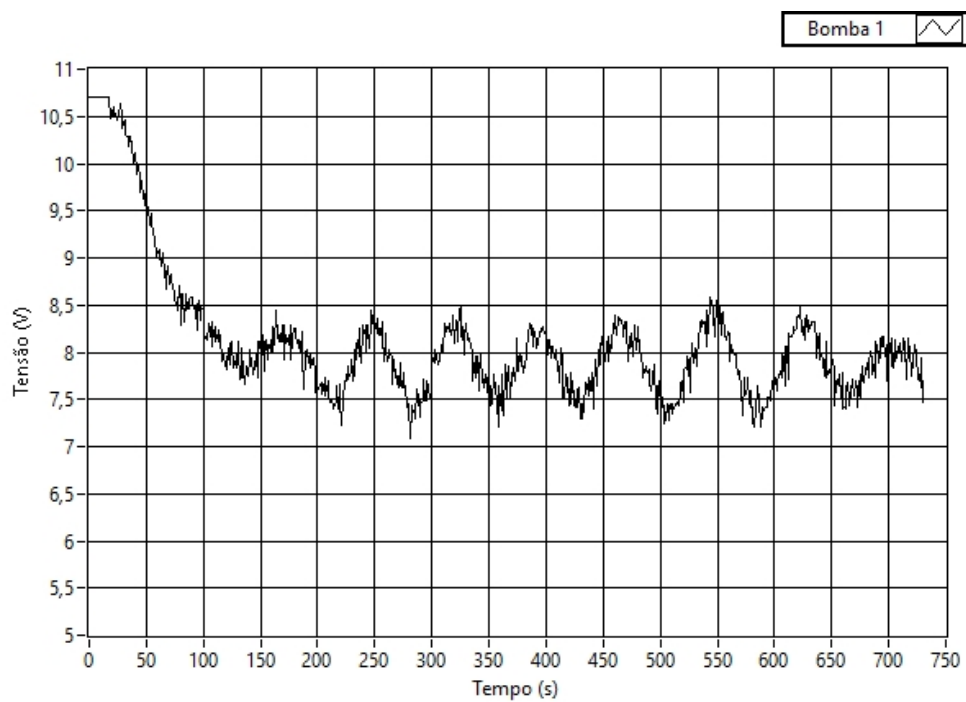


Figura 53 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal.

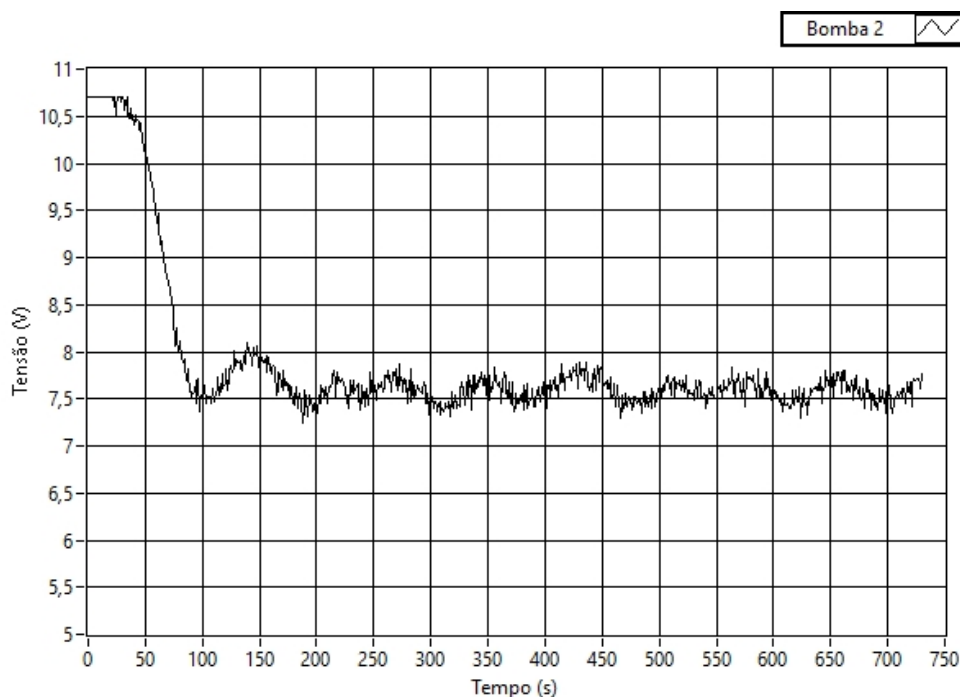


Figura 54 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular.

As curvas de tensão dos controladores também mostram efeitos maiores do atraso. É possível observar oscilações consideráveis no sinal de controle do tanque retangular e um grande aumento na amplitude das oscilações do sinal de controle do tanque trapezoidal, quando comparados com o teste anterior.

Apesar dos efeitos dos atrasos de 15 segundos serem maiores, ainda não são suficientes para fazer com que o nível do tanque retangular não siga as referências desejadas.

#### 4.3.1.4 Teste em sistema com 20s de atraso

Visto que inserindo um atraso de 15 segundos o sistema de controle ainda foi capaz de controlar o nível do tanque retangular, foi optado por realizar um teste onde os atrasos inseridos eram de 20 segundos, para assim observar como um atraso ainda maior afetaria o sistema. Os gráficos de nível do tanque trapezoidal e do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 55 e 56 respectivamente.

O atraso de 20 segundos inserido, fez com que as curvas de nível apresentassem efeitos maiores ainda em comparação aos dos testes anteriores. A curva do tanque trapezoidal apresenta oscilações ainda maiores e a curva do tanque retangular apresenta oscilações consideráveis, fazendo com que os níveis não se mantenham tão próximos das referências desejadas.

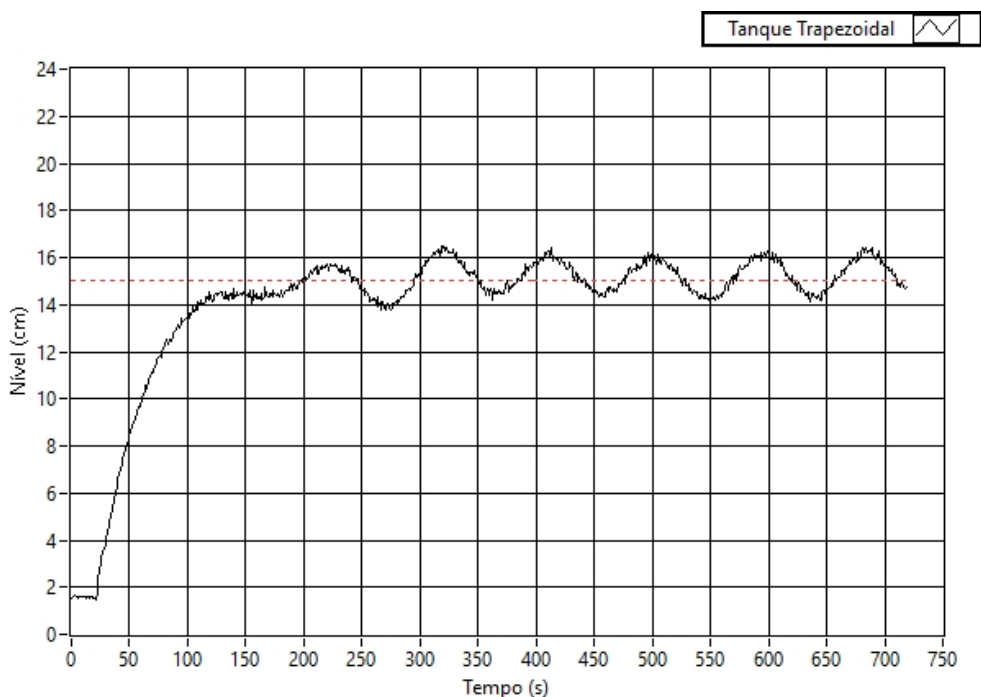


Figura 55 – Nível do tanque trapezoidal.

