



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

CONTROLE DE NÍVEL EM UM SISTEMA DE TANQUES USANDO VISÃO COMPUTACIONAL

Igor Ferreira Pinto

Projeto de Graduação apresentado ao Corpo Docente do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Alessandro Jacoud Peixoto

Rio de Janeiro
Julho de 2016

CONTROLE DE NÍVEL EM UM SISTEMA DE TANQUES USANDO VISÃO
COMPUTACIONAL

Igor Ferreira Pinto

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.

Examinado por:

Prof. Alessandro Jacoud Peixoto, D.Sc.

Prof. Marcos Vicente de Brito Moreira, D.Sc.

Prof. Tiago Roux Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JULHO DE 2016

Ferreira Pinto, Igor

Controle de Nível em Um Sistema de Tanques Usando Visão Computacional / Igor Ferreira Pinto. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2016.

XI, 64 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Alessandro Jacoud Peixoto

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Controle e Automação, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 58 – 59.

1. Controlador Lógico Programável. 2. Controle de Nível. 3. Visão Computacional. I. Jacoud Peixoto, Alessandro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente e principalmente, aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram meus estudos, me dando sempre o suporte e as condições necessárias para atingir o sucesso em todas as etapas da minha vida.

Agradeço também à Equipe Icarus de Formula SAE que auxiliou na minha formação e no desenvolvimento desse projeto, disponibilizando equipamentos e ajuda para fabricação de peças úteis ao projeto.

Agradeço aos companheiros de laboratório, Paulo Yamasaki, Jean Américo que também auxiliaram durante o desenvolvimento do projeto.

Agradeço, por fim, ao meu orientador, pelos ensinamentos e pela confiança de que o projeto seria concluído com êxito.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação

CONTROLE DE NÍVEL EM UM SISTEMA DE TANQUES USANDO VISÃO COMPUTACIONAL

Igor Ferreira Pinto

Julho/2016

Orientador: Alessandro Jacoud Peixoto

Departamento: Engenharia de Controle e Automação

Este trabalho trata, com um enfoque prático, da especificação e adaptação de um sistema de controle de nível em um sistema de quatro tanques para realização do controle de nível utilizando visão computacional. O controle de nível é implementado em dois modelos diferentes, um modelo utilizando apenas um tanque e outro modelo utilizando dois tanques em cascata. Utiliza-se um Controlador Lógico Programável CLP para implementação da estratégia de controle. A aquisição dos níveis dos tanques é realizada através de visão computacional por meio de uma câmera que monitora a posição de um alvo que flutua sobre o líquido. Foi desenvolvido um modelo dos sistemas, usado em simulações, para sintonia dos parâmetros do controlador.

Palavras-chave: Controle de Nível, Visão Computacional, Controlador Lógico Programável.

Abstract of Graduation Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Control and Automation Engineer

WATER LEVEL CONTROL IN TANK SYSTEM USING COMPUTER VISION

Igor Ferreira Pinto

July/2016

Advisor: Alessandro Jacoud Peixoto

Department: Control and Automation Engineering

This paper deals, with a practical focus, with the specification and adaptation of level control for quadruple tank system using computer vision. The level control was implemented in two different models, one considering only one tank and the other considering two sequential tanks. Using a Programmable Logic Controller (PLC) to implement the control strategy. The tank water level acquisition was implemented through computer vision, a webcam monitors the position of a float target on the liquid. A model of the system was developed, used in simulations, to achieve good parameters for the controller.

Keywords: Level Control, Computer Vision, Programmable Logic Controller.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
1 Introdução	1
1.1 Conceitos Básicos	4
1.2 Objetivo	7
1.3 Organização do Trabalho	7
2 Hardware, Software e Visão Computacional	9
2.1 Componentes do Sistema (<i>Hardware</i>)	10
2.1.1 Tanque e Reservatório	10
2.1.2 Mangueiras, Nipple e Dreno	10
2.1.3 Bomba	10
2.1.4 Módulo de Potência	11
2.1.5 Controlador Lógico Programável (CLP)	14
2.2 Componentes do Sistema (<i>Software</i>)	14
2.3 Visão Computacional	15
2.3.1 Calibração do Sensor	17
3 Modelagem do Sistema	20
3.1 Conceitos Básicos	20
3.1.1 Princípio de Conservação de Massa	20
3.1.2 Equação de Bernoulli	21
3.2 Modelo de Carga de Um Tanque	22
3.3 Modelo de Descarga de Um Tanque	23
3.4 Modelo para Dinâmica do Nível de Um Tanque	24
3.4.1 Tanque Retangular	25
3.4.2 Tanque Trapezoidal	26
3.5 Sistema com Quatro Tanques	28
3.5.1 Linearização	30
3.6 Sistema com Um Tanque	32

3.7	Sistema com Dois Tanques	33
4	Projeto de Controle e Simulações	35
4.1	Sistema com Um Tanque	35
4.2	Sistema com Dois Tanques	37
5	Resultados Experimentais	44
5.1	Testes Preliminares	44
5.1.1	<i>Software</i> de Programação Ladder (VersaPro)	44
5.1.2	Controlador Lógico Programável	45
5.1.3	Módulo de Potência	45
5.1.4	Bombas	46
5.1.5	Servidor OPC e Supervisório	46
5.1.6	Primeiros Testes me Malha Aberta e Malha Fechada	47
5.2	Experimentos	49
5.2.1	Resultado Experimental do Sistema com Um Tanque	49
5.2.2	Resultado Experimental do Sistema com Dois Tanques	52
6	Conclusão	55
6.1	Trabalhos Futuros	56
	Referências Bibliográficas	58
A	Rotinas do Matlab/Simulink	60
A.1	Constantes	60
A.2	Diagrama de blocos	61

Lista de Figuras

1.1	Foto do sistema de quatro tanques. Projetado em JÚNIOR et al. 2009	3
1.2	Exemplo de lógica Ladder, representando contatos e bobinas	6
2.1	Foto do painel de componentes da bancada	9
2.2	Bomba utilizada na planta [1]	11
2.3	Módulo de Potência [1]	12
2.4	Diagrama do circuito do módulo de potência [1]	13
2.5	Foto do Controlador Lógico Programável modelo GE Fanuc VersaMax IC200UAL006	14
2.6	Posicionamento dos marcadores no tanque	15
2.7	Filtro de cor realizado na imagem capturada pela câmera. Detecção da cor laranja	16
2.8	Detecção dos marcadores pela câmera	17
2.9	Diagrama para o sistema de visão computacional	18
2.10	Pontos de calibração do sensor de nível	18
3.1	Representação do escoamento de um fluido em uma tubulação	21
3.2	Dimensões externas do tanque retangular	26
3.3	Dimensões externas do tanque trapezoidal	27
3.4	Diagrama esquemático do sistema de quatro tanques	29
3.5	Diagrama esquemático do Sistema com um tanque	33
3.6	Diagrama esquemático do sistema com dois tanques	34
4.1	Simulações numéricas com degrau na referência utilizando o modelo não linear e controle proporcional para o sistema com um tanque . . .	36
4.2	Resposta ao degrau do modelo linearizado, utilizando controle pro- porcional para o sistema com um tanque	37
4.3	Simulações numéricas com degrau na referência utilizando o modelo não linear e controle PI para o sistema com um tanque	38
4.4	Simulação numérica do modelo não linear com um tanque utilizando controle PI	39
4.5	Lugar das raízes para o sistema com dois tanques	40

4.6	Resposta ao degrau do modelo linearizado, utilizando controle PI para o sistema com dois tanques	41
4.7	Simulações numéricas com degrau na referência utilizando controle PI para o sistema com dois tanques	42
4.8	Simulação numérica do modelo não linear com dois tanques utilizando controle PI	43
5.1	Código em linguagem Ladder utilizado nos experimentos deste projeto	45
5.2	Modelo em Simulink de um sistema supervisorio utilizando servidor OPC	46
5.3	Esquema do circuito de entrada do motor DC	47
5.4	Potenciômetro e seu acoplamento com o motor DC	48
5.5	Resultados experimentais usando controle PI para controle de posição de um motor DC. Os valores apresentados no eixo vertical estão apresentados em escala de 0 a 32000 (valores apresentados internamente pelo CLP), equivalente, neste caso, à uma conversão linear de 0 à 10 V.	49
5.6	Resultado experimental para controle PI do nível de um tanque, com ganhos $K = 30$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$	50
5.7	Resultado experimental para controle PI do nível de um tanque, com ganhos $K = 10$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$	51
5.8	Resultado experimental para controle PI do nível de um tanque, com ganhos $K = 10$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,05$	51
5.9	Resultado experimental para controle PI do nível do sistemas com dois tanques, com ganhos $K = 30$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$	52
5.10	Resultado experimental para controle PI do nível do sistemas com dois tanques, com ganhos $K = 10$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$	53
5.11	Resultado experimental para controle PID do nível do sistemas com dois tanques, com ganhos $K = 10$, $\frac{1}{\tau_i} = 0.2$ e $K_d = 0,03$	54
A.1	Diagrama de blocos da referência	62
A.2	Diagrama de blocos do módulo de potência	62
A.3	Diagrama de blocos da bomba	62
A.4	Diagrama de blocos da conexão T	63
A.5	Diagrama de blocos do tanque 1	63
A.6	Diagrama de blocos do tanque 3	64
A.7	Diagrama de blocos do sensor	64
A.8	Diagrama de blocos da malha fechada de controle do sistema	64

Lista de Tabelas

2.1	Dados de desempenho da bomba a 12V	11
-----	--	----

Capítulo 1

Introdução

A indústria moderna tem adotado cada vez mais sistemas automáticos no processo de produção. Esses sistemas são de grande confiabilidade e precisão, sendo essenciais para manter a alta produtividade requerida atualmente. Em particular, os sistemas automáticos para o controle de nível em tanques. De acordo com CHEN *et al.* 2007, sistemas de controle de nível de líquido em tanques são aplicados na indústria, por exemplo, para o depósito de matéria prima em processos químicos, para mistura de materiais químicos em processos de litificação e para armazenar produtos resultantes de reações de tecnologia bioquímica. Tipicamente, muitos trabalhos que usam sistemas de controle de nível em tanques contam com controle do tipo liga/desliga por meio de relés. A precisão na regulação do nível é limitada ao se utilizar este tipo de controle e, conseqüentemente, impacta a qualidade da produção. Esta dificuldade na precisão da regulação se deve, entre outros aspectos, a fenômenos altamente não lineares como variável de resistência de escoamento e a relação da vazão com a coluna de líquido, principalmente para tanques com seção reta apresentando geometrias peculiares. A importância do controle de nível não deve ser subestimada. Medições de nível incorretas ou inapropriadas podem resultar em um nível de um fluido em um recipiente excessivamente alto/baixo em relação ao nível desejado. Níveis baixos podem causar danos aos equipamentos, enquanto níveis altos pode resultar em derramamentos com potencial problema de segurança ambiental. Se tratando de um ambiente industrial, precisão na medição de nível economizam tempo e dinheiro, e otimiza o desempenho da planta e do processo como um todo.

Em muitos países existem órgãos regulatórios que exigem detalhamento e controle do impacto ambiental pela eliminação de resíduos sólidos e líquidos de atividades industriais, principalmente em casos de material radioativos e contaminantes NAVIRA-COTTA *et al.* 2013, o que pode ser encarado como uma motivação adicional para o projeto e implementação de controle de nível no setor industrial, visando reduzir resíduos descartados.

Um ponto fundamental nos sistema de controle de nível de fluidos é a adequada escolha do sensor a ser utilizado. Existe uma grande variedade de tipos de sensores que podem ser utilizados para detecção de níveis de fluidos. Há disponíveis sensores mecânicos e elétricos, sensores de nível por contato e sem contato, sensores de medição direta e indireta, etc. Pode-se citar alguns tipos de sensores comumente utilizados, entre eles: sensor magnético, sensor de pressão hidrostática, sensor ultrassônico e sensores óticos.

O sensor magnético de nível trata-se de um flutuador que se move ao longo de um tubo guia vertical. A resistência atua como um divisor de tensão e fornece os valores de tensão correspondentes ao nível médio. A resolução depende do número de contatos utilizados. A medição independe das propriedades elétricas do material, bem como, da temperatura, da pressão e da densidade. Por ser um sensor que fica imerso no líquido, este está sujeito a desgastes e também pode ficar travado devido a deposição e/ou acúmulo de material.

Sensores de pressão hidrostática são equipamentos simples e de baixo custo. A pressão em um líquido aumenta com a altura e esta pressão hidrostática é transmitida para a célula de medição através de um diafragma. Espuma, propriedades elétricas do líquido e do recipiente não afetam os valores de medição de forma significativa. Porém este tipo de sensor conta com a desvantagem de que variações na densidade do fluido causam erros na medição. Além disso, alguns modelos necessitam de isolamento para evitar contato direto com o líquido.

Ao utilizar sensores de nível ultrassônicos, o nível é medido a partir do tempo que leva para os pulsos ultrassônicos viajarem do sensor a superfície do meio e retornar até o transmissor. Propriedades químicas e físicas do meio não influenciam significativamente o resultado da medição. Portanto, para meios agressivos e abrasivos, viscosos e adesivos recomenda-se esse tipo de sensor. Porém, poeira pode atrapalhar a medição, a temperatura do material pode influenciar na medição e o eco é um desafio na implementação do sensor, principalmente se o recipiente tiver superfícies inclinadas.

Há ainda sensores óticos que usam a luz visível, infravermelho ou laser para detectar o nível de fluido. Baseiam-se na habilidade do material para transmissão da luz, reflexão ou refração. Possuem taxa de atualização muito rápida, porém baixo desempenho em aplicações com ambiente rico em pó onde a luz não penetra na superfície. Em contraponto, a visão computacional é um método que vem sendo amplamente aplicado em diversas áreas, desde o setor industrial à aplicações médicas, e tem se mostrado bastante versátil e eficiente, com alta precisão e rápido processamento. Este sistema de medição também possui desvantagens, em particular, a sensibilidade à luminosidade do ambiente que pode afetar a detecção do alvo. Contudo, o método de visão computacional permite incorporar, de forma re-

lativamente fácil, métodos para tornar o sistema cada vez mais robusto, como por exemplo a adição de um filtro de detecção de forma geométrica para identificação de marcadores, contornando, até certo ponto, o problema da luminosidade.

Uma forma simples e eficaz de avaliar desempenho de esquemas de controle avançado de nível é implementar, em escala reduzida, um sistema de quatro tanques, como em JOHANSSON et al. 2000. Além de avaliar esquemas de controle visando aplicações industriais, uma bancada como ilustrada na Figura 1.1 viabiliza estudos práticos de sistemas multivariáveis com não linearidades significativas e auxilia também na avaliação prática de sistemas de fase não mínima. Sistemas com tais características são raros em práticas de laboratório, enfatizando também a importância desse sistema de quatro tanques para aplicações acadêmicas.



Figura 1.1: Foto do sistema de quatro tanques. Projetado em JÚNIOR et al. 2009

As parcelas de fluxo para os tanques inferiores e os diâmetros dos drenos de descarga dos tanques são configuráveis, de acordo com o comportamento de interesse da planta, resultando em um sistema de fase mínima ou não mínima. O acoplamento pode apresentar maior ou menor interação entre os canais, dependendo dos valores configurados para as parcelas de fluxo.

Este trabalho trata da montagem e adaptação de uma bancada para o controle de nível em um sistema com quatro tanques. A primeira versão desta bancada foi desenvolvida em JÚNIOR et al. 2009, onde sensores capacitivos foram utilizados para a medição de nível. Visando contornar as dificuldades associadas ao sensor capacitivo, diferentemente de JÚNIOR et al. 2009, neste trabalho é desenvolvido e implementado um sistema de visão computacional como forma alternativa para medição dos níveis dos tanques. Além disso, um sistema supervisor é desenvolvido em ambiente Matlab/Simulink bem como a modelagem, o controle e simulações preliminares. Devido a longa inutilização da bancada fez-se necessário reavaliar todos os componentes que compõe o sistema.

1.1 Conceitos Básicos

Esta seção apresenta conceitos fundamentais que auxiliam no entendimento dos componentes e *software* desenvolvidos neste trabalho.

Controlador Lógico Programável

Um dos principais equipamentos utilizados pela indústria no processo de automação e/ou controle de processos, também sendo considerado como o principal componente de um processo automatizado, é o Controlador Lógico Programável, ou CLP (também é bastante conhecido pelas siglas PLC, do inglês *Programmable Logic Controller*). O CLP é um equipamento projetado para comandar e monitorar máquinas ou processos industriais. É um computador especializado, baseado em um microprocessador que desempenha funções de controle através de *software* desenvolvidos pelo usuário. Deve possuir *hardware* e *software* compatíveis com aplicações industriais, o *hardware*, por exemplo, deve suportar as condições extremas de trocas temperatura, umidade, pressão entre outras situações as quais um computador padrão não suportaria. Um CLP é o controlador indicado para lidar com sistemas caracterizados por eventos discretos. Podem ainda lidar com variáveis analógicas definidas por intervalos de valores de corrente ou tensão elétrica.

Os CLPs têm capacidade de comunicação de dados via canais seriais. Com isto podem ser supervisionados por computadores formando sistemas de controle integrados. Softwares de supervisão (HMI, abreviação do termo em inglês referente a *Interface Homem Máquina*) controlam redes de Controladores Lógicos Programáveis,

disponibilizando os dados e situação de diversos processos em um único dispositivo. Cada fabricante estabelece um protocolo de comunicação para seus dispositivos.

Podemos listar como algumas vantagens da utilização de um CLP em ambiente industrial os seguintes itens:

- Imunidade a ruídos eletromagnéticos
- Facilmente configurável através *racks* modulares
- Facilmente programável, pois utiliza linguagens intuitivas (como linguagem Ladder)
- Monitoramento *on-line*, através de *software* supervisórios
- Manutenção simples
- Recursos para processamento em tempo real e multitarefa

Linguagem Ladder

A linguagem Ladder é uma linguagem de baixo nível utilizada para programar CLPs, capaz de realizar o controle de sistemas críticos e/ou industriais, substituindo os antigos circuitos controladores a relés que eram caros e de difícil manutenção, além de menos seguros. A principal vantagem de representar as lógicas de controle por meio de diagramas Ladder é que permite à engenheiros e técnicos de campo desenvolver códigos sem conhecimento prévio de outras lógicas de programação como o FORTRAN ou o C, devido à familiaridade com a lógica a relés. [5]

Devido ao fato de todos os processos do diagrama serem realizados pelo processador do CLP de forma sequencial, é preciso de um uma estrutura de *loop* que executa a uma determinada frequência, fazendo com que os resultados na saída sejam quase imediatos. Para isso, o CLP utiliza um Ciclo de Varredura que consiste nos seguintes passos:

- Leitura das entradas e atualização da memória, que podem ser tantas as entradas externas como sensores e chaves, como entradas internas como valores de bobinas e temporizadores.
- Execução do programa, onde todos os passos da programação são realizados, da esquerda para a direita e de cima para baixo. Nenhum valor obtido nesse processo é utilizado nos cálculos, portanto se alguma bobina obter um novo valor e houver alguma chave associada a ela, esse valor não é alterado até a próxima execução do ciclo de varredura.

- Escrita da memória e atualização das saídas, onde os novos valores obtidos no passo de Execução do programa são atualizados na memória e as saídas externas são alteradas.

Os principais elementos que constituem a linguagem Ladder são: as entradas (ou contatos), que podem ler o valor de uma variável booleana; as saídas (ou bobinas) que podem escrever o valor de uma variável booleana; os blocos funcionais que permitem realizar funções avançadas (o que inclui manipulação, leitura e escrita de entradas e saídas analógicas, se disponíveis no modelo do CLP). Um exemplo simples do uso da lógica Ladder, com contatos e bobinas, pode ser verificado na Figura 1.2.

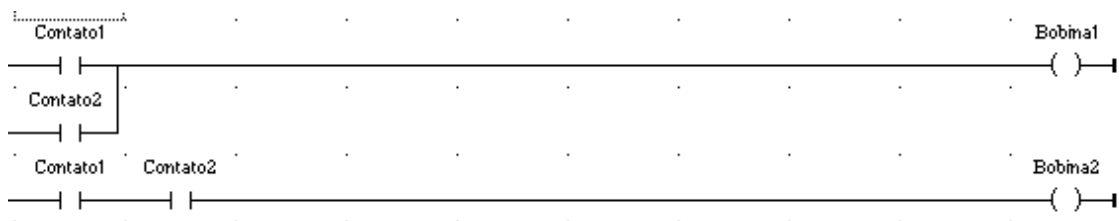


Figura 1.2: Exemplo de lógica Ladder, representando contatos e bobinas

OpenCV

OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*). É uma biblioteca multiplataforma, totalmente livre ao uso acadêmico e comercial, para o desenvolvimento de aplicativos na área de visão computacional. O OpenCV possui módulos de processamento de imagens e vídeo I/O, estrutura de dados, álgebra linear, GUI (Interface Gráfica do Usuário) básica com sistema de janelas independentes, controle de mouse e teclado, além de mais de 350 algoritmos de visão computacional como: filtros de imagem, calibração de câmera, reconhecimento de objetos, análise estrutural e outros. O seu processamento é em tempo real.

A biblioteca OpenCV foi desenvolvida nas linguagens de programação C/C++, tendo esta como sua principal linguagem para desenvolvimento, mas também dá suporte a outras linguagens como Java, Python e Visual Basic.

OPC

OPC é a sigla para “*OLE for Process Control*”, onde OLE significa “*Object Linking and Embedding*”. Este é o nome dado à uma interface padronizada de comunicação que foi criada na tentativa de minimizar os problemas relacionados à inconsistência dos *drivers* de equipamentos industriais de diferentes fabricantes. A *OPC Foundation* é a organização responsável pelas normas que estabelecem as características disponíveis aos clientes dos equipamentos que possuem o padrão OPC.

A comunicação via CLP suporta diferentes tipos de dispositivos, como CLPs, câmeras industriais, robôs, etc. Tais dispositivos disponibilizam dados internos em uma interface simplificada, onde aplicações externas podem interagir com a leitura e/ou escrita de valores em parâmetros, registradores de programas, resultados, etc. Cada fabricante disponibiliza os dados mais convenientes, de acordo com o equipamento. A intermediação da comunicação entre aplicação cliente e equipamento é realizada por um servidor OPC (*OPC Server*).

1.2 Objetivo

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos principais:

1. Desenvolver e implementar um sistema de medição de nível baseado em visão computacional avaliando o desempenho desta alternativa para medição de nível.
2. Desenvolver uma plataforma educacional para controle de nível de tanques, incorporando o sistema de medição de nível baseado em visão computacional. Para isso, objetiva-se tornar operacional a bancada de quatro tanques do Laboratório de Controle e Automação (LabECA/UFRJ).

De forma geral, busca-se deixar disponível no Laboratório de Controle e Automação (LabECA) um sistema de controle de nível para aplicações acadêmicas, onde seja possível o estudos de diversos tópicos de controle linear e não linear, incluindo modelagem, automação e visão computacional. Busca-se também, desenvolver uma bancada que seja de fácil adaptação para se trabalhar com diferentes configurações.

1.3 Organização do Trabalho

O Capítulo 2 apresenta os componentes presentes no sistema físico implementado, descrevendo o *hardware* e *software* utilizados e integração dos sistemas. Neste é descrito, também, a implementação e funcionamento do sistema de visão computacional para aquisição do nível no tanque.

Visando tornar o texto auto contido, o Capítulo 3 apresenta a modelagem de um sistema completo de quatro tanques, sendo três tanques retangulares e um trapezoidal. Neste capítulo é também apresentada a linearização do modelo a ser utilizada durante desenvolvimentos subsequentes. O modelo é apresentado de forma que se torna fácil a reorganização e configuração de subsistemas desejáveis.

No Capítulo 4 é utilizado o modelo linear obtido visando o projeto do controlador. As simulações numéricas são realizadas em duas configurações diferentes incluindo o modelo não linear.

O Capítulo 5 destina-se a descrever os experimentos realizados. São apresentados testes preliminares e os resultados de testes realizados para as configurações apresentadas no Capítulo 4, utilizando o controle projetado e utilizado na simulação para que os resultados numéricos e experimentais possam ser comparados.

As conclusões e sugestões de trabalhos futuros são apresentados ao final, no Capítulo 6, em conjunto com as contribuições geradas por este trabalho.

Capítulo 2

Hardware, Software e Visão Computacional

Neste Capítulo serão apresentados os equipamentos e plataformas utilizadas no desenvolvimento do projeto, referentes a montagem da bancada apresentada nas Figuras 1.1 e 2.1.



Figura 2.1: Foto do painel de componentes da bancada

2.1 Componentes do Sistema (*Hardware*)

A seguir serão detalhados os componentes físicos utilizados no sistema. É importante informar que boa parte da estrutura e dos componentes utilizados foram desenvolvidos e/ou projetados por JÚNIOR et al. 2009.

2.1.1 Tanque e Reservatório

O sistema utilizado neste trabalho é composto basicamente por um tanque e um reservatório. O tanque é de acrílico cristal de 6 mm de espessura e com roscas fêmeas em suas bases (fundo) para a fixação de tampões ou drenos com seus respectivos *o-rings* de vedação. Os tanques retangulares apresentam capacidade aproximada de 4,5 litros, com dimensões internas de 108 x 108 x 389 mm (3.2).

O reservatório é uma caixa organizadora com capacidade aproximada de 29 litros.

2.1.2 Mangueiras, Nipple e Dreno

Foram utilizadas apenas três mangueiras de mesmo diâmetro interno, 5/16 polegadas. Sendo uma para a sucção de água pela bomba do reservatório e outras duas como saída da bomba e alimentações dos tanques.

Nipples são estrangulamentos que são conectadas à extremidade da mangueira de diâmetro interno 5/16 polegadas na entrada do tanque. Neste experimento foi utilizado o nipple de diâmetro 1/8 polegadas para a alimentação do tanque 1 e o nipple de diâmetro 7 mm para a alimentação do tanque 3.

O dreno é rosqueado na abertura inferior do tanque, restringindo a vazão de saída do tanque. O dreno utilizado no tanque 1 possui raio de abertura de 2,3 mm, no tanque 3 possui raio de abertura de 3,45 mm.

2.1.3 Bomba

A bomba é a mesma utilizada no projeto JÚNIOR et al. 2009, sendo esta uma bomba de corrente contínua (CC) de 12V. A bomba é fabricada pela Jersey Modeler (www.jerseymodeler.com), uma empresa fabricante de acessórios para aeromodelagem em Nova Jersey.



Figura 2.2: Bomba utilizada na planta [1]

De acordo com o fabricante, a bomba JM-PUMP apresenta as características apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Dados de desempenho da bomba a 12V

Pressão [psi]	H_{man} [m]	Vazão [ml/min]	Corrente [A]
0	0	2200	0,5
5	3,7	2100	0,9
10	7	1750	1,3
15	10,7	1250	1,6
20	14	350	1,8

A bomba aqui utilizada é satisfatória para a aplicação experimental deste projeto. Porém, é recomendado, para um uso prolongado, de uma bomba industrial, a qual conseguiria suportar certa faixa de aquecimento e um período de utilização mais longo.

2.1.4 Módulo de Potência

A vazão da bomba é manipulada através de um módulo de potência (Figura 2.3), que aciona o motor de corrente contínua (CC) de 12 V por modulação por largura de pulsos (PWM) aplicada à armadura do motor da bomba.



Figura 2.3: Módulo de Potência [1]

O módulo possui três entradas, sendo uma digital e duas analógicas. O sinal digital (PLC RUN) é um sinal de 24 V gerado pelo CLP, para que o módulo entre em operação. As outras duas entradas analógicas (INPUT 1 e 2) são utilizadas para a leitura dos sinais de 0 a 20 mA, que são gerados pelo CLP, para o controle de nível pela manipulação da vazão das bombas. Através de um divisor de tensão, estes sinais passam para a escala de 0 a 5 V e são levados a canais analógicos de um microcontrolador PIC16F876 embutido no módulo.

O módulo possibilita a seleção de um sinal de entrada manual de 0 a 5 V, gerado por potenciômetro presente em sua caixa, ou de um sinal de 0 a 20 mA do CLP. O sinal manual é útil em testes do sistema em malha aberta. As entradas analógicas são indicadas em porcentagem em um LCD.

O módulo pode ser empregado no acionamento de dois motores de até 2 A cada. Para melhor compreensão do sistema, o diagrama do circuito está apresentado na Figura 2.4.

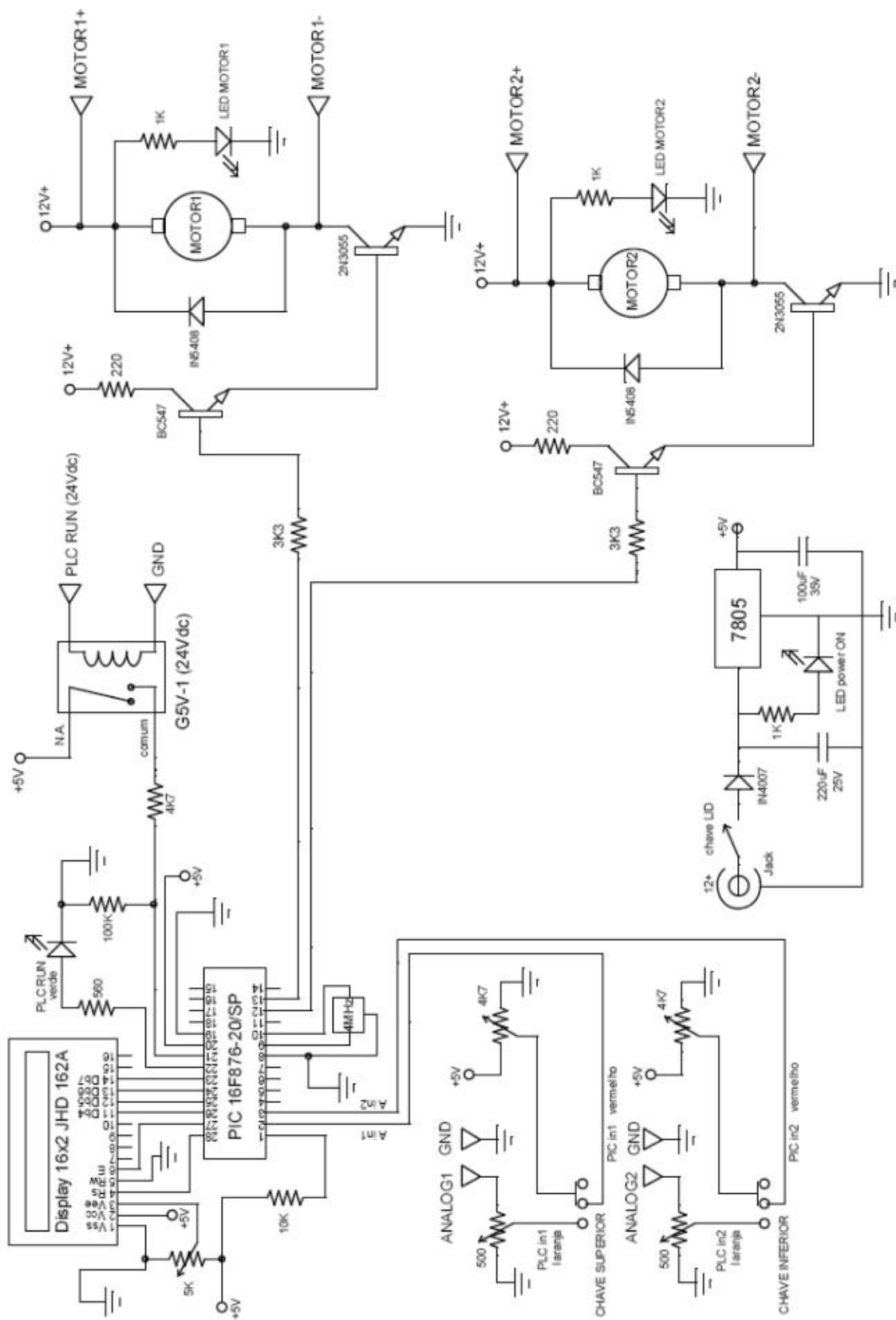


Figura 2.4: Diagrama do circuito do módulo de potência [1]

2.1.5 Controlador Lógico Programável (CLP)

O Controlador Lógico Programável (CLP) utilizado é o modelo VersaMax Micro 23 (IC200UAL006) da GE Fanuc com 23 pontos. Este modelo possui duas entradas e uma saída analógicas. Vale observar que, por esse motivo, para a montagem do sistema completo, ou seja, para a montagem do sistema com quatro tanques é necessário a utilização de dois deste controlador aqui especificado. A Figura 2.5 mostra o modelo utilizado neste projeto.