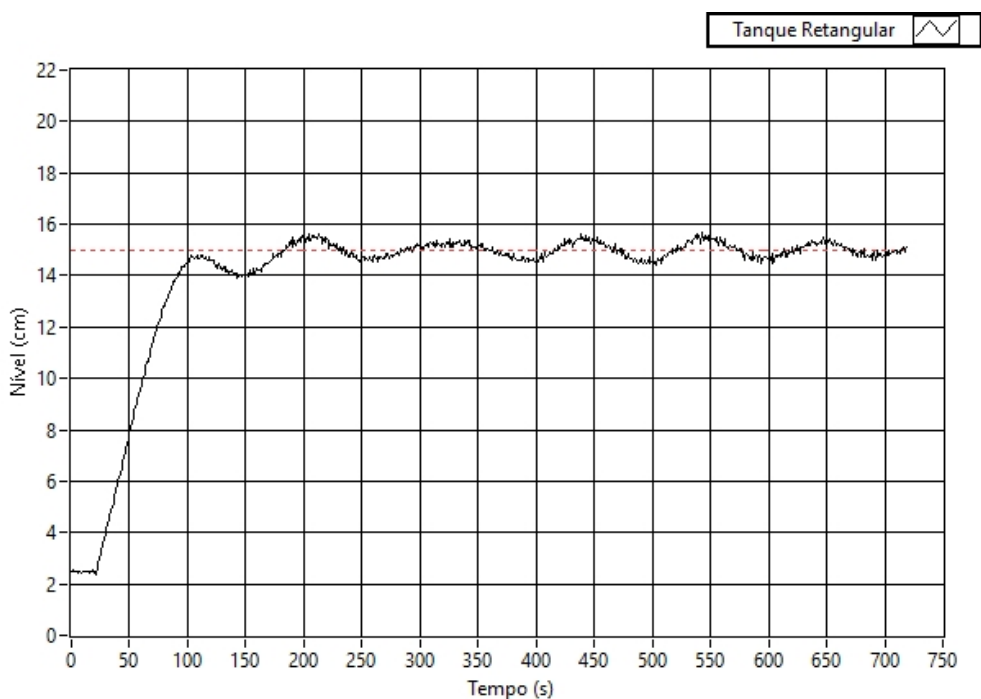


Figura 56 – Nível do tanque retangular.

Os gráficos de tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal e de saída do controlador do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 57 e 58 respectivamente.

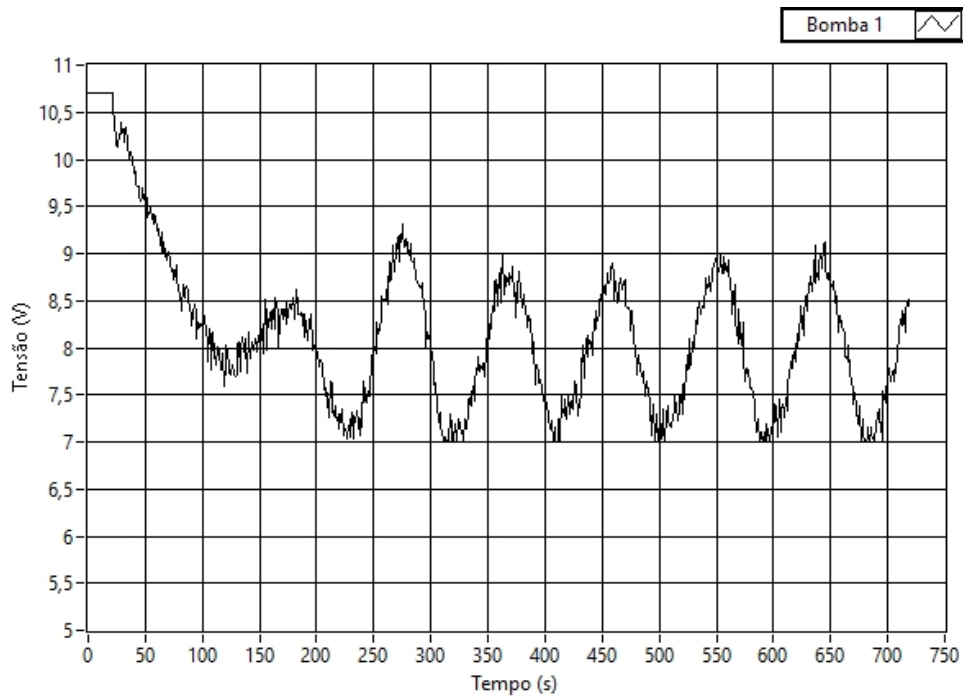


Figura 57 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal.

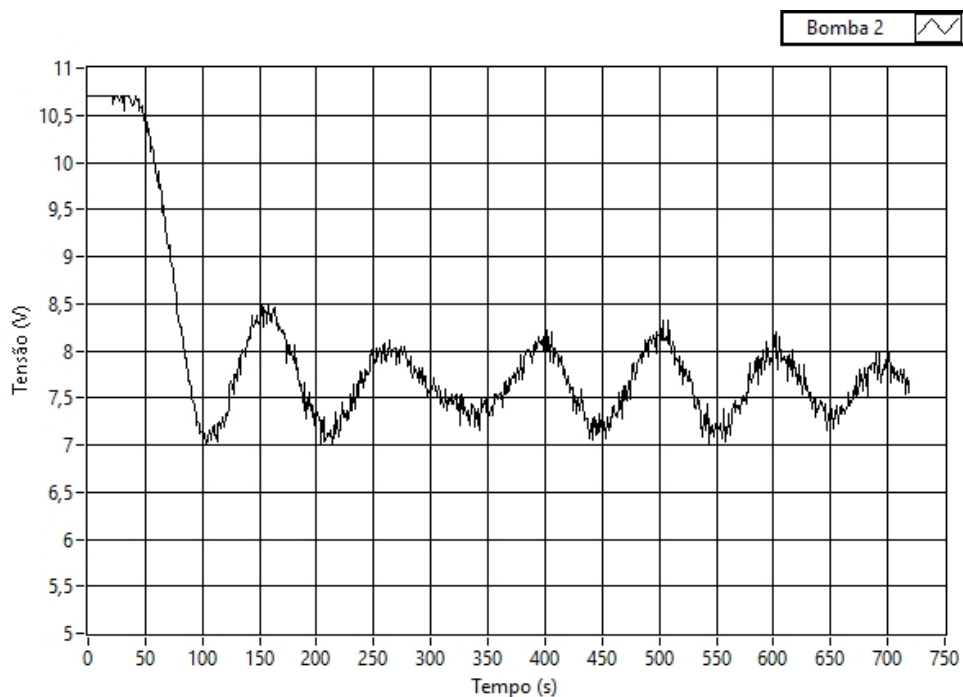


Figura 58 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular.

As curvas de tensão dos controladores também mostram efeitos maiores do atraso. Ambos os sinais de controle apresentam oscilações de amplitudes maiores, quando comparados aos testes anteriores.

Tendo em vista que o teste com atraso de 20 segundos foi o que mais mostrou efeitos negativos no sistema de controle, foi optado por manter esse valor de atraso para os testes

realizados nas próximas seções.

## 4.4 Controle PI com Preditor de Smith

Sabendo que os controladores PI não eram suficientes para o controle do sistema quando eram inseridos atrasos de 20 segundos, foi optado por realizar testes utilizando preditores de Smith em conjunto com os controladores PI. O objetivo destes testes foi validar a eficácia dos preditores, para que assim possam ser utilizados como demonstração prática na bancada.