Figura 2.5: Foto do Controlador Lógico Programável modelo GE Fanuc VersaMax IC200UAL006

2.2 Componentes do Sistema (*Software*)

Para o funcionamento completo da planta desenvolvida neste trabalho, fez-se necessário a integração de cinco sistemas distintos. Esta seção visa apenas destacar a integração dos sistemas utilizados, sem entrar em muitos detalhes sobre estes, os quais já foram ou serão detalhados em outras seções deste texto.

- A codificação em linguagem Ladder e gravação deste código no Controlador Lógico Programável (CLP), foi feita através do *software* da GE, VersaPro.
- Para a leitura e escrita de variáveis em tempo real no CLP foram utilizados o servidor OPC, KEPServerEX e o Simulink.
- Para aquisição do nível de água do tanque, utiliza-se o *software* de visão computacional desenvolvido através do OpenCV e linguagem C++.
- Por fim, para comunicação do *software* de visão computacional com o CLP, utiliza-se de um microcontrolador Arduíno, também programado em C++.

2.3 Visão Computacional

Como forma de detecção do nível de água no tanque foi utilizado visão computacional. A ideia era desenvolver um sistema capaz de detectar uma boia, posicionada dentro do tanque, e achar a distancia desta boia à uma referência, posicionada, neste caso, na base do tanque. Este sistema de detecção foi desenvolvido usando a biblioteca Blobs/OpenCV em ambiente Linux. O trabalho de implementação da visão computacional aqui apresentado contou com o auxílio de trabalhos implementados anteriormente em TOMÉ e DE MATTOS et al. 2016 e também desenvolvido pela Equipe Hefestos de robótica da UFRJ.

A leitura de nível por visão computacional, neste trabalho, foi implementada apenas em um dos tanques. Porém o sistema pode ser facilmente expandido e adaptado para múltiplos tanques.

Uma *webcam* foi posicionada em um suporte de modo que a mesma captura imagens da face frontal do tanque. Próximo à base do tanque foi posicionado um marcador fixo e dentro do tanque foi colocada uma boia. Com isso objetivamos detectar a diferença de posição, no eixo vertical, da boia e do marcador fixo.



Figura 2.6: Posicionamento dos marcadores no tanque

A Figura 2.6 mostra, para melhor compreensão, a face do tanque observada pela *webcam*, a boia (marcador laranja) e o marcador fixo (marcador verde).

Com o auxílio da biblioteca OpenCV, foi realizado um filtro de imagem, utilizando o padrão de cores HSV (*Hue*, *Saturation*, *Value*). É possível ajustar o filtro de cores manualmente, de modo que esteja visível para a câmera apenas os marcadores

desejados (neste caso, sendo a boia laranja e o marcador fixo verde), processando a imagem resultante no padrão preto e branco.

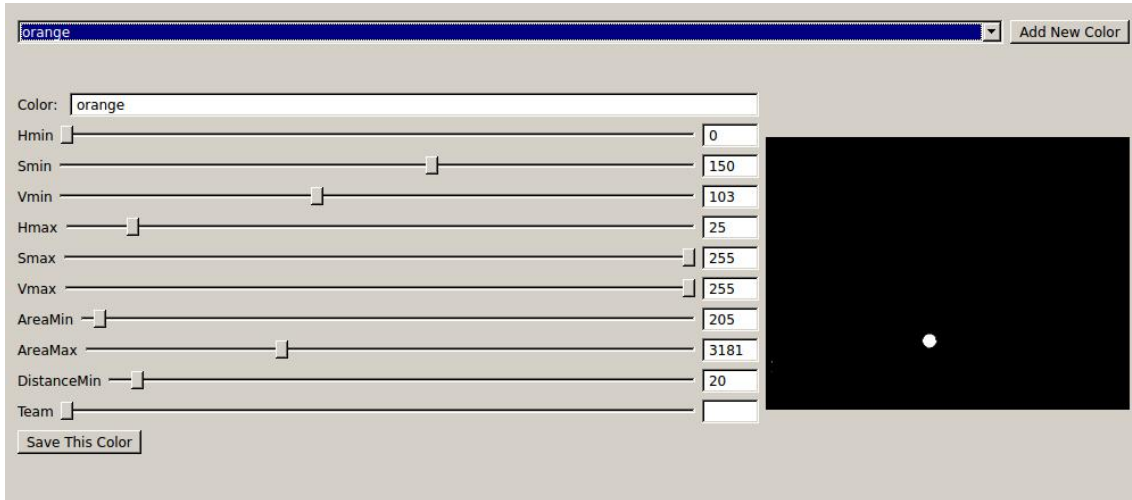


Figura 2.7: Filtro de cor realizado na imagem capturada pela câmera. Detecção da cor laranja

Após filtrada a imagem o *software* detecta e marca como *blob* cada um dos marcadores, como pode ser vista na Figura 2.8. O *software* então calcula a distancia dos centros dos dois marcadores no eixo vertical (considerando o referencial da câmera), a distancia calculada pelo *software* é em unidades de *pixels*. A distância entre os marcadores no eixo horizontal (no referencial da câmera) não influencia no valor da distância enviado ao Arduíno.

A biblioteca serial C foi utilizada para que após o calculo da distância entre os *blobs*, tal valor seja enviado, via serial, à uma placa Arduíno, a qual converte, de forma linear, o valor da distância para um sinal de tensão PWM de 0 à 5 V. Este sinal gerado pela saída analógica da placa Arduíno, por fim, é recebida pelo CLP em sua entrada analógica, vale destacar que o CLP possui um circuito interno que permite a leitura da média deste sinal. É importante mencionar que este valor é convertido (de forma linear) para altura do nível de água em milímetros apenas no servidor OPC, para que possa ser feita uma melhor interpretação pelo usuário no sistema supervisório.

Para melhor compreensão, a Figura 2.9 mostra o fluxograma da visão computacional utilizado.

Há algumas observações a serem feitas sobre este sistema. Primeiramente, devido ao algoritmo calcular a distância em pixel, a posição da câmera influencia bastante no resultado, sendo importante manter uma posição fixa para a mesma a fim de manter a calibração feita para este trabalho.

Também vale mencionar que a câmera não está perfeitamente alinhada com



Figura 2.8: Detecção dos marcadores pela câmera

o tanque, o que pode gerar uma leitura não-linear do nível. O suporte construído para este fim pode apresentar irregularidades e seu posicionamento foi feito de forma manual, o que não garante o total alinhamento com o plano desejado. Desta forma se faz importante obter dados para calibração do sensor, assim obtendo a curva para este.

2.3.1 Calibração do Sensor

Para a calibração do sensor de nível, o tanque foi enchido de água em diversas marcações de níveis e com o auxílio de uma régua foi observada a tensão correspondente na saída do Arduino. Os valores aqui apresentados representam a tensão média, uma vez que o sinal gerado pelo Arduino é modulado em largura de pulso (PWM).

O resultado da calibração pode ser verificado na Figura 2.10.

Podemos observar que a curva pode ser considerada linear, podendo tratar a leitura de forma linear sem que o sistema e os resultados gerados neste trabalho sejam afetados.

Há ainda algumas observações importantes a se fazer: devemos considerar er-

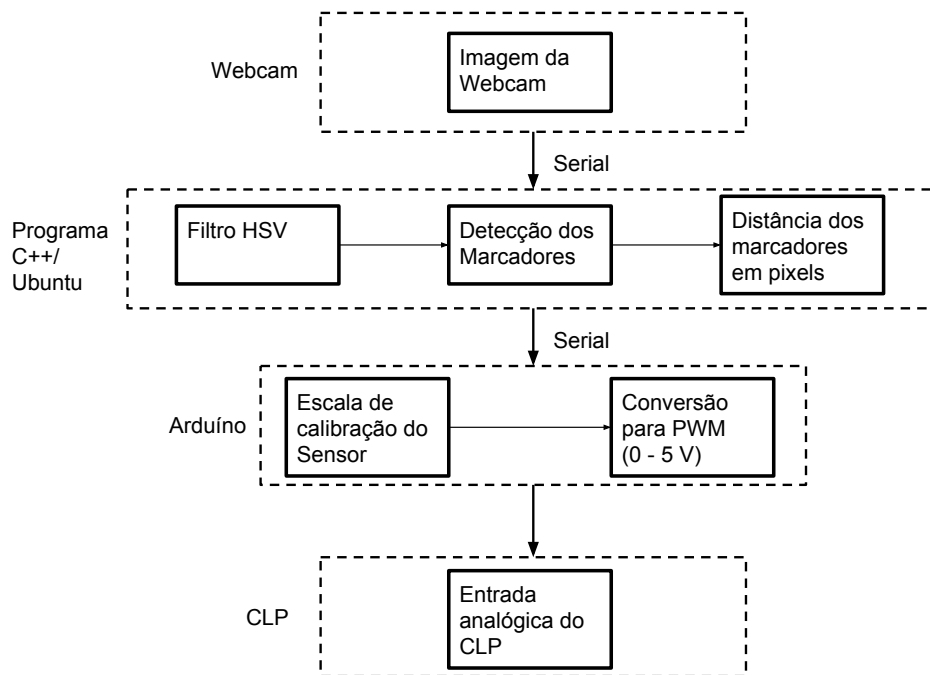


Figura 2.9: Diagrama para o sistema de visão computacional

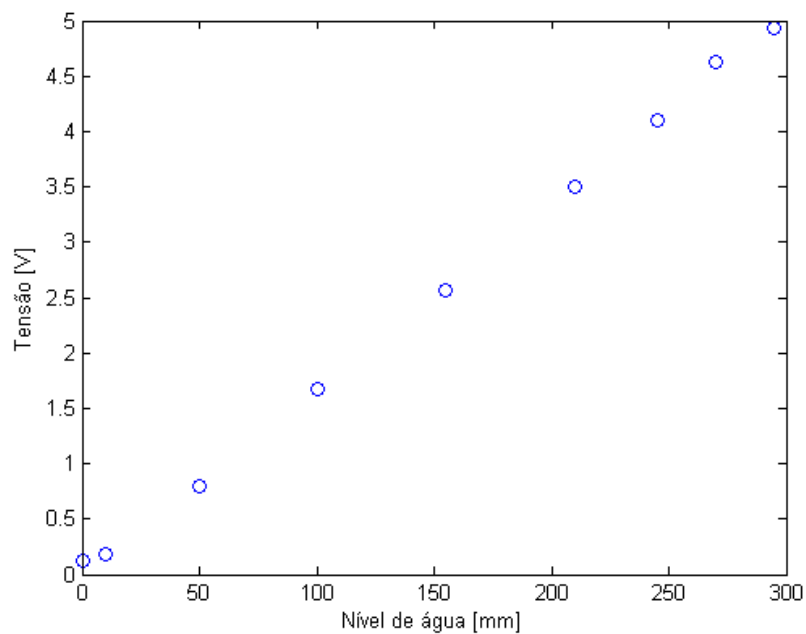


Figura 2.10: Pontos de calibração do sensor de nível

ros na medição de nível devido à resolução da régua utilizada, sendo este erro de $\pm 2,5mm$. Tais valores de tensão foram anteriormente convertidos pelo Arduino. Os valores lidos pelo algoritmo possuem unidade de pixel, sendo que a distância em pixel (considerando o posicionamento da câmera utilizado neste trabalho) do fundo do tanque até seu nível máximo, 295 mm, é de 170 pixels. Ou seja, a resolução da câmera é de, aproximadamente, $1,75 \text{ pixels/mm}$.

Capítulo 3

Modelagem do Sistema

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento completo do modelo matemático do sistema de quatro tanques, baseado nas equações de Bernoulli. Apesar deste modelo ter sido desenvolvido anteriormente em JÚNIOR et al. 2009, optou-se por apresentar o desenvolvimento completo para tornar este trabalho autocontido. Entretanto, foco especial foi dado aos componentes do sistema relacionados com os dois tanques que foram efetivamente utilizados nos experimentos.

Foi obtido um modelo matemático para ser usado nas simulações numéricas cujos resultados serão posteriormente comparados aos resultados experimentais a fim de avaliar a qualidade do modelo obtido.

3.1 Conceitos Básicos

É importante o entendimento de alguns conceitos básicos para melhor compreensão do desenvolvimento a seguir.

3.1.1 Princípio de Conservação de Massa

O princípio de conservação de massa é o que baseia o desenvolvimento do modelo de um tanque. O qual diz que em qualquer sistema, físico ou químico, matéria nunca é criada ou destruída. Para sistemas fechados, o princípio da conservação de massa diz que a massa do sistema permanece constante. No nosso caso, o sistema seria o conjunto de tanques, bombas, mangueiras e reservatórios.

Dentro deste sistema queremos controlar a entrada e a saída de massa do volume de controle (VC), no caso o tanque. Podemos dizer, então, que a transferência de massa no volume de controle é a diferença entre a massa total que entra e a massa total que sai, durante intervalo de tempo Δt .

$$\Delta m_{VC} = m_e - m_s, \quad (3.1)$$

onde,

Δm_{VC} é a variação de massa no VC durante o intervalo de tempo Δt ;

m_e é a massa total entrando no VC durante o intervalo de tempo Δt ;

m_s é a massa total saindo do VC durante o intervalo de tempo Δt .

A taxa de variação de massa no tempo pode ser escrita como:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s. \quad (3.2)$$

As equações (3.1) e (3.2) são equações do balanço de massa do sistema, considerando um sistema com pressão e temperatura constantes.

3.1.2 Equação de Bernoulli

O segundo conceito importante a se entender é a Equação de Bernoulli. A Equação de Bernoulli é utilizada para descrever o comportamento de um fluido ao longo de uma linha de corrente, considerando que o fluido seja incompressível, não-viscoso, apresente escoamento linear e irrotacional.

Para auxiliar na dedução da Equação de Bernoulli, observe a Figura 3.1.