Primeiramente foram feitos três testes, onde as referências de nível de ambos os tanques eram de 15 cm. O primeiro teste foi feito utilizando apenas controladores PI em um sistema sem atraso, e o segundo utilizando apenas controladores PI em um sistema com atraso de 20 segundos e o terceiro utilizando controladores PI com Preditor de Smith em um sistema com atraso de 20 segundos.

### 4.4.1 Teste em sistema sem atraso

De maneira a ter uma base para comparação, um primeiro teste foi feito visando controlar o sistema de dois tanques sem adicionar o atraso artificial. Os gráficos de nível do tanque trapezoidal e do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 59 e 60 respectivamente.

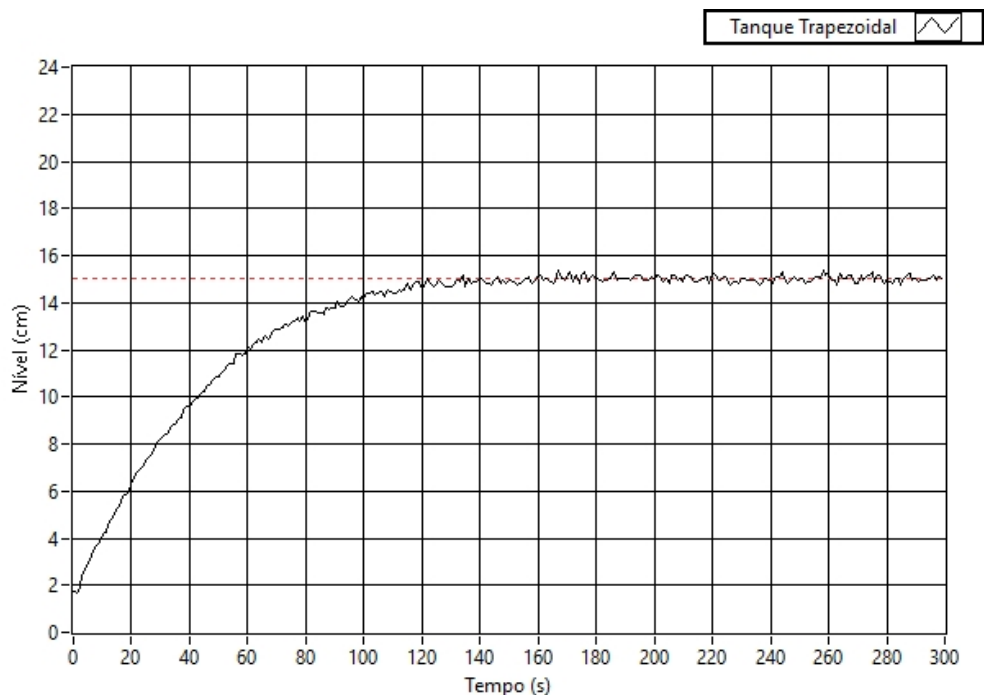


Figura 59 – Nível do tanque trapezoidal.

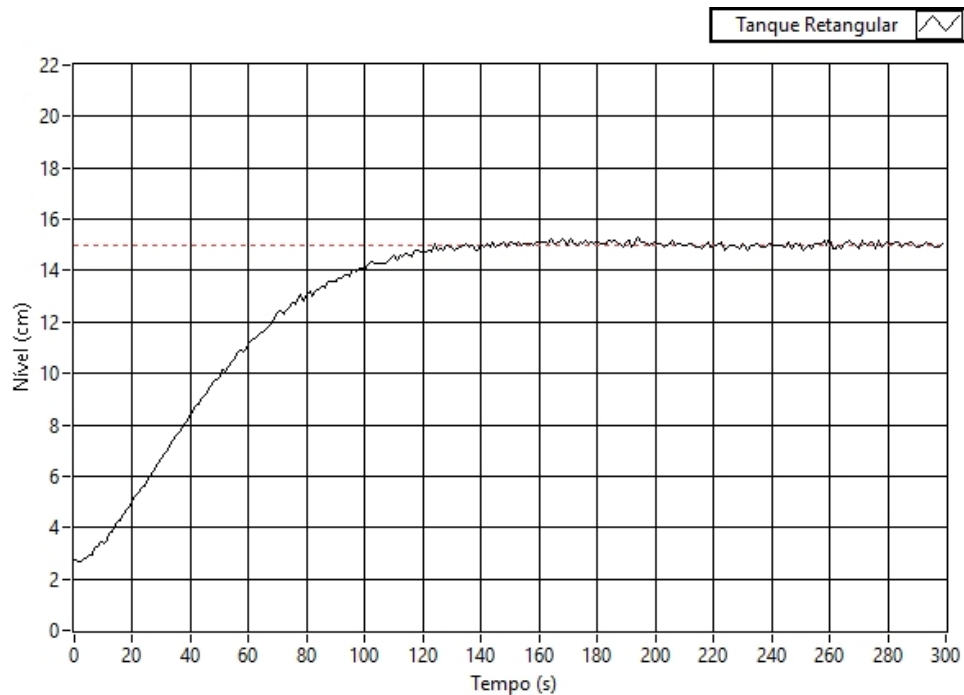


Figura 60 – Nível do tanque retangular.

Como já era esperado, os controladores PI foram capazes de seguir a referência desejada. Como já comentado em seções anteriores, devido aos erros da leitura de nível, as curvas de nível apresentam comportamento ruidoso, apesar disso, após chegar ao valor de referência, os níveis se mantêm estáveis.

Os gráficos de tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal e de saída do controlador do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 61 e 62 respectivamente.

Assim como as curvas de nível, as curvas de tensão dos controladores apresentam comportamentos ruidosos, porém se mantêm estáveis quando o sistema está na referência desejada.

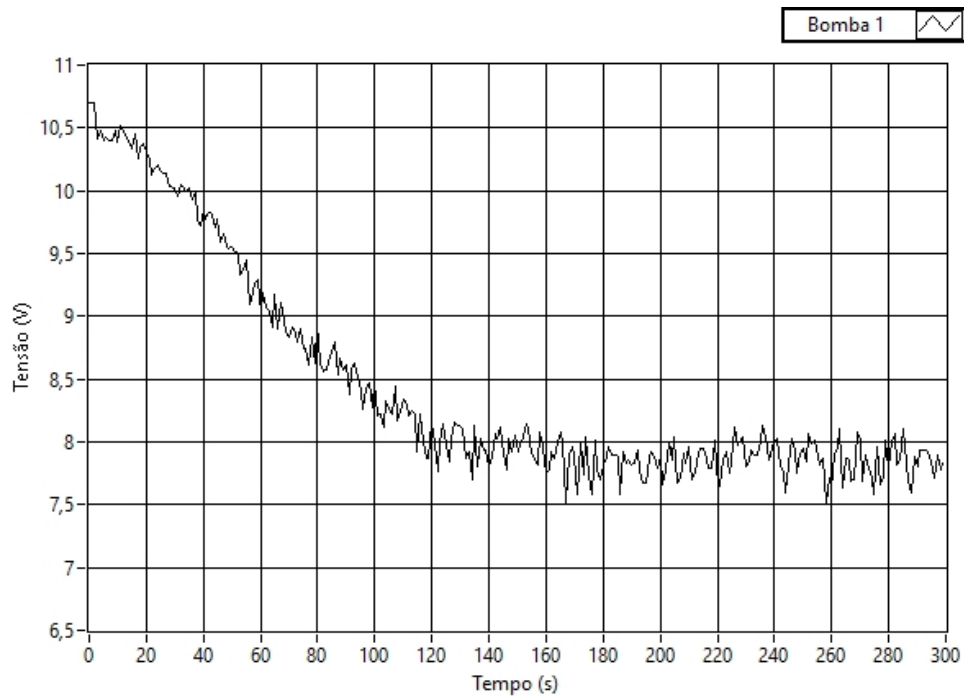


Figura 61 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal.

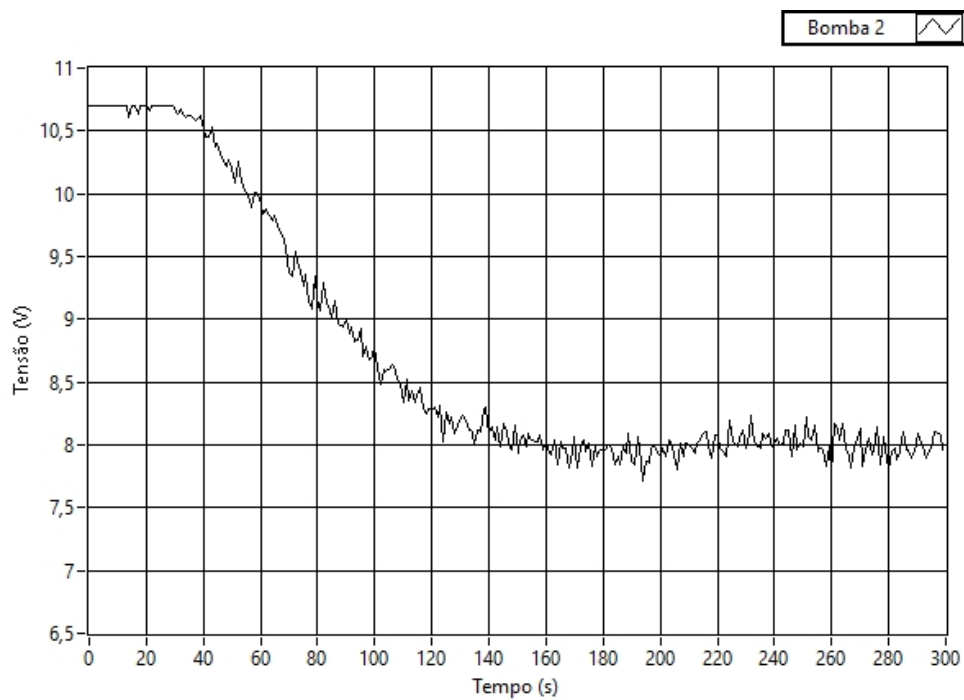


Figura 62 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular.

#### 4.4.2 Teste em sistema com atraso

Após o teste no sistema sem atraso, foi realizado um teste inserindo um atraso artificial de 20 segundos no sinal de saída dos controladores. Os gráficos de nível do tanque trapezoidal e do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 63 e 64 respectivamente.



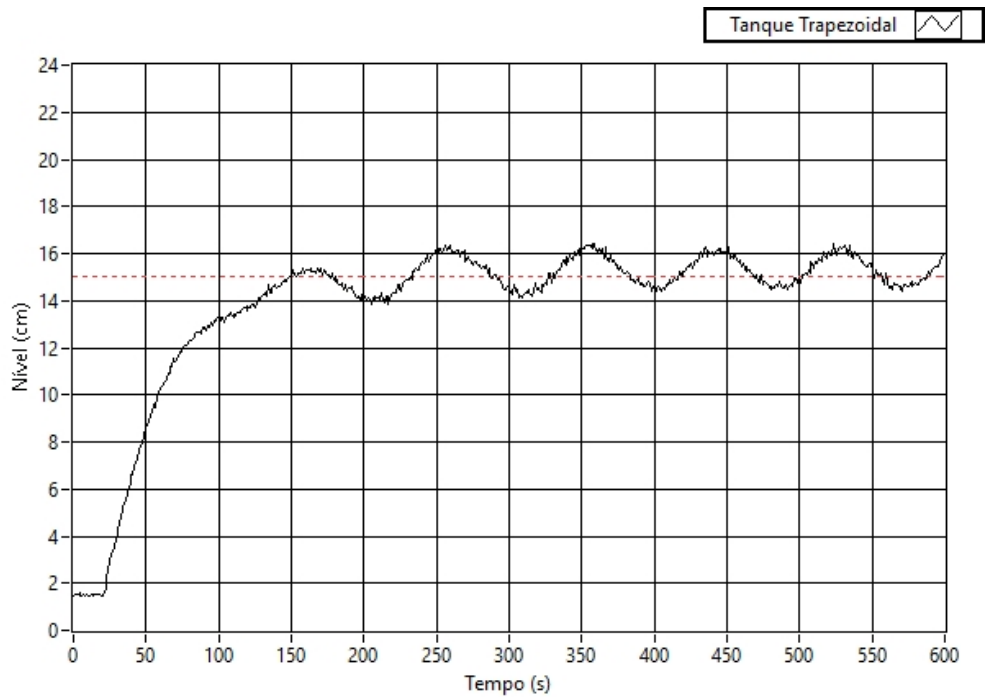


Figura 63 – Nível do tanque trapezoidal.

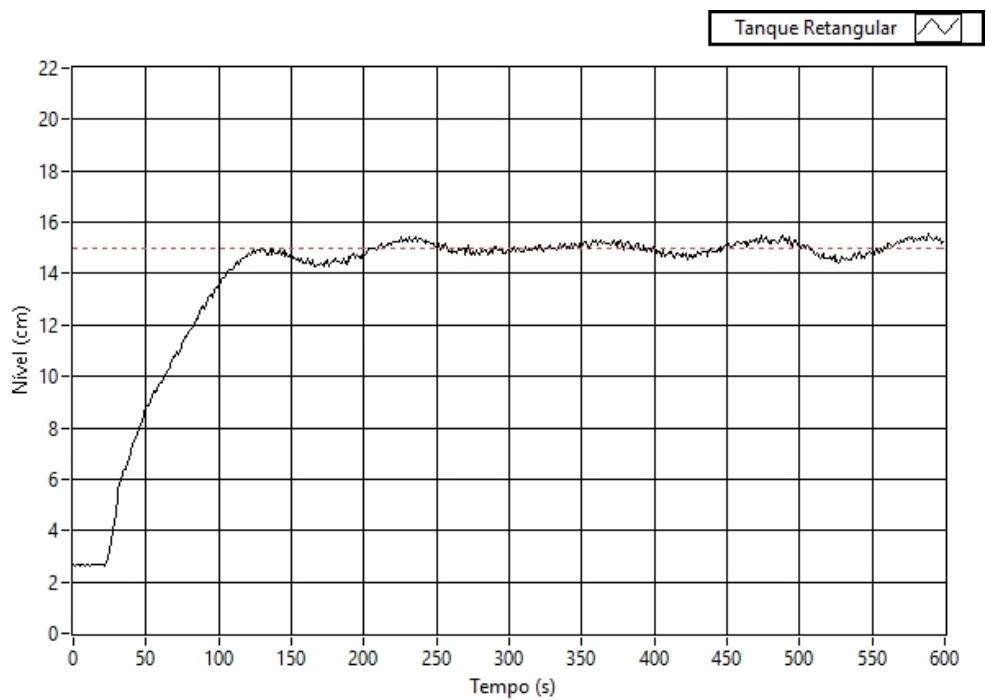


Figura 64 – Nível do tanque retangular.

Pode-se observar que inicialmente o nível dos tanques se mantém parado, esse comportamento é esperado devido ao atraso no sinal de controle, fazendo com que os primeiros sinais de controle só cheguem às bombas após 20 segundos do início do teste. A curva do tanque trapezoidal apresenta oscilações ainda maiores e a curva do tanque retangular apresenta oscilações consideráveis, fazendo com que os níveis não se mantenham tão

próximos das referências desejadas.