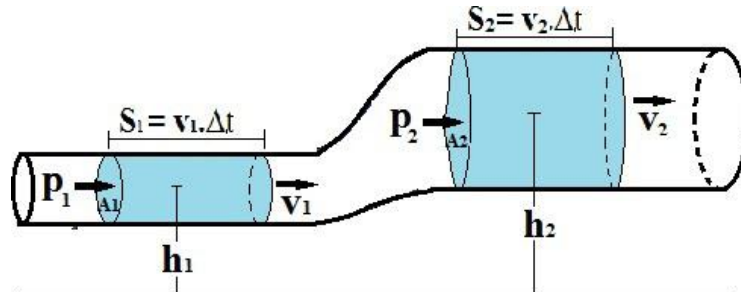


Figura 3.1: Representação do escoamento de um fluido em uma tubulação

Como o líquido está em movimento a uma determinada altura, ele possui energia potencial gravitacional e energia cinética. Assim, a energia das diferentes porções do fluido podem ser dadas por:

$$E_1 = mgh_1 + \frac{mv_1^2}{2} \quad (3.3)$$

e

$$E_2 = mgh_2 + \frac{mv_2^2}{2}. \quad (3.4)$$

Como o volume (V) e a densidade (ρ) do fluido nas duas porções são iguais, podemos substituir a massa por:

$$m = \rho V. \quad (3.5)$$

As equações (3.3) e (3.4), então, podem ser reescritas como:

$$E_1 = \rho V \left(gh_1 + \frac{v_1^2}{2} \right) \quad (3.6)$$

e

$$E_2 = \rho V \left(gh_2 + \frac{v_2^2}{2} \right). \quad (3.7)$$

A variação de energia pode ser associada ao trabalho realizado pelo fluido durante o deslocamento (S). Assim,

$$E_2 - E_1 = F_1 S_1 - F_2 S_2. \quad (3.8)$$

A força pode ser obtida por:

$$F = PA. \quad (3.9)$$

Assim, a Equação (3.8) pode ser escrita da seguinte forma, caracterizando assim a Equação de Bernoulli:

$$P_1 + \rho gh_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = P_2 + \rho gh_2 + \rho \frac{v_2^2}{2}. \quad (3.10)$$

3.2 Modelo de Carga de Um Tanque

Tendo apresentado o princípio da conservação de massa, torna-se fácil desenvolver o modelo de carga de um tanque sem orifício de escoamento. Neste caso, considerando a água um fluido incompressível, o princípio da conservação de massa pode ser aplicado ao volume. De forma análoga Equação (3.1), tem-se:

$$\frac{dV}{dt} = q_e - q_s, \quad (3.11)$$

onde,

V é o volume ocupado pela água no tanque;

q_e é a vazão volumétrica de entrada;

q_s é a vazão volumétrica de saída.

Seja um tanque com área de seção transversal (A) constante, cuja parte superior está exposta a pressão atmosférica, sendo carregado por uma vazão constante, proporcional a tensão aplicada ao motor da bomba, sem orifício de escoamento. ou seja $q_s = 0$. A partir da Equação anterior (3.11), obtém-se:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k}{A} \vartheta, \quad (3.12)$$

onde,

k é o ganho da bomba;

ϑ é a tensão média aplicada no motor da bomba.

3.3 Modelo de Descarga de Um Tanque

Com o uso da Equação de Bernoulli (3.10), será mostrado o modelo de descarga de um tanque com abertura superior para atmosfera e orifício de escoamento localizado na base, o escoamento acontece em regime quase permanente.

Considerando um tanque preenchido com água até uma altura inicial (h), tendo a água escoada através do orifício na base. Deseja-se obter a Equação dinâmica da coluna de água no tanque. Segundo LIBII et al. 2003, quando um líquido em um tanque é drenado por um orifício com área de seção transversal muito menor do que a área de seção transversal do tanque, a hipótese de escoamento sem atrito pode ser aplicada. Com isso, pode-se considerar as mesmas condições anteriormente citadas para dedução da Equação de Bernoulli, ou seja, considerando a água um fluido incompressível, não-viscoso, que apresenta escoamento linear e irrotacional. Considerando também o princípio do conservação de massa, pode-se dizer que o volume que atravessa o orifício na base (a) deve ser o mesmo que atravessa a seção transversal do tanque (A) no mesmo intervalo de tempo. Assim, pode-se relacionar as vazões:

$$v_a a = v_A A, \quad (3.13)$$

onde,

a é a área da seção transversal do canal de saída do tanque;

A é a área da seção transversal do tanque;

v_a é a velocidade do fluido no canal de saída;

v_A é a velocidade do fluido em sua superfície livre.

Podemos aplicar a Equação de Bernoulli (3.10) no centro da superfície do fluido e no centro da seção do canal de saída do tanque, obtendo:

$$P_A + \rho g y_A + \rho \frac{v_A^2}{2} = P_a + \rho g y_a + \rho \frac{v_a^2}{2}, \quad (3.14)$$

onde,

P_A é a pressão na superfície do fluido;

- P_a é a pressão no orifício de saída;
- y_A é a altura da superfície do fluido em relação ao nível de referência;
- y_a é a altura do orifício de saída em relação ao nível de referência.

O fluido em ambas as seções, A e a , estão expostos a pressão atmosférica, eliminamos os termos referentes à pressão na Equação (3.14). A diferença entre as alturas y_A e y_a resulta na altura da coluna de fluido no tanque (h). Reduzimos a Equação (3.14):

$$\rho gh + \rho \frac{v_A^2}{2} = \rho \frac{v_a^2}{2}. \quad (3.15)$$

Pela Equação (3.13), isolando v_A e substituindo em (3.15), obtém-se:

$$v_a = A \sqrt{\frac{2gh}{A^2 - a^2}}. \quad (3.16)$$

O volume de água drenado pelo orifício em um tempo dt será dado por $av_a dt$. Consequentemente o nível da superfície livre do fluido irá decrescer, resultando em:

$$-Adh = av_a dt. \quad (3.17)$$

Substituindo a Equação (3.16) em (3.17), simplificando e integrando a função da altura no intervalo $[h_i, h_f]$ para o período $[t_i, t_f]$, considerando a área da seção transversal do tanque constante, obtemos a expressão da altura da coluna de água em função do tempo,

$$\sqrt{h_i} - \sqrt{h_f} = \left(\frac{a}{2} \sqrt{\frac{2g}{A^2 - a^2}} \right) t_f. \quad (3.18)$$

3.4 Modelo para Dinâmica do Nível de Um Tanque

Apresentados os modelos para carga e descarga de um tanque, podemos agora desenvolver os modelos dos tanques a serem utilizados na nossa planta. A planta utilizada neste projeto possui dois tipos de tanques, retangular e trapezoidal, que serão detalhados nos próximos tópicos.

Antes de apresentar os modelos, algumas condições devem ser consideradas a fim de simplificar a modelagem. Sendo essas hipóteses listadas a seguir:

- a velocidade do fluido em sua superfície livre (v_A) é desprezível;
- a perda de carga na tubulação é desprezível;

- a água é incompressível e sua densidade não varia;
- a temperatura do fluido é constante;
- a pressão atmosférica em cada ponto da planta é a mesma;
- a dinâmica da bomba é mais rápida do que a dinâmica do tanque;
- o canal de saída é arredondado e sua superfície é lisa, não apresentando expansões ou contrações, evitando assim a presença de atrito e perturbações no escoamento.

Observe que ao considerar a velocidade do fluido em sua superfície livre desprezível ($v_A \cong 0$) em comparação à velocidade do fluido na seção a , a Equação (3.16) é modificada, reduzindo-a a Equação de Torricelli:

$$v_a = \sqrt{2gh}. \quad (3.19)$$

Com isso podemos substituir a Equação (3.19) na Equação (3.17), simplificando assim a Equação (3.18) para:

$$\sqrt{h_i} - \sqrt{h_f} = \left(\frac{a}{A} \sqrt{\frac{g}{2}} \right) t. \quad (3.20)$$

3.4.1 Tanque Retangular

Para a modelagem do tanque retangular, apresentado na Figura 3.2, com entrada e saída de água, utilizaremos a Equação de balanço de massa (3.1), a qual, neste caso pode ser aplicada ao volume, dado que $\rho = \text{constante}$. Estabelecendo assim que o volume de água que entra menos o volume de água que sai do tanque é igual a variação do volume contido no tanque (3.11). O volume de água no tanque, em qualquer momento, é uma função linear da altura, uma vez que a seção transversal do tanque é constante.

A vazão de entrada de água no tanque é dado pela vazão da bomba:

$$q_e = k\vartheta. \quad (3.21)$$

Para obtenção da vazão de saída do tanque, substituímos a Equação (3.19) na Equação (3.17), resultando em:

$$q_s = a\sqrt{2gh}. \quad (3.22)$$

Substituindo as Equações (3.21) e (3.22) na Equação de balanço do volume no

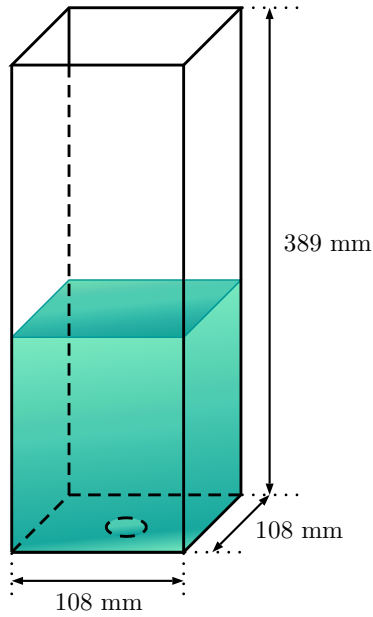


Figura 3.2: Dimensões externas do tanque retangular

tempo (3.11):

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= k\vartheta - a\sqrt{2gh} \\ A\frac{dh}{dt} &= k\vartheta - a\sqrt{2gh} \\ \frac{dh}{dt} &= \frac{k}{A}\vartheta - \frac{a}{A}\sqrt{2gh}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

A expressão (3.23) é uma equação diferencial em h , altura da coluna de água no tanque, e depende da vazão de entrada de água e das dimensões do tanque.

3.4.2 Tanque Trapezoidal

Duas faces deste tanque apresentam forma de um trapézio retângulo, na qual dois ângulos internos são retos (3.3). Deste modo a área (A) da seção transversal da superfície livre do fluido pode ser expressa por:

$$A = b(c + \tan(\theta)h), \quad (3.24)$$

onde,

b é o comprimento interno da lateral do tanque trapezoidal;

c é comprimento interno da base menor do trapézio retângulo;

θ

é o ângulo entre a lateral do trapézio e a projeção da altura da coluna de água.

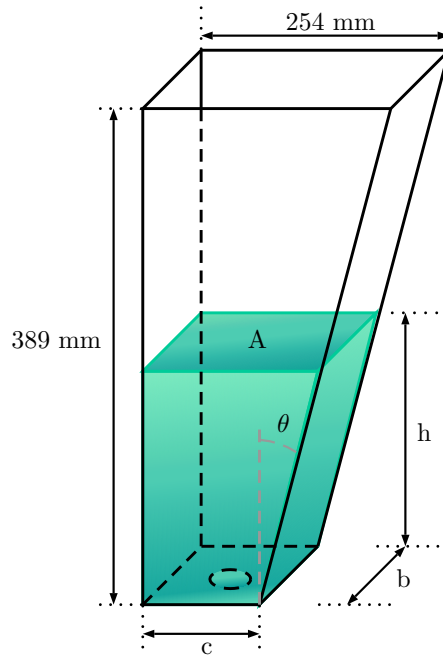


Figura 3.3: Dimensões externas do tanque trapezoidal

A área A depende da altura h da coluna de água no tanque e apresenta essa relação de forma não-linear, diferentemente do tanque retangular.

A Equação diferencial (3.12) que relaciona o nível de água no tempo com a vazão de entrada no tanque, neste caso, passa a ser expressa por:

$$\frac{dh}{dt} = k \frac{\vartheta}{b(c + \tan(\theta)h)}. \quad (3.25)$$

Para o processo de descarga do tanque, considerando a velocidade do fluido na superfície livre desprezível e substituindo as Equações (3.24) e (3.19) na Equação (3.17), obtemos:

$$\frac{dh}{dt} = -a \frac{\sqrt{2gh}}{b(c + \tan(\theta)h)}. \quad (3.26)$$

Por fim, considerando carga e descarga do tanque trapezoidal, temos:

$$\frac{dh}{dt} = k \frac{\vartheta}{b(c + (\theta)h)} - a \frac{\sqrt{2gh}}{b(c + \tan(\theta)h)}. \quad (3.27)$$

Esta equação diferencial em h é análoga à Equação (3.23), sendo dependente da vazão de entrada e dimensões do tanque, diferenciando-se apenas pela área A não ser mais constante.

3.5 Sistema com Quatro Tanques

Após desenvolvermos os modelos de cada tanque, podemos agrupá-los para obter o modelo completo da plantas e os modelos dos sistemas a serem simulados.

A planta utilizada consiste de quatro tanques interligados, duas bombas e um reservatório, como ilustrado no diagrama esquemático da Figura 3.4. Estas bombas foram numeradas de acordo com o tanque inferior ao qual estão diretamente associadas. As duas entradas da planta são as tensões aplicadas nos motores das bombas, e suas saídas de interesse são os níveis dos tanques inferiores.

O fluxo que sai de cada bomba é direcionado para dois tanques por meio de uma conexão T. Nas saídas desta conexão encontram-se estrangulamentos de fluxo. Estes estrangulamentos de fluxo definem os valores dos parâmetros γ_1 e $\gamma_2 \in [0, 1]$. De acordo com hipóteses adotadas anteriormente neste Capítulo, a vazão da bomba (i) é proporcional à tensão média (ϑ_i) aplicada nos terminais do seu motor, sendo dada por $k_i\vartheta_i$, onde k_i é uma constante positiva e $i = 1, 2$. Sendo assim, a vazão de entrada do tanque 1 devido à bomba 1 é dada por $\gamma_1 k_1 \vartheta_1$, enquanto que a vazão de entrada do tanque 4 devido à bomba 1 é expresso por $(1 - \gamma_1) k_1 \vartheta_1$. De forma similar é descrita a vazão de entrada dos tanques 2 e 3 devido à bomba 2, como pode ser facilmente visualizado na Figura 3.4.

Descrito o sistema, podemos então fazer sua modelagem. A fim de simplificar a modelagem, considere as hipóteses adotadas na seção 3.4 e sejam q_{ej} e q_{sj} as vazões de entrada e saída do tanque j , respectivamente, a_j é a área da seção reta do orifício de saída do tanque j e g é a aceleração da gravidade. De acordo com as equações apresentadas anteriormente, as vazões de saída e de entrada podem ser expressas, respectivamente, por:

$$\begin{aligned} q_{sj} &= a_j \sqrt{2gh_j}, \quad j = 1, 2, 3, 4, \\ q_{e1} &= \gamma_1 k_1 \vartheta_1 + q_{s3}, \quad q_{e2} = \gamma_2 k_2 \vartheta_2 + q_{s4}, \\ q_{e3} &= (1 - \gamma_2) k_2 \vartheta_2, \quad q_{e4} = (1 - \gamma_1) k_1 \vartheta_1, \end{aligned}$$

onde h_j é o nível no tanque j . Note que, as vazões de entrada dos tanques 1 e 2 dependem das vazões das bombas e das vazões de saída dos tanques 3 e 4, enquanto que as vazões de entrada dos tanques 3 e 4 dependem apenas das vazões das bombas. Considere as grandezas A_1, A_2, A_3, A_4, b, c e θ definidas na Figura 3.4. Vale lembrar que, o volume $V_j(h_j)$ contido no tanque j (para $j = 1, 3, 4$) é linear com respeito ao nível h_j e é dado por:

$$V_j = A_j h_j,$$

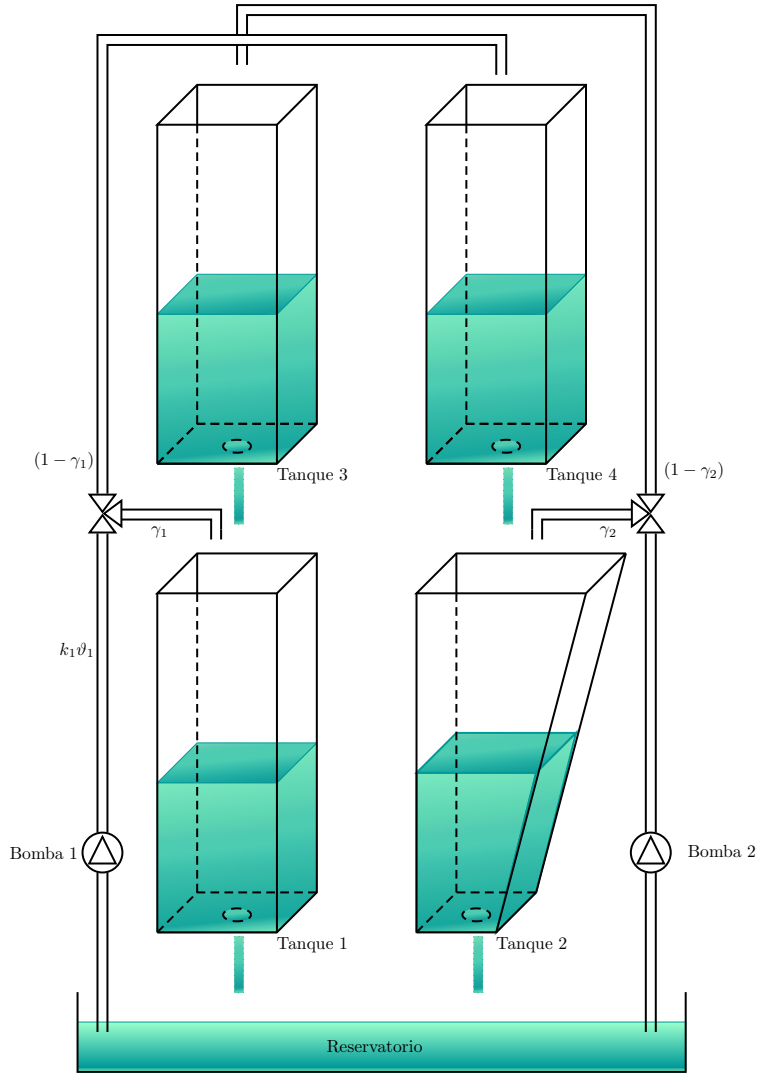


Figura 3.4: Diagrama esquemático do sistema de quatro tanques

enquanto que o volume do tanque 2 é quadrático em h_2 e é dado por

$$V_2 = bch_2 + bh_2^2 \tan(\theta)/2.$$

Assim pode-se verificar que

$$\frac{dV_j}{dh_j} = A_j, \quad j = 1, 2, 3, 4,$$

onde A_1, A_3, A_4 são constantes e $A_2 = b(c + h_2 \tan(\theta))$. Portanto, a partir do balanço de massa (3.11),

$$\frac{dV_j(h_j(t))}{dt} = \frac{dV_j}{dh_j} \frac{dh_j}{dt} = q_{ej} - q_{sj}, \quad j = 1, 2, 3, 4,$$

tem-se a dinâmica do nível de cada tanque expressa por:

- Tanque 1:

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} \vartheta_1, \quad (3.28)$$

- Tanque 2:

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} \vartheta_2, \quad (3.29)$$

onde $A_2 = b(c + h_2 \tan(\theta))$.

- Tanque 3:

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{(1 - \gamma_2)k_2}{A_3} \vartheta_2, \quad (3.30)$$

- Tanque 4:

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1 - \gamma_1)k_1}{A_4} \vartheta_1. \quad (3.31)$$

Por fim, um ajuste necessário para que o modelo do comportamento de deságue fique mais realista, deve-se aumentar a constante de tempo, para tornar mais lenta a resposta do modelo, ou seja, diminuir a velocidade com que a altura da superfície livre varia no tempo. Este coeficiente é constante e corresponde ao coeficiente de perda de carga (k_l) devido à passagem de água pelo orifício de deságue. Isso corresponde à multiplicação da área da seção transversal, a_j , do dreno por uma constante $k_l < 1$, tanto para o caso dos tanques retangulares quanto o trapezoidal. Neste trabalho será utilizado o valor $k_l = 0,68$.

O motivo deste ajuste e o valor aqui utilizados podem ser verificados por JÚNIOR et al. 2009. Onde são feitos testes experimentais para o melhor ajuste do modelo.

De forma compacta o sistema considerado é dado por

$$\dot{x}_h = f_h(x_h, u_h), \quad y_h = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \end{bmatrix}^T, \quad (3.32)$$

onde $x_h := \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 \end{bmatrix}^T$ é o estado do sistema, y_h é a saída de interesse (medida) e $u_h = \begin{bmatrix} \vartheta_1 & \vartheta_2 \end{bmatrix}^T$ é a entrada de controle. O campo vetorial $f_h(x_h, u_h)$ pode ser obtido diretamente de (3.28)–(3.31).

3.5.1 Linearização

Na secção anterior, foi apresentado o modelo para o sistema de quatro tanques de forma não linear. Sistemas reais frequentemente apresentam características não lineares, porém os mesmos podem ser descritos por modelos lineares de forma a simplificar o sistema. Modelos lineares podem ser obtidos por uma aproximação linear na vizinhança de um ponto de operação, por exemplo, utilizando a expansão em série de Taylor.

Considerando as equações não lineares apresentadas em (3.28)–(3.31), e a representação dada por (3.32), faremos a linearização do sistema em torno do ponto de operação (h_0, ϑ_0) , onde $h_0 := [h_{1,0} \ h_{2,0} \ h_{3,0} \ h_{4,0}]^T$ e $\vartheta_0 := [\vartheta_{1,0} \ \vartheta_{2,0}]^T$. Expandindo o campo vetorial $f_h(x_h, u_h)$ por meio da série de Taylor, tem-se:

$$f_h(x_h, u_h) = \left. \frac{\partial f_h}{\partial x_h} \right|_{(h_0, \vartheta_0)} (x_h - h_0) + \left. \frac{\partial f_h}{\partial u_h} \right|_{(h_0, \vartheta_0)} (u_h - \vartheta_0) + \mathcal{O}(x_h, u_h), \quad (3.33)$$

onde $\mathcal{O}(x_h, u_h)$ representa os termos de segunda ordem e superiores. Desprezando $\mathcal{O}(x_h, u_h)$ e assumindo as variáveis de desvio $x = (x_h - h_0)$ e $u = (u_h - \vartheta_0)$, obtém-se o sistema do erro (linear):

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & \frac{A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{A_4}{A_{2,0} T_4} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 k_2}{A_{2,0}} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} \\ \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix} u(t), \quad (3.34)$$

e

$$y(t) = \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_c & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t), \quad (3.35)$$

onde k_c é o ganho do sensor,

$$T_j = \left[\frac{a_j}{A_{j,0}} \sqrt{\frac{g}{2h_{j,0}}} + \delta_j \right]^{-1}, \quad j = 1, 2, 3, 4, \quad (3.36)$$

$A_{1,0} = A_1$, $A_{3,0} = A_3$, $A_{4,0} = A_4$, $A_{2,0} = b(c + \tan(\theta)h_{2,0})$, é a seção transversal do tanque trapezoidal no ponto de operação, $\delta_1 = \delta_3 = \delta_4 = 0$ e $\delta_2 = -\frac{A'_2}{A_{2,0}^2} (a_2 \sqrt{2gh_{2,0}} - a_4 \sqrt{2gh_{4,0}} - \gamma_2 k_2 \vartheta_{2,0})$ e $A'_2 = b \tan(\theta)$.

A função de saída redefinida

$$y(t) = k_c \left(y_h - \begin{bmatrix} h_{1,0} & h_{2,0} \end{bmatrix}^T \right), \quad (3.37)$$

considera variações em torno do ponto de operação e a existência de um possível ganho linear do sensor de nível. Assim, a matriz de transferência de u para y é dada por:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 c_{11}}{T_1 s + 1} & \frac{(1-\gamma_2) c_{12}}{(T_3 s + 1)(T_1 s + 1)} \\ \frac{(1-\gamma_1) c_{21}}{(T_4 s + 1)(T_2 s + 1)} & \frac{\gamma_2 c_{22}}{T_2 s + 1} \end{bmatrix}, \quad (3.38)$$

onde $c_{11} = \frac{T_1 k_c k_1}{A_1}$, $c_{12} = \frac{T_1 k_c k_2}{A_1}$, $c_{21} = \frac{T_2 k_c k_1}{A_{2,0}}$ e $c_{22} = \frac{T_2 k_c k_2}{A_{2,0}}$.

O modelo linearizado do sistema em torno do ponto de operação pode ser representado termo a termo por:

- Tanque 1:

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{1,0}}} x_1 + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{3,0}}} x_3 + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} u_1, \quad (3.39)$$

- Tanque 2:

$$\frac{dx_2}{dt} = -\left[\frac{a_2}{A_{2,0}} \sqrt{\frac{g}{2h_{2,0}}} + \delta_2 \right] x_2 + \frac{a_4}{A_{2,0}} \sqrt{\frac{g}{2h_{4,0}}} x_4 + \frac{\gamma_2 k_2}{A_{2,0}} u_2, \quad (3.40)$$

- Tanque 3:

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{\frac{g}{2h_{3,0}}} x_3 + \frac{(1 - \gamma_2) k_2}{A_3} u_2, \quad (3.41)$$

- Tanque 4:

$$\frac{dx_4}{dt} = -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{\frac{g}{2h_{4,0}}} x_4 + \frac{(1 - \gamma_1) k_1}{A_4} u_1. \quad (3.42)$$

Como foi mostrado através de simulações em JÚNIOR et al. 2009, a linearização é satisfatória nas proximidades do ponto de operação. Se as condições de operação variarem muito, este modelo linear não é adequado para representar com precisão a dinâmica real do sistema.

3.6 Sistema com Um Tanque

Tendo apresentado anteriormente o modelo termo a termo dos quatro tanques, podemos facilmente adaptar tais modelos para as configurações desejadas. Nos Capítulos futuros serão utilizadas duas configurações do sistema, sendo inicialmente considerado apenas um tanque, como pode ser observado na Figura 3.5. O modelo utilizará das configurações do tanque 1 para este primeiro sistema.

O fluxo da bomba será totalmente direcionado para o tanque 1. Este modelo pode ser descrito pela Equação:

- Tanque 1:

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{1,0}}} x_1 + \frac{k_1}{A_1} u_1. \quad (3.43)$$

A partir da Equação (3.43), podemos facilmente escrever a função de transferência do modelo, tendo como entrada do sistema a vazão de saída da bomba (u_1) e como saída do sistema a altura da coluna de água do tanque 1 (x_1):

$$G_1(s) = \frac{\frac{k_1}{A_1}}{s + \frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{1,0}}}}. \quad (3.44)$$

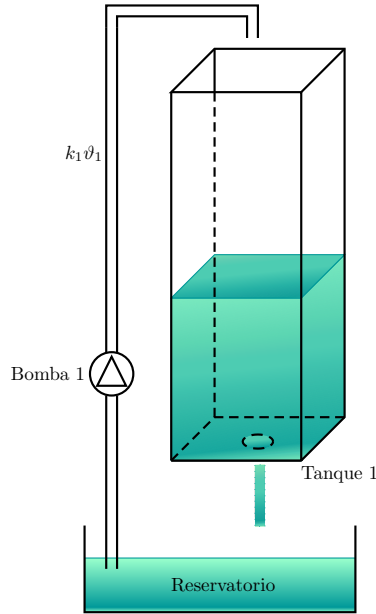


Figura 3.5: Diagrama esquemático do Sistema com um tanque

3.7 Sistema com Dois Tanques

Outra configuração a ser utilizada no desenvolvimento deste trabalho será o sistema com dois tanques. Neste sistema serão utilizados apenas os tanques 1 e 3, de forma que, o fluxo de saída da bomba passará por uma conexão T, onde uma porção γ_1 será direcionada ao tanque 1 e, por consequência, $(1 - \gamma_1)$ direcionada ao tanque 3, que então deságua no tanque 1, agindo como uma espécie de atraso do fluxo direcionado ao tanque 1. Sendo $(1 - \gamma_1) < \gamma_1 < 1$. Verificar esquemático apresentado em 3.6.

Uma observação importante a ser feita é em relação à decisão de utilização dos tanques retangulares, tanque 1 e tanque 3, que se fez com o propósito de não desviar dos objetivos definidos para este projeto, simplificando assim o sistema. Vale lembrar que o foco deste projeto se encontra na implementação do método de visão computacional.

Este sistema pode ser representado pelas equações:

- Tanque 1:

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{1,0}}} x_1 + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{3,0}}} x_3 + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} u_1, \quad (3.45)$$

- Tanque 3:

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{\frac{g}{2h_{3,0}}} x_3 + \frac{(1 - \gamma_1) k_1}{A_3} u_1. \quad (3.46)$$

Da mesma forma que fizemos no sistema com um tanque, podemos gerar a função de transferência deste modelo, tendo como entrada do sistema a vazão de saída da

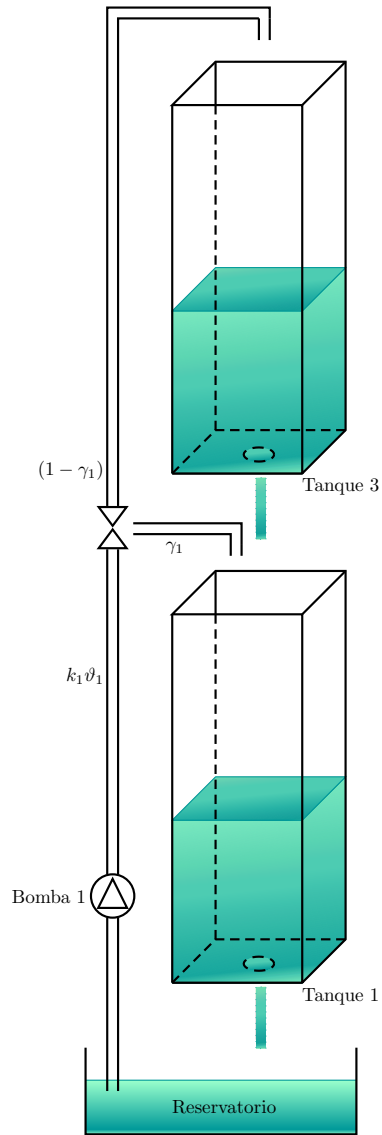


Figura 3.6: Diagrama esquemático do sistema com dois tanques

bomba (u_1) e como saída do sistema a altura da coluna de água do tanque 1 (x_1):

$$G_2(s) = \frac{s + c_1}{c_2 (s + c_3) (s + c_4)}, \quad (3.47)$$

onde, $c_1 = \left(\frac{a_3}{A_3} \sqrt{\frac{g}{2h_{3,0}}} \right) + \left(\frac{a_3}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{1,0}}} \right) \left(\frac{1-\gamma_1}{\gamma_1} \right)$, $c_2 = \left(\frac{\gamma_1 k_1}{A_1} \right)$, $c_3 = \frac{a_3}{A_3} \sqrt{\frac{g}{2h_{3,0}}}$ e $c_4 = \frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{1,0}}}$.

Capítulo 4

Projeto de Controle e Simulações

Neste Capítulo são apresentadas e estudadas duas configurações para o sistema, uma utilizando apenas um tanque e outra configuração utilizando dois tanques em cascata. Para o projeto de controle será considerado o modelo linear, visto que o projeto de controle se faz de forma muito mais simples considerando o modelo linear. Porém as simulações numéricas serão realizadas considerando o modelo não linear, pois assim teremos um resposta mais precisa comparada ao sistema real.

O modelo em Simulink, condições iniciais e demais variáveis dos modelos utilizados para as simulações deste Capítulo podem ser verificados no Apêndice A.

4.1 Sistema com Um Tanque

Para projetar um controle para o sistema será considerado, inicialmente, apenas um tanque, como já apresentado na Seção 3.6. O fluxo da bomba será totalmente direcionado para o tanque 1, objetivando fazer o controle de nível do tanque.

A função de transferência (reproduzida novamente a seguir por conveniência)

$$G_1(s) = \frac{\frac{k_1}{A_1}}{s + \frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{1,0}}}},$$

nos mostra que o modelo possui apenas um polo, sendo este estável para qualquer ganho K aplicado. Desta forma, para realizar o controle do sistema, é necessário a aplicação apenas de um controle proporcional. Por estarmos trabalhando com um modelo lento, faz sentido a escolha de um ganho proporcional elevado. A escolha do ganho proporcional (K) foi feita de forma empírica, através de simulações, chegando à conclusão de que $K = 30$ proporciona um controle satisfatório. Como pode ser verificado na Figura 4.1.