Os gráficos de tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal e de saída do controlador do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 65 e 66 respectivamente.

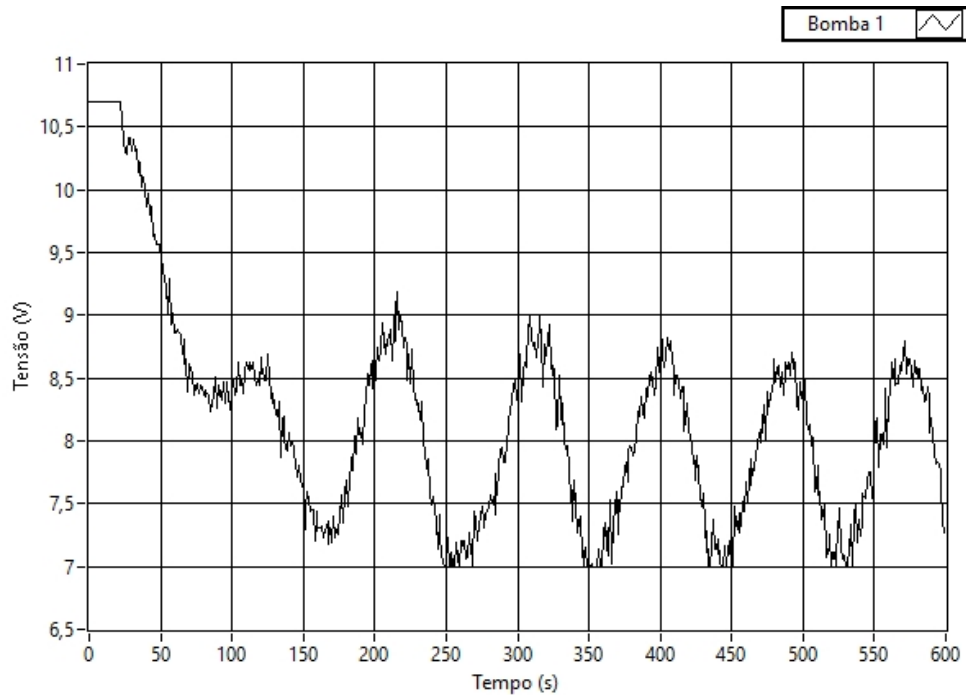


Figura 65 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal.

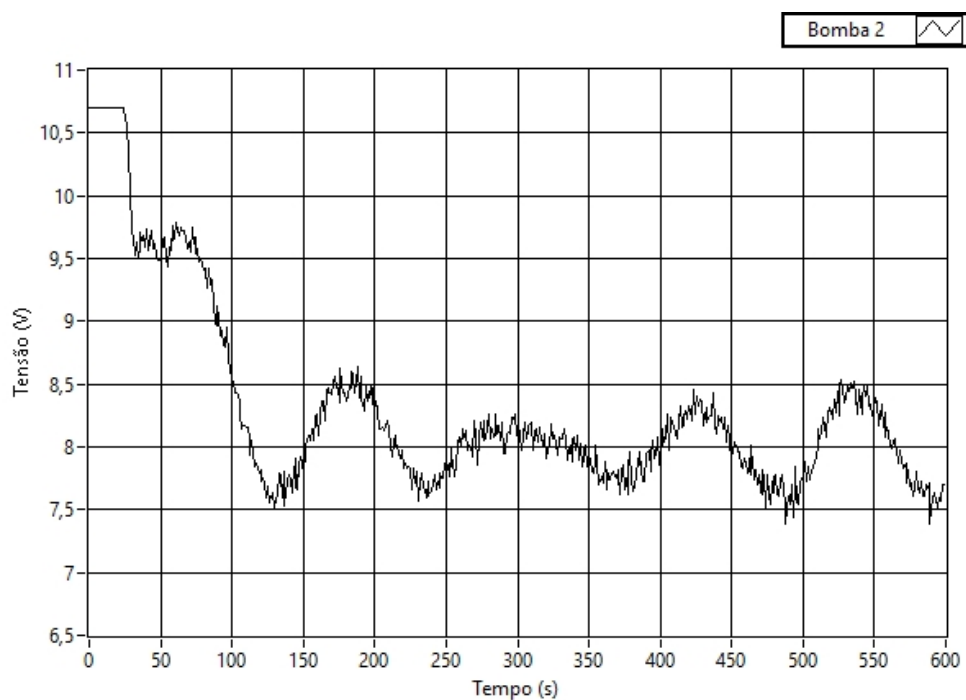


Figura 66 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular.

As curvas de tensão dos controladores também mostram efeitos grandes do atraso. Ambos os sinais de controle apresentam oscilações de amplitudes relevantes, nunca convergindo a um ponto de equilíbrio.

### 4.4.3 Teste em sistema com atraso com preditor de Smith

O terceiro teste então foi feito, no qual a estrutura de preditor de Smith foi adicionada aos controladores. Os gráficos de nível do tanque trapezoidal e do tanque retangular deste teste podem ser vistos nas Figuras 67 e 68 respectivamente.

Ao utilizar os preditores, os controladores foram capazes de realizar o seguimento de referência desejada, as curvas de nível não apresentam as oscilações causadas pelo atraso e se assemelham mais às curvas vistas no primeiro teste.

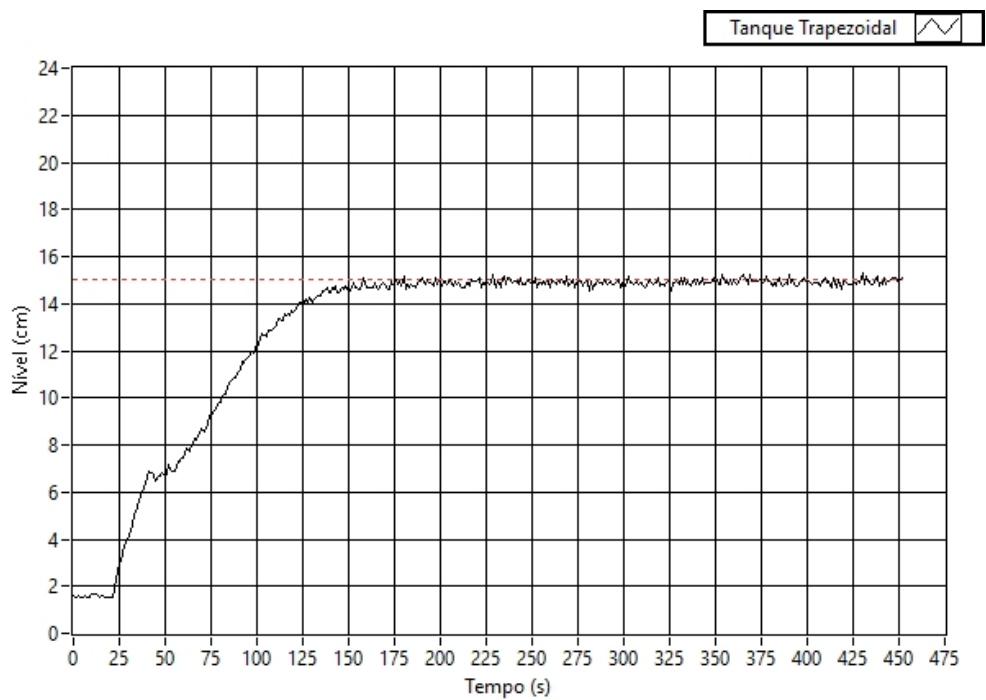


Figura 67 – Nível do tanque trapezoidal.