Percebe-se pela Figura 4.1 que o controle puramente proporcional possui um erro de regime, como era de se esperar. Para nosso caso, é interessante eliminarmos tal

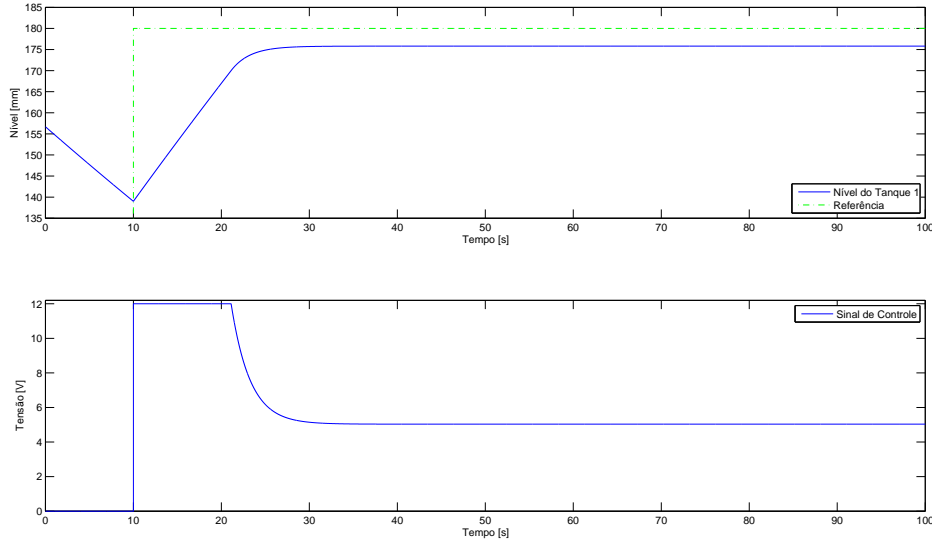


Figura 4.1: Simulações numéricas com degrau na referência utilizando o modelo não linear e controle proporcional para o sistema com um tanque

erro para obtermos um controle mais preciso do nível. Para isso será adicionado um ganho integral ao controlador. De modo que estaremos utilizando um controle PI, descrito na forma ideal:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(s) ds \right], \quad (4.1)$$

onde o sinal de erro $e(t)$ é a diferença entre o sinal de comando r (sinal de referência) e o sinal de saída do processo y , K é o ganho proporcional do controlador e $\tau_i > 0$ é uma constante denominada tempo integral.

O ganho integral também foi obtido objetivando zerar o erro de estado estacionário e não apresentar sobrepasso ao degrau de referência. Assim, foi escolhido um ganho integral $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$, mantendo $K = 30$, o sistema linearizado apresentou resultado ao degrau na referência, apresentado na Figura 4.2.

Utilizando então este controle PI, com ganho integral $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$ e ganho proporcional $K = 30$, podemos fazer uma simulação numérica utilizando o modelo não linear, obtendo os resultados apresentados na Figura 4.3.

O sistema não apresenta erro de estado estacionário, tempo de resposta satisfatório e pouca oscilação. Há, porém, sobrepasso no nível do tanque, que pode ser atribuído, talvez, à saturação do atuador por um tempo prolongado, causando *wind-up* no sistema. Um sistema anti *wind-up* foi estudado em JÚNIOR et al. 2009 e pode ser verificado no mesmo.

Por fim, podemos simular para múltiplos degraus de referência utilizando o mo-

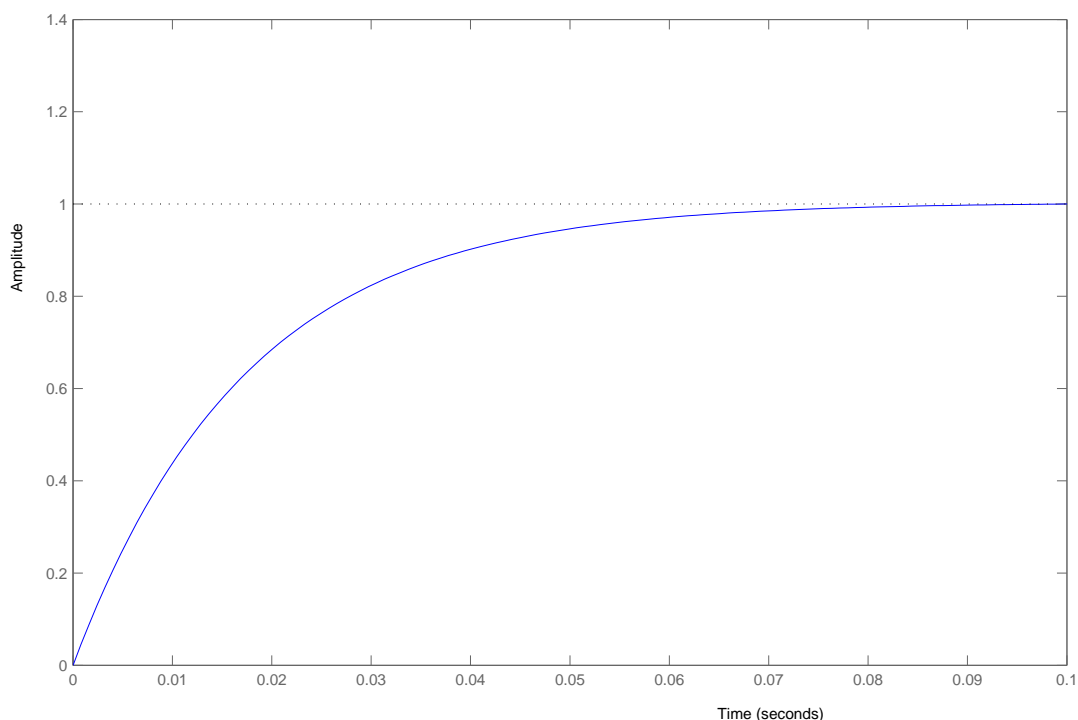


Figura 4.2: Resposta ao degrau do modelo linearizado, utilizando controle proporcional para o sistema com um tanque

delo não linear. A resposta da simulação pode ser verificada na Figura 4.4.

4.2 Sistema com Dois Tanques

Aqui será projetado o controle para o sistema com dois tanques apresentado em 3.7. Apresentando novamente a função de transferência do sistema,

$$G_2(s) = \frac{s + c_1}{c_2 (s + c_3) (s + c_4)},$$

onde, $c_1 = \left(\frac{a_3}{A_3} \sqrt{\frac{g}{2h_{3,0}}} \right) + \left(\frac{a_3}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{1,0}}} \right) \left(\frac{1-\gamma_1}{\gamma_1} \right)$, $c_2 = \left(\frac{\gamma_1 k_1}{A_1} \right)$, $c_3 = \frac{a_3}{A_3} \sqrt{\frac{g}{2h_{3,0}}}$ e $c_4 = \frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{1,0}}}$.

E então analisando o lugar das raízes, apresentado em 4.5. Vemos que o sistema possui todos os polos localizados no semiplano esquerdo, para qualquer ganho K aplicado, ou seja, o sistema é sempre estável.

Analisando o lugar das raízes do sistema, podemos projetar o controle para este sistema por alocação de polos. Considerando a utilização de um controle PI, teremos um polo na origem e podemos alocar o zero do controlador de forma a cancelar um dos polos, tendo assim polos dominantes fazendo com que o sistema se comporte

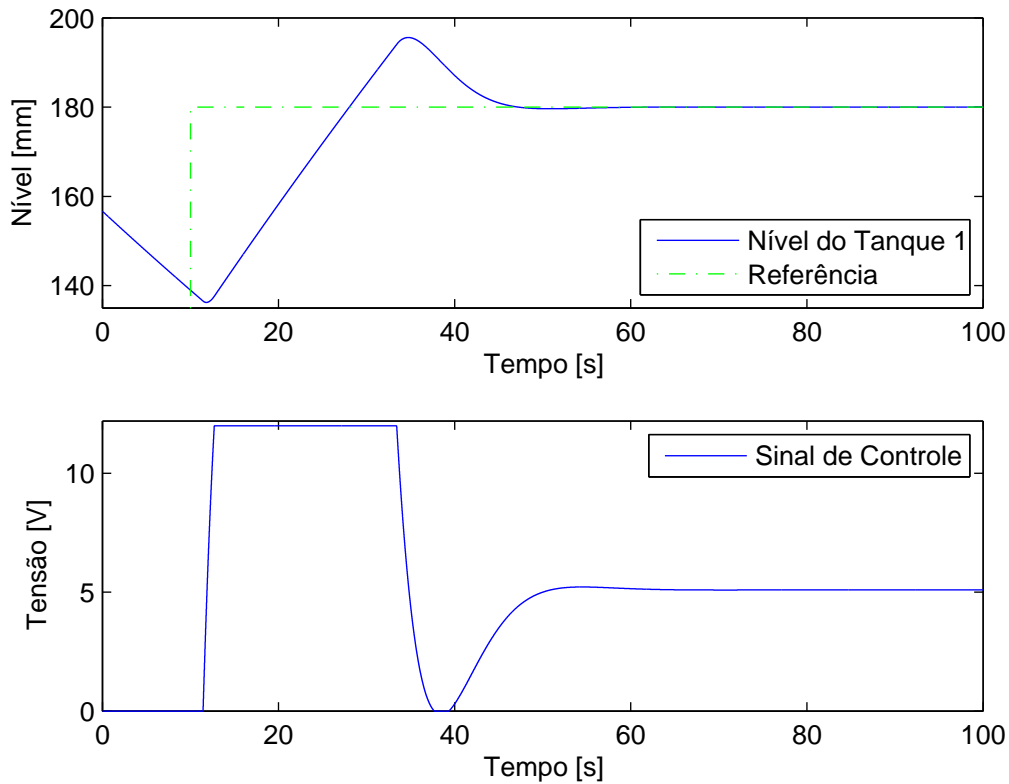


Figura 4.3: Simulações numéricas com degrau na referência utilizando o modelo não linear e controle PI para o sistema com um tanque

como um sistema de segunda ordem e escolhendo um ganho que os polos estejam no eixo real teríamos uma resposta sem sobrepasso.

Porém, ao alocar o zero desta forma, estamos deixando o sistema significativamente mais lento. Considerando que o sistema já se comporta de maneira lenta, deixá-lo ainda mais lento não é um bom resultado. Assim, devemos então, objetivar alocar o zero do controlador de forma que não deixe o sistema muito lento e também não gere um sobrepasso.

Obtemos um resultado satisfatório utilizando o mesmo controle PI utilizado no sistema I, com ganhos $K = 30$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$, dessa forma todos os polos serão alocados no eixo real. Temos, então, a resposta ao degrau na referência do modelo com dois tanques linearizado, como pode ser verificado na Figura 4.6.

Com esse controle PI podemos simular agora utilizando o modelo não linear do sistema. Como pode ser verificado na Figura 4.7.

O sistema não apresenta erro de estado estacionário, tempo de resposta satisfatório e pouca oscilação. Novamente o sobrepasso aparece devido, talvez, à ausência de um sistema anti *wind-up*.

Simulando para múltiplos degraus de referência, Figura 4.8:

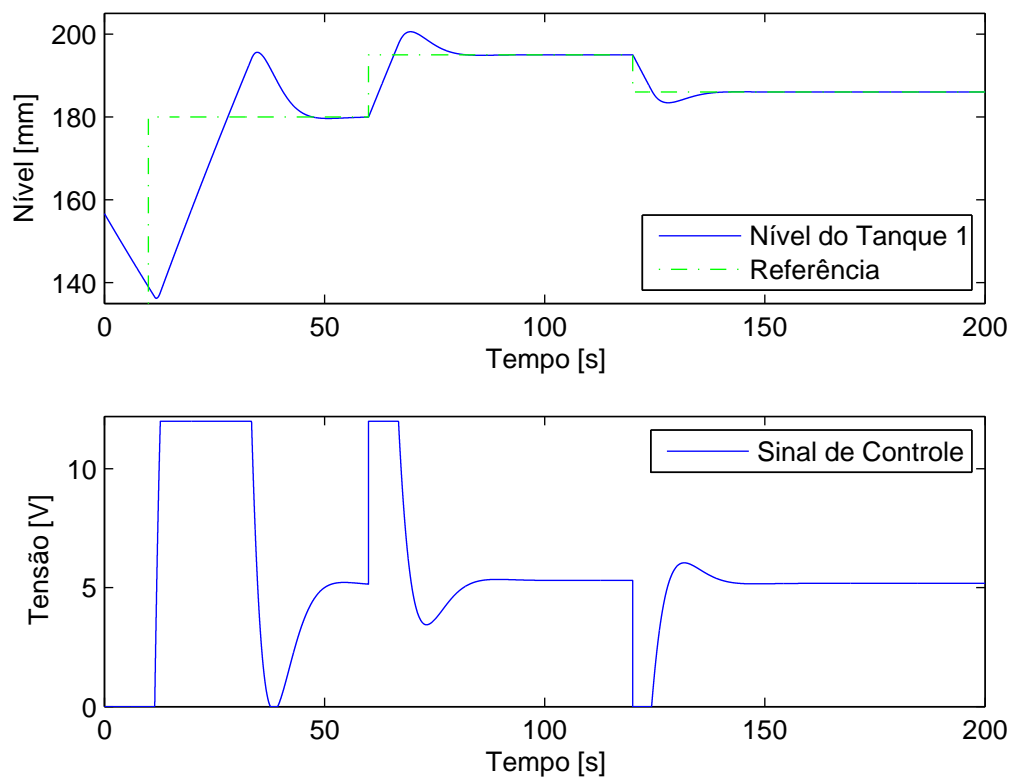


Figura 4.4: Simulação numérica do modelo não linear com um tanque utilizando controle PI

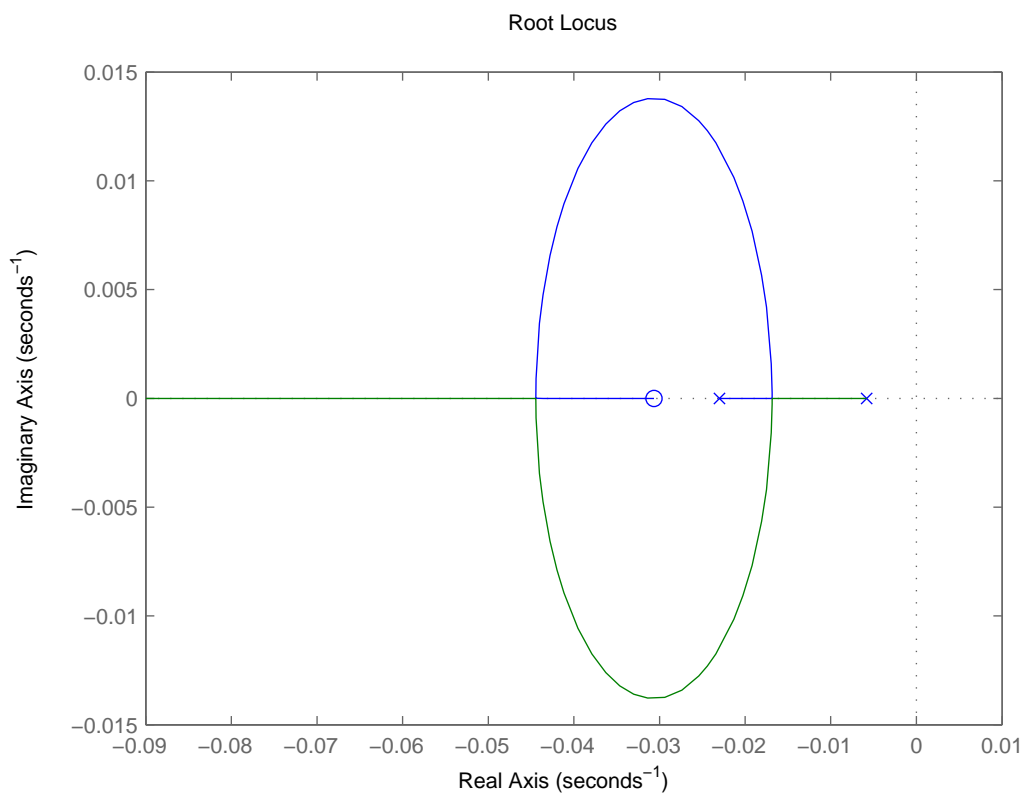


Figura 4.5: Lugar das raízes para o sistema com dois tanques

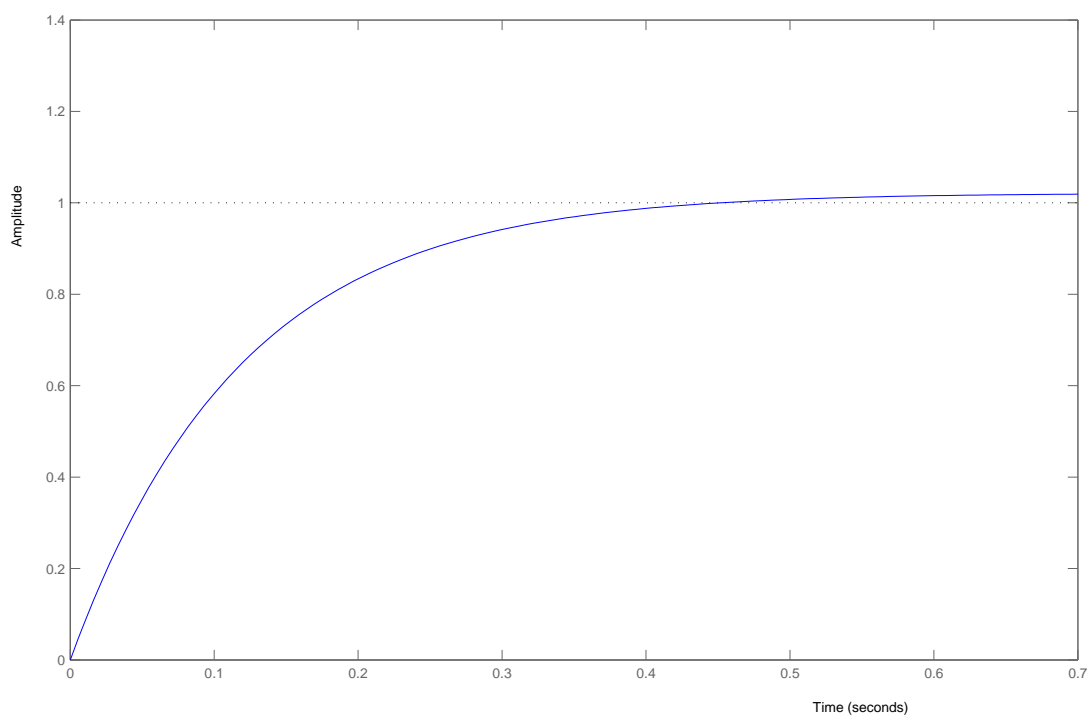


Figura 4.6: Resposta ao degrau do modelo linearizado, utilizando controle PI para o sistema com dois tanques

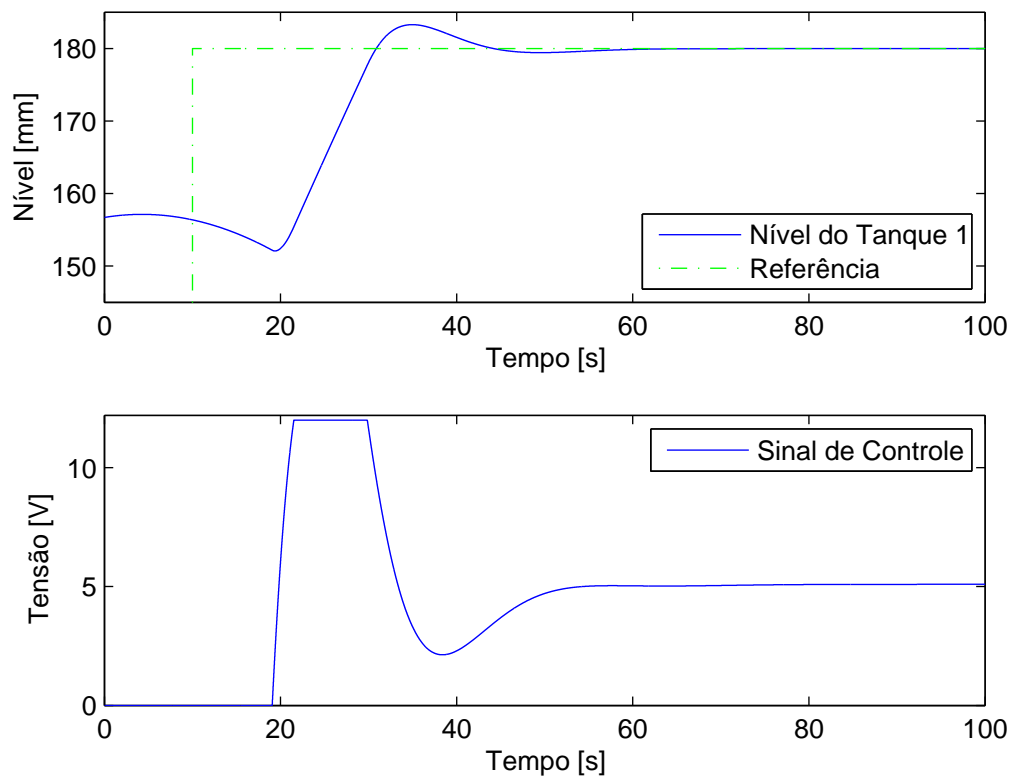


Figura 4.7: Simulações numéricas com degrau na referência utilizando controle PI para o sistema com dois tanques

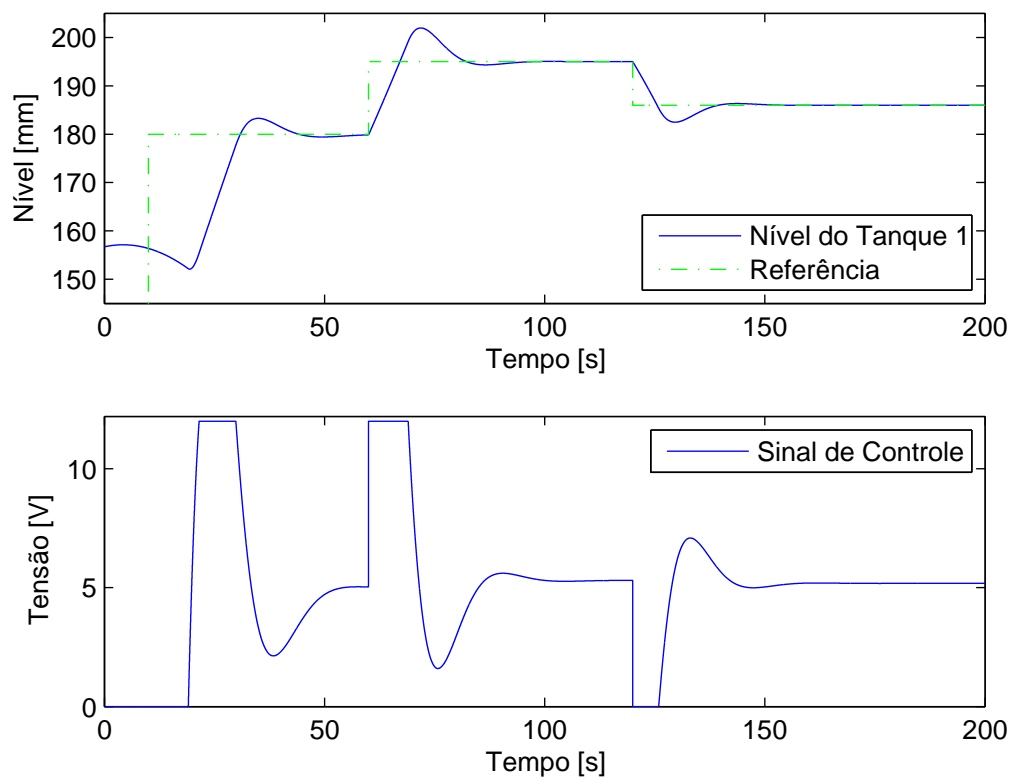


Figura 4.8: Simulação numérica do modelo não linear com dois tanques utilizando controle PI

Capítulo 5

Resultados Experimentais

Este capítulo detalha o processo de testes dos componentes, assim como os resultados dos experimentos realizados.

Para a realização do experimento não será utilizado o sistema completo (quatro tanques), o mesmo será adaptado para a montagem de sistemas equivalentes aos apresentados nos modelos simulados.

5.1 Testes Preliminares

Ao iniciar o projeto, todo o sistema estava desmontado e inativo há certo tempo. Portanto se fez necessário testar cada componente para garantir que estivessem com correto funcionamento, sem avarias. Não só isso, tais testes realizaram um papel importante na aprendizagem e entendimento dos componentes.

Nessa seção serão apresentados (em ordem cronológica) a metodologia e resultados de alguns testes preliminares feitos com os objetivos supracitados.

5.1.1 *Software* de Programação Ladder (VersaPro)

VersaPro é o *software* de programação em Ladder da GE destinado ao modelo de CLP utilizados neste trabalho.

Por ambos, CLP e *software*, serem do final dos anos 90, o *software* VersaPro apenas possuía completo suporte a sistemas operacionais Windows XP ou anteriores. Portanto, foi necessária a criação de uma máquina virtual para rodar tal sistema operacional.

Com o VersaPro instalado, se fez a comunicação com o CLP através da porta serial, utilizando a porta port1 (padrão RJ-45) do CLP.

5.1.2 Controlador Lógico Programável

Para os primeiros testes com o CLP, foi carregado no mesmo um programa básico em Ladder, com o objetivo de testar o funcionamento de cada entrada e saída (tanto digitais, como analógicas) do *hardware*.

O VersaPro disponibiliza leitura das variáveis do CLP em tempo real, o que facilitou a verificação de seu funcionamento. Além disso, também foram feitas leituras das saídas com um osciloscópio para verificar se os dados apresentados pelo VersaPro eram compatíveis com as saídas reais, assim como testes nas entradas, usando um gerador de sinais.

O código em Ladder implementados no CLP é bem simples, conta com dois botões virtuais (que podem ser controlados no supervisor) e um controlador PID, o qual foi ajustado com ganhos de acordo com cada experimento realizado.

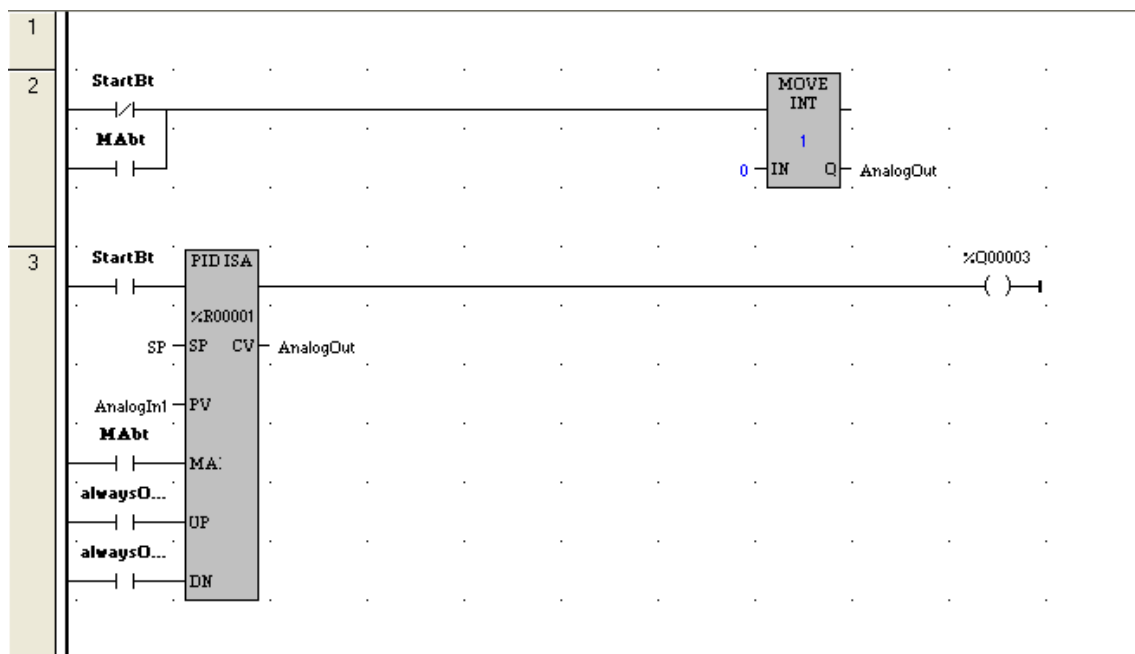


Figura 5.1: Código em linguagem Ladder utilizado nos experimentos deste projeto

5.1.3 Módulo de Potência

No teste do módulo de potência foram utilizados, um gerador de sinais, que provia um sinal analógico 0 à 10 V para o CLP, o qual gerava uma saída proporcional de 0 à 20 mA, que por fim ia ao módulo de potência.

Esperava-se que o módulo convertesse tal sinal para uma sinal PWM 0 à 5V. Utilizando um osciloscópio verificou-se, então, o funcionamento do módulo para ambas as entradas e saídas. Em seguida foi feito o teste para as funções de geração de sinais no modo manual do módulo.

5.1.4 Bombas

As bombas foram testadas separadamente, usando apenas um gerador de sinal que enviava sinal para o módulo de potência que por fim alimentava as bombas. Certificou-se também que a fonte utilizada para alimentar as bombas apresentava capacidade de tensão e corrente adequados para o pleno funcionamento das bombas, seguindo as especificações apresentadas na tabela 2.1.

5.1.5 Servidor OPC e Supervisório

Uma das formas mais simples de fazer comunicação de um CLP com um computador ou um sistema supervisório é através de um servidor OPC. Neste trabalho foi escolhido utilizar o *software* KEPServerEX na sua versão grátis para criação desse servidor OPC.

A principal vantagem de utilizar desta forma de comunicação neste trabalho é a facilidade de integração com o Matlab & Simulink.

Após configurado o Servidor KEPServerEX para se comunicar devidamente com o CLP, fazendo leitura e escrita das variáveis de interesse especificadas. Foi relativamente simples criar uma espécie de sistema supervisório, utilizando a *toolbox* OPC do Matlab. Esse sistema permite monitoramento e escrita de variáveis em tempo real e também facilita a geração de gráficos, para melhor compreensão e apresentação dos resultados. A Figura 5.2 exemplifica um sistema montado para este fim no Simulink. Pode-se notar que foram usados botões virtuais (liga/desliga) para controlar funções do CLP, conseqüentemente inclusos também nas linhas de código Ladder do controlador.

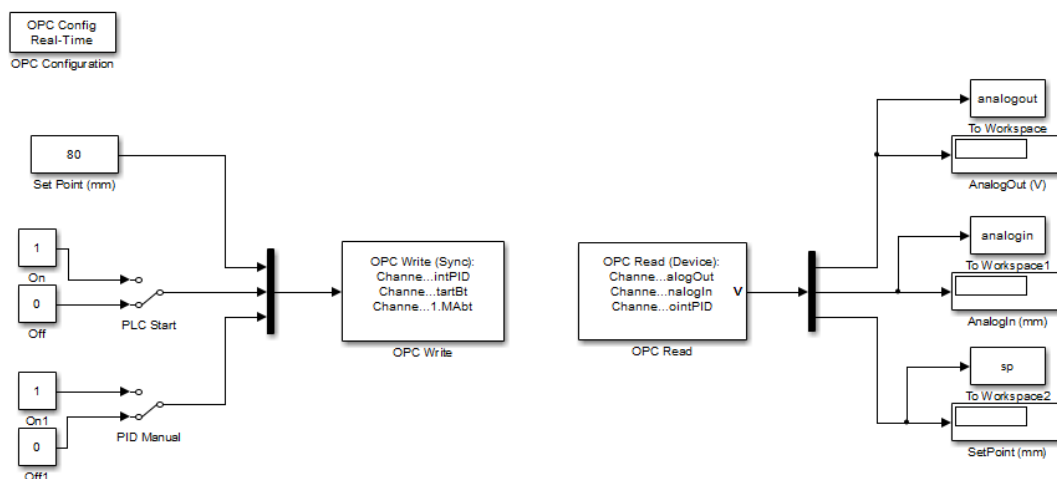


Figura 5.2: Modelo em Simulink de um sistema supervisório utilizando servidor OPC

É importante mencionar que o servidor OPC possui uma frequência de varredura e atualização das variáveis utilizadas pelo CLP, tal frequência pode ser ajustada pelo usuário. Mas devido a isso a leitura é feita de forma discreta, o que conseqüentemente caracteriza tal padrão nos gráficos apresentados mais a frente.