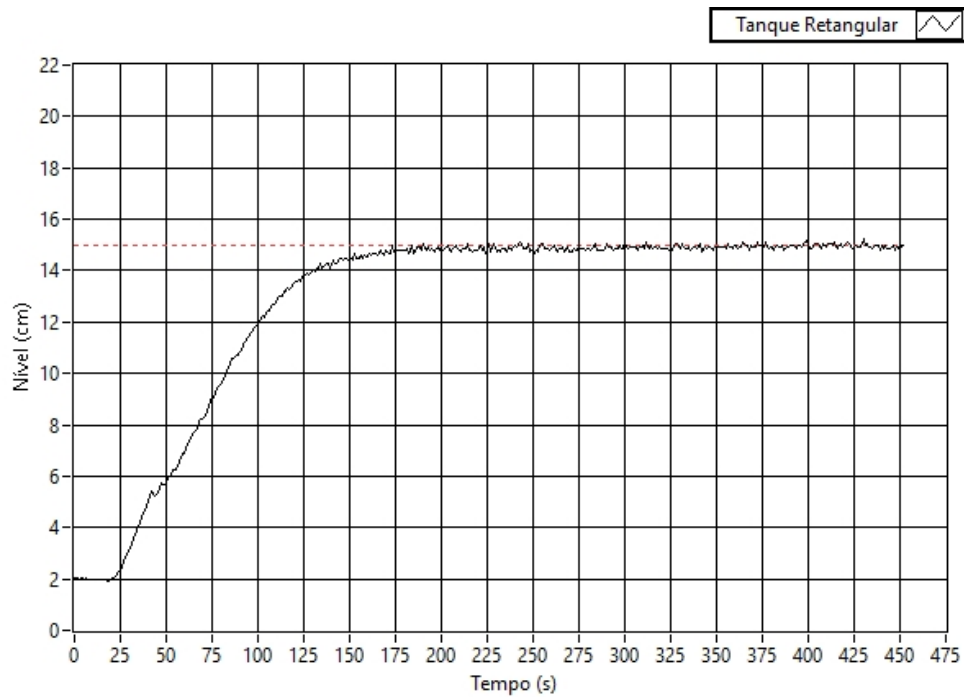


Figura 68 – Nível do tanque retangular.

Os gráficos de tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal e de saída do controlador do tanque retangular deste teste podem ser vistos nas Figuras 69 e 70 respectivamente.

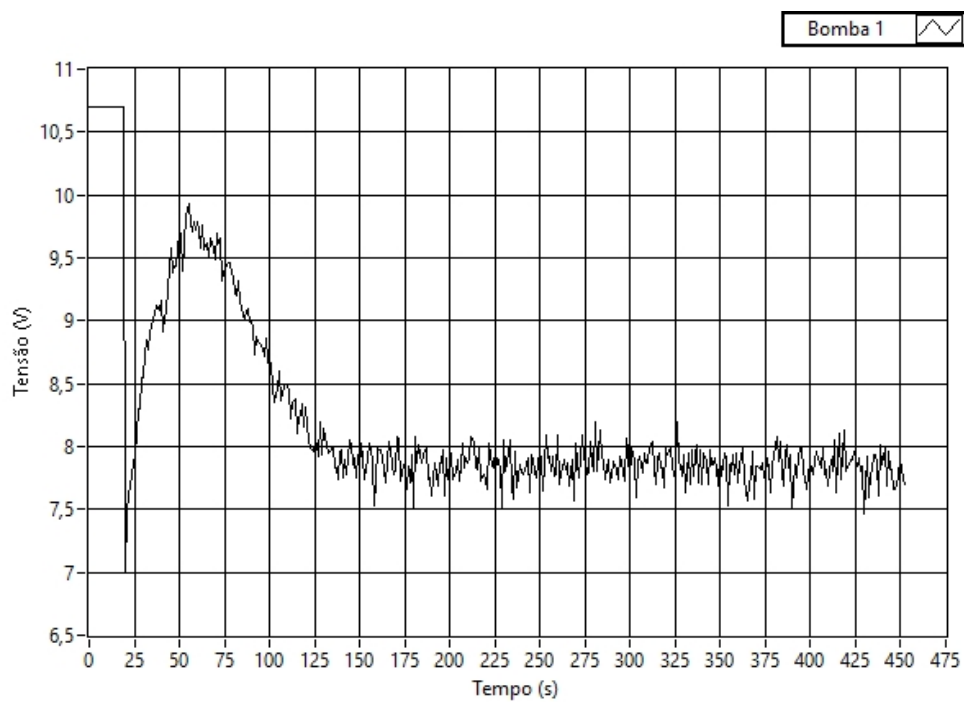


Figura 69 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal.

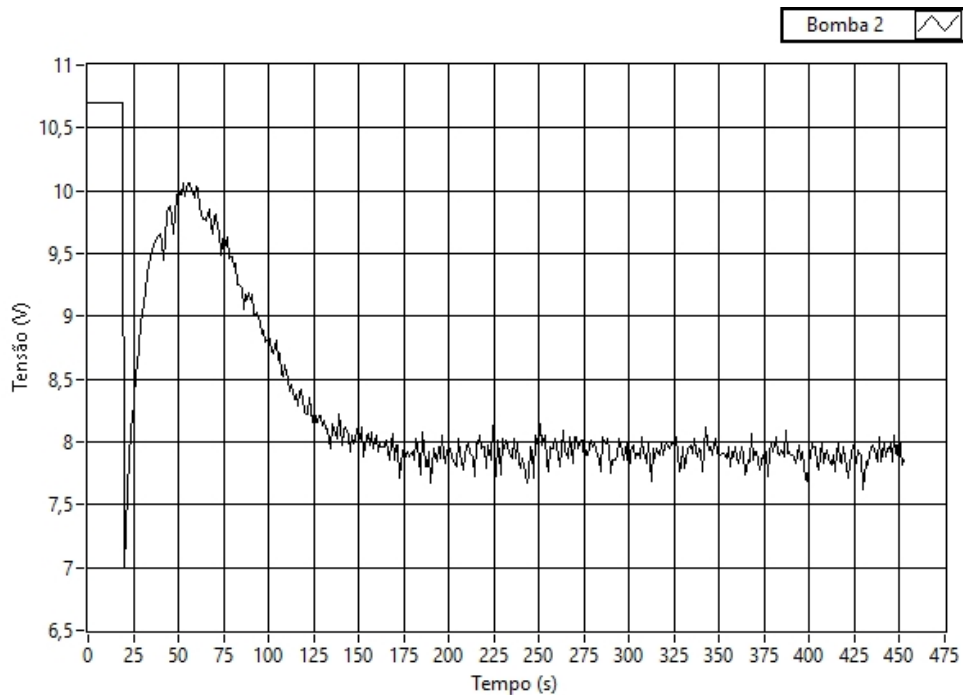


Figura 70 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular.

Assim como nas curvas de nível, ignorando o comportamento ruidoso causado pela leitura de nível, as curvas de tensão convergem a um ponto de equilíbrio. O preditor de Smith se mostrou eficaz, assim o sistema de controle PI com preditor de Smith se fez suficiente para realizar o seguimento de referência do sistema com atraso.

## 4.5 Controlador PI com Preditor de Smith em Sistema com Perturbação de Entrada e Atraso

Após confirmar a capacidade dos controladores PI com Preditor de Smith de atuar no sistema com atraso sem perturbações, um teste para observar a efetividade desses controladores em um sistema com atraso e perturbação foi realizado, para isso foram inseridas perturbações artificiais na saída dos controladores.

O teste se inicia sem adição de perturbação e quando o sistema chegou nos níveis desejados, perturbações de  $+1V$  foram inseridas e após o sistema se re-estabilizar, essas perturbações foram retiradas.

Os gráficos de nível do tanque trapezoidal e do tanque retangular resultantes do teste podem ser vistos nas Figuras 71 e 72 respectivamente.

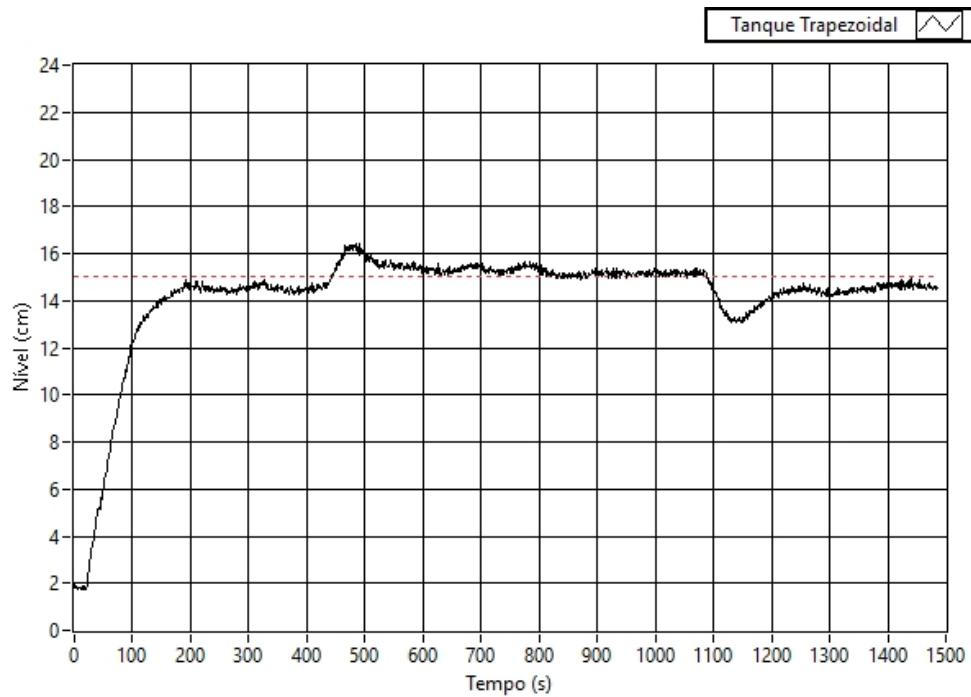


Figura 71 – Nível do tanque trapezoidal.

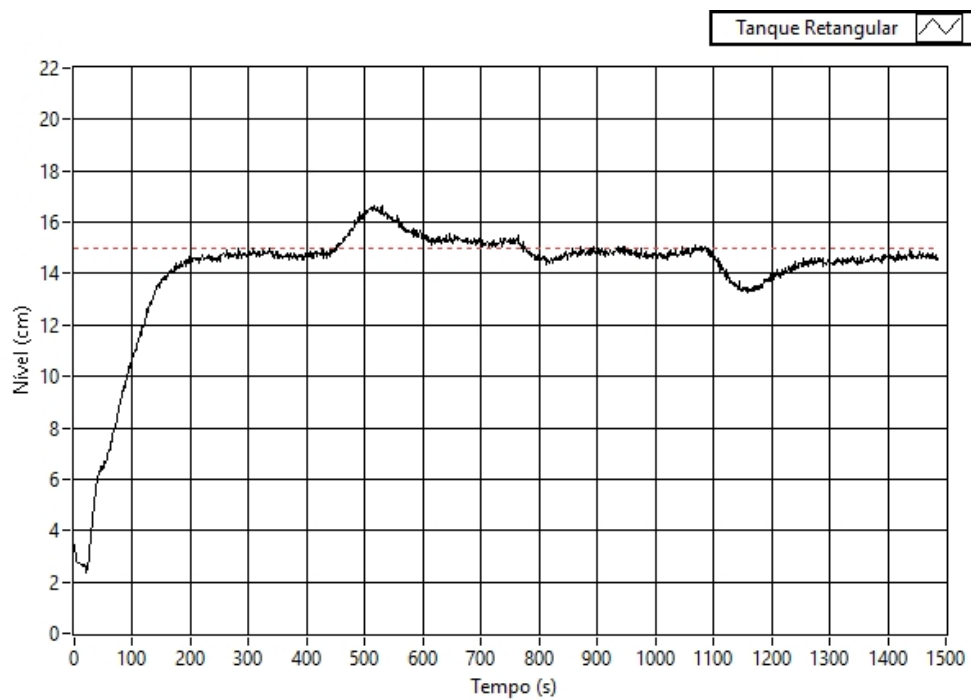


Figura 72 – Nível do tanque retangular.

Os gráficos de nível mostram que os controladores PI são capazes de lidar com as perturbações inseridas no sistema, o sistema segue as referências desejadas mesmo após inserir e retirar as perturbações.

Os gráficos de tensão das saídas do controlador do tanque trapezoidal e das saída do controlador do tanque retangular desse teste podem ser vistos nas Figuras 73 e 74

respectivamente.

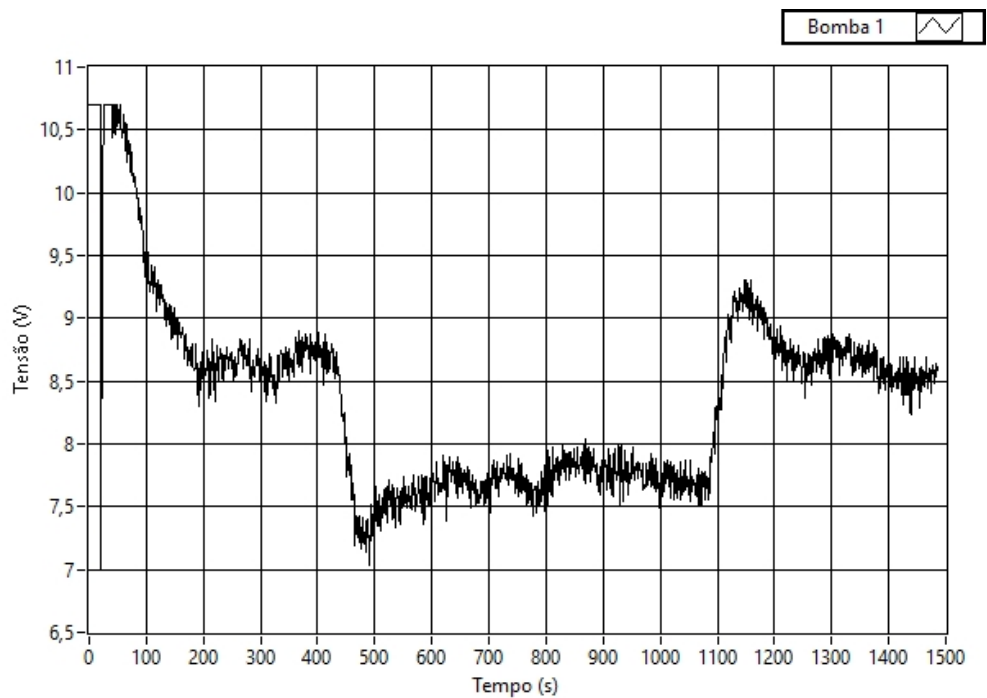


Figura 73 – Tensão de saída do controlador do tanque trapezoidal.

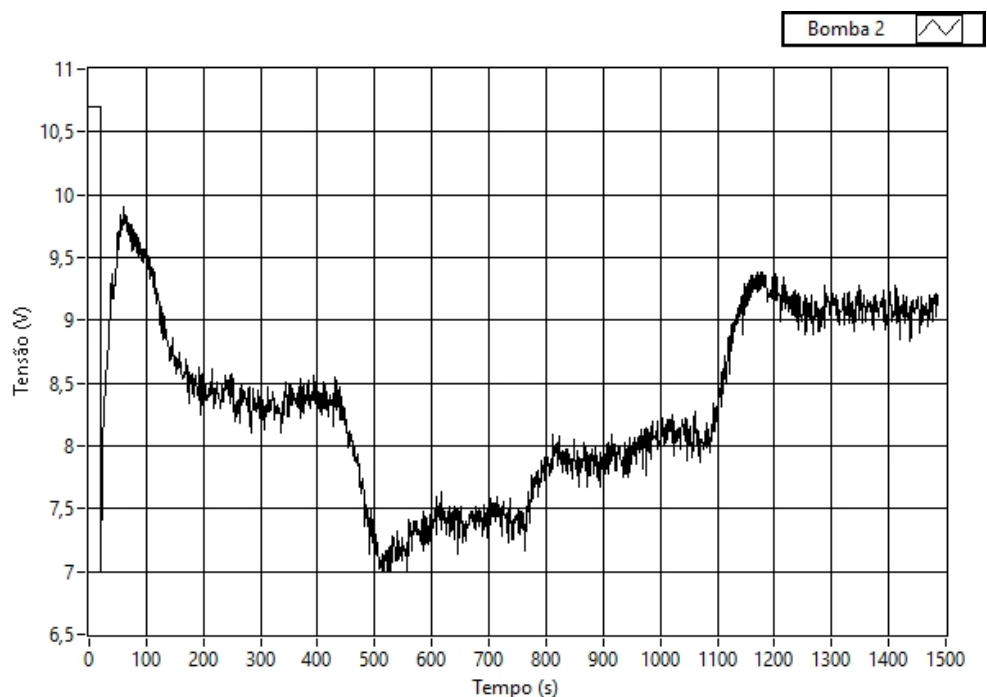


Figura 74 – Tensão de saída do controlador do tanque retangular.

Observando as curvas de tensão, nota-se que para conseguir manter os tanques nos níveis desejados, os sinais de controle diminuíram 1V. Essa diminuição somada as perturbações inseridas, fazem com que as tensões que chegam nas bombas antes e depois de inserir as perturbações sejam do mesmo valor.

Os resultados desse teste mostram que além de realizar seguimento de referência no sistema de dois tanques com atraso, os controladores PI com preditor de Smith são capazes de rejeitar perturbações inseridas no sistema.

## 4.6 Comentários

De uma forma geral, os resultados dos testes de controle mostraram que os controladores PI são suficientes para seguimento de referência e rejeição de perturbação em vários pontos de operação dos tanques. Porém, quando o atraso artificial é inserido no sistema, esses mesmos controladores começam a ter dificuldade em controlar o sistema.

Com a adição dos atrasos, a saída do sistema de malha fechada começa a apresentar oscilações. Através dos testes com tempos diferentes de atraso, percebeu-se que quanto maior o atraso, maior a amplitude dessas oscilações.

De maneira a resolver esse problema, foi adicionado um preditor de Smith à lógica de controle, que resolveu os problemas, removendo as oscilações que eram geradas. Com o uso do preditor de Smith, os controladores PI foram novamente capazes de seguir referência e rejeitar as perturbações inseridas no sistema.

Esses resultados validam a estrutura de controle criada e também demonstram a efetividade do uso de um preditor de Smith no tratamento de sistemas com atraso.



## 5 Considerações Finais

Através deste trabalho de conclusão de curso foi possível aplicar conhecimentos adquiridos ao longo de toda a graduação, mostrando como cada disciplina foi importante para a formação de engenheiro de controle e automação. Além disso, este trabalho possibilitou demonstrar que os conhecimentos em sistemas de controle podem ser potencializados através de aulas práticas que permitam aos alunos visualizarem e aplicarem o que foi aprendido através da teoria. A experiência tem demonstrado que este tipo de prática eleva consideravelmente a apreensão do conteúdo por parte dos graduandos.

A bancada desenvolvida se mostrou eficaz nas situações de controle propostas, assim validando o que foi construído e desenvolvido até agora. Com isso em mente é possível perceber que experimentos de controle de nível, sejam eles com seguimento de referência, rejeição de perturbação, controle de sistemas com atraso, uso de preditor de Smith, entre outros, são possíveis de serem realizados na bancada, assim cumprindo a proposta inicial dela.

Apesar desses resultados serem condizentes com o proposto inicialmente, a bancada experimental tem potencial para ser aprimorada e melhor desenvolvida.

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Dentro dos possíveis trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos com a bancada, são mais notáveis os seguintes tópicos:

- Teste em sala de aula para validar o uso em experimentos com alunos;
- Adição de novas ferramentas de controle para uso em disciplinas mais avançadas.

Com os resultados destes trabalhos seria possível confirmar que a bancada é prática e eficiente quando usada alunos que não desenvolveram a mesma, além de ampliar seu uso para outras disciplinas da faculdade, dando mais utilidade para a mesma.

# Referências Bibliográficas

- 1 ARAVIND, P. et al. Modelling and simulation of non linear tank. 2013.
- 2 BERNARDES, M. C. et al. Instrumentação e identificação não-linear de um sistema de nível de líquido com quatro tanques interligados. 2006.
- 3 GATZKE, E. P. et al. Model based control of a four-tank system. 2000.
- 4 GESKE, G. A. *Sistema de dois tanques: Controle não-linear e preditivo*. [S.l.], 2021.
- 5 GOSMANN, H. L. Um sistema multivariável de tanques acoplados para avaliação de técnicas de controle. 2002.
- 6 GOUTA, H. et al. Predictive and backstepping control of double tank process: A comparative study. 2016.
- 7 LIKUN, H. et al. Level control system of double-hold water tank based on inverse system method and pid. 2010.
- 8 LIMA, F. S. de et al. Controle inteligente para um tanque não-linear de 1<sup>a</sup> ordem através de redes industriais foundation fieldbus utilizando blocos funcionais padrão. 2005.
- 9 MELO, G. A. F. de; BERNARDES, M. C. Instrumentação e controle de uma maquete de nível de líquido com quatro tanques interligados. 2006.
- 10 MENDES, F. V. Modelagem e controle de nível de um tanque de Área variável. 2017.
- 11 NORMEY-RICO, J. E.; CAMACHO, E. *Control of dead-time processes*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.
- 12 OLIVEIRA, F. S. S. de. Controle pi/pid robusto baseado no preditor de smith. 2016.
- 13 PAN, H. et al. Experimental validation of a nonlinear backstepping liquid level controller for a state coupled two tank system. 2005.
- 14 PEREIRA, A. D. S. Controle e monitoramento de nível em tanques reservatórios de líquidos. 2016.
- 15 SASTRY, D. V. L. N. An implementation of different non linear pid controllers on a single tank level control using matlab. 2012.
- 16 SILVA, P. R. A. da et al. Controle de nível em tanques acoplados usando sistemas inteligentes. 2007.
- 17 SOARES, D. W. F. et al. Importância de aulas praticas para os cursos de engenharia: Consolidação de conhecimento e motivação. 2016.

- 18 SOLUTIONS, W. C. *O que é Controle PID? Entenda o funcionamento e veja exemplos.* <"<https://www.west-cs.com.br/blog/o-que-e-controle-pid/>">. (acessado em: 01.03.2022).
- 19 SUNDARAVADIVU, K. et al. Design of fractional order pid controller for liquid level control of spherical tank. 2011.
- 20 URREA, C.; PAEZ, F. Design and comparison of strategies for level control in a nonlinear tank. 2021.