A planta que estamos trabalhando neste projeto possui a característica de ter uma dinâmica lenta, por este motivo a frequência de leitura do servidor OPC foi configurado de forma que atendesse, sem problemas, a utilização na planta proposta.

5.1.6 Primeiros Testes em Malha Aberta e Malha Fechada

Decidiu-se fazer os primeiros testes do sistema em malha aberta usando um motor DC e um CLP.

Porém o CLP apenas tem a capacidade de gerar sinais analógicos de 0 à 10 V, bem como o módulo de potência, que não foi projetado para receber ou gerar sinais negativos, para o motor seria necessário gerarmos sinais negativos para possibilitar que o mesmo girasse para ambos os lados. Para isso foi implementado o circuito demonstrado na Figura 5.3. Esse circuito recebia como entrada a saída analógica do CLP (0 à 20 mA) e tinha como saída o sinal que alimenta o motor DC (0 à 5 V).

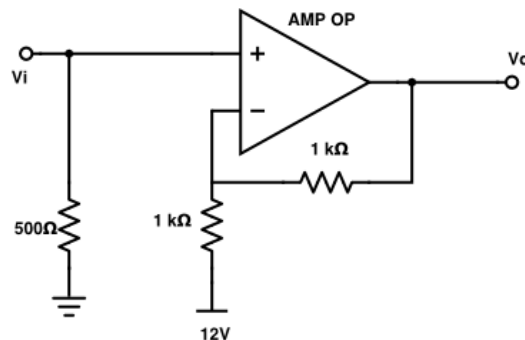


Figura 5.3: Esquema do circuito de entrada do motor DC

Posteriormente foi proposto implementar um controle de posição em malha fechada para o motor DC.

Inicialmente se tentou usar o *encoder* já acoplado ao motor para se fazer a leitura da posição, para isso seria necessário utilizar um entrada digital do CLP para fazer a contagem de pulsos do *encoder*. Porém o *encoder* possuía duas características que dificultariam tal processo, primeiro, o sinal gerado pelo *encoder* tinha picos de 5 V; isso é um problema pois as entradas digitais do CLP leem de 0 à 24 V (detectando sinal *high* acima de 15 V). Segundo problema, é a frequência do sinal do *encoder* que atingia frequências próximas de 44 kHz em velocidades mais elevadas; o CLP tem a capacidade de ler sinais pulsados com a frequência máxima de 10 kHz. Há formas de contornar tais problemas, porém foi decidido outra forma de leitura de posição do eixo do motor, que seria, certamente, mais simples de se implementar.

Para fechar a malha e fazer a leitura de posição do motor, foi desenvolvido um suporte para tornar possível a utilização de um potenciômetro multivoltas diretamente acoplado ao eixo do motor. Pode-se verificar a forma como o potenciômetro foi acoplado ao motor na Figura 5.4.

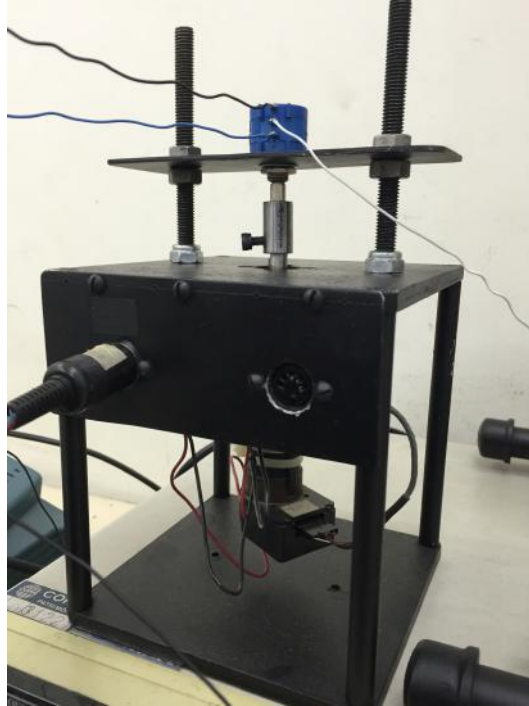


Figura 5.4: Potenciômetro e seu acoplamento com o motor DC

Tendo todo o aparato montado, em malha fechada, foi implementado um controle PI, ajustado empiricamente. Na Figura 5.5 é apresentado o resultado deste teste, como podemos ver, o controle funcionou de forma satisfatória.

Faz-se importante observar que a discretização do sinal apresentado é devido à taxa de amostragem configurada no servidor OPC.

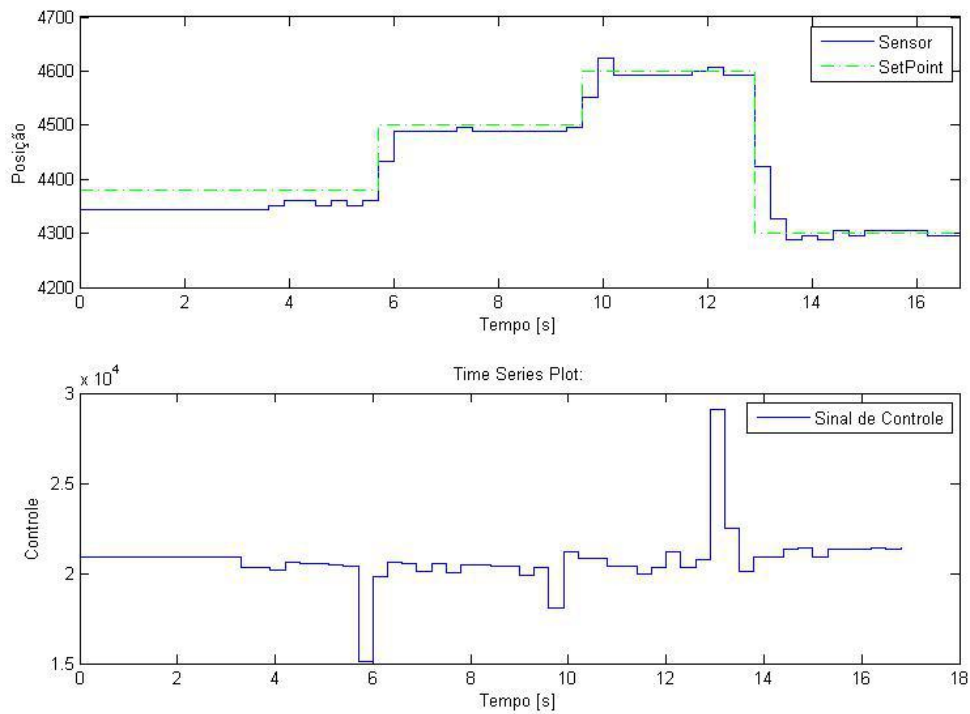


Figura 5.5: Resultados experimentais usando controle PI para controle de posição de um motor DC. Os valores apresentados no eixo vertical estão apresentados em escala de 0 a 32000 (valores apresentados internamente pelo CLP), equivalente, neste caso, à uma conversão linear de 0 à 10 V.

5.2 Experimentos

Serão testados dois sistemas experimentais, similares aos apresentados nas Seções 4.1 e 4.2. Posteriormente os resultados serão comparados aos resultados das simulações dos modelos.

Para a leitura dos dados do CLP, o servidor OPC foi configurado para uma taxa de amostragem de 20 milissegundos. Considerando a dinâmica lenta do sistema, essa taxa se faz satisfatória.

5.2.1 Resultado Experimental do Sistema com Um Tanque

Esta experimentação consiste no controle do nível de apenas um tanque, direcionando todo o fluxo da bomba para o tanque 1. Verificar esquemático 3.5.

Primeiramente foi realizado e experimento para controle de nível de um único tanque usando os valores dos ganhos para o controle PI encontrados para o modelo

apresentado no Capítulo 3. Sendo o ganho proporcional $K = 30$ e o ganho integral $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$.

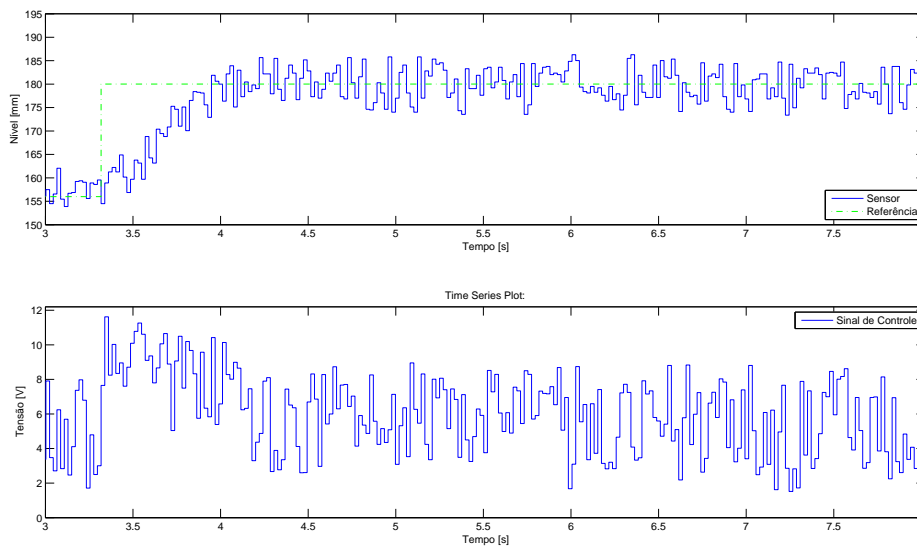


Figura 5.6: Resultado experimental para controle PI do nível de um tanque, com ganhos $K = 30$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$

Na Figura 5.6 é visível a presença de uma oscilação no sinal de nível gerado pelo sensor. Essa oscilação surge, principalmente, devido à oscilação do espelho d'água, que consequentemente faz a boia de detecção de nível oscilar.

Como o controle está configurado com um ganho proporcional elevado, $K = 30$. Isso faz com que tais oscilações na leitura do nível gere grandes oscilações no sinal de controle. O que obviamente é uma característica indesejável. Por este motivo, foram realizados diversos testes de resposta ao degrau, alterando o valor do ganho proporcional.

Dentre os testes realizados, a utilização do ganho proporcional $K = 10$ mostrou uma melhora significativa no sistema. Como pode ser observado na Figura 5.7, com esta alteração do ganho, as oscilações no sinal de controle reduziram drasticamente, apesar das oscilações na leitura do sensor.

Ainda com o propósito de tentar melhorar o comportamento do sistema, foram realizados testes alterando apenas o ganho integral do controle, $\frac{1}{\tau_i}$. Mas não foram obtidas melhoras significativas. Como pode ser verificado na Figura 5.8:

Realizados tais experimentos, decidiu-se manter os ganhos para o controle do modelo experimental sendo $K = 10$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$. Apesar do sistema não se comportar de forma ideal devido às oscilações na leitura do nível, podemos notar que o sistema se estabiliza em torno da referência desejada, com um tempo de assentamento satisfatório e sem que haja sobrepasso demasiado.

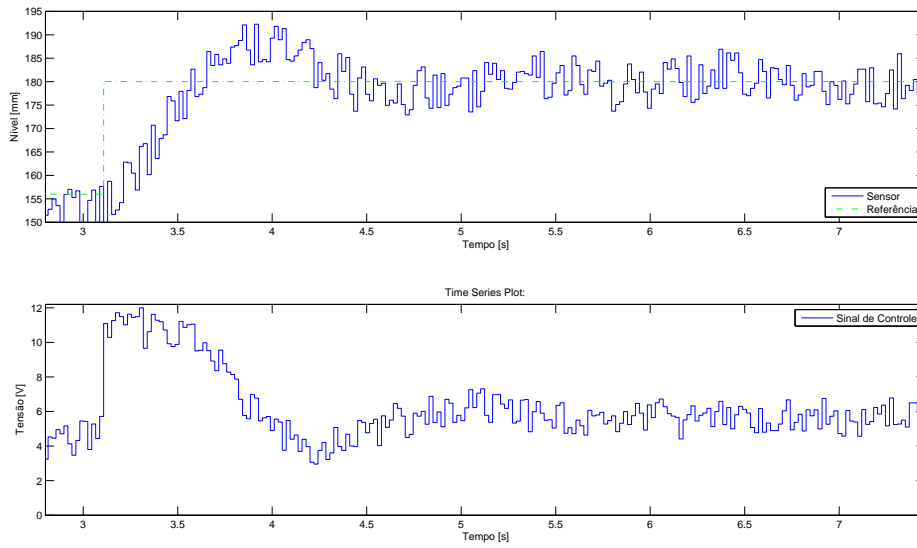


Figura 5.7: Resultado experimental para controle PI do nível de um tanque, com ganhos $K = 10$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$

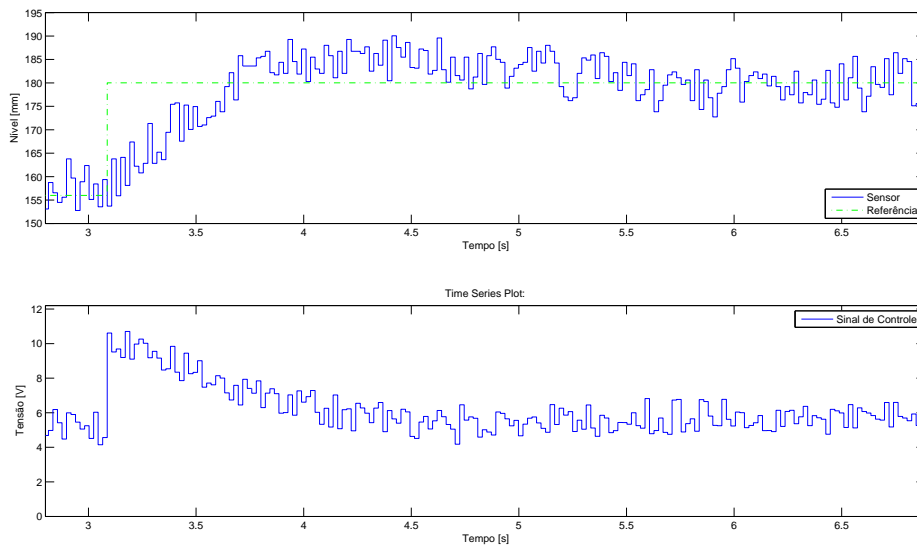


Figura 5.8: Resultado experimental para controle PI do nível de um tanque, com ganhos $K = 10$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,05$

5.2.2 Resultado Experimental do Sistema com Dois Tanques

Para este sistema incluiremos mais um tanque. Utilizando os tanques 1 e 3, de forma que, o fluxo de saída da bomba passará por uma conexão T, onde uma porção γ_1 será direcionada ao tanque 1 e, por consequência, $(1 - \gamma_1)$ direcionada ao tanque 3, que então deságua no tanque 1. Da mesma forma, será controlado apenas o nível do tanque 1. Verificar esquemático apresentado em 3.6.

Da mesma forma como foi feito no sistema experimental com um tanque, realizou-se primeiramente um teste de resposta ao degrau do sistema, utilizando os ganhos projetados nas simulações numéricas, ganho proporcional $K = 30$ e o ganho integral $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$.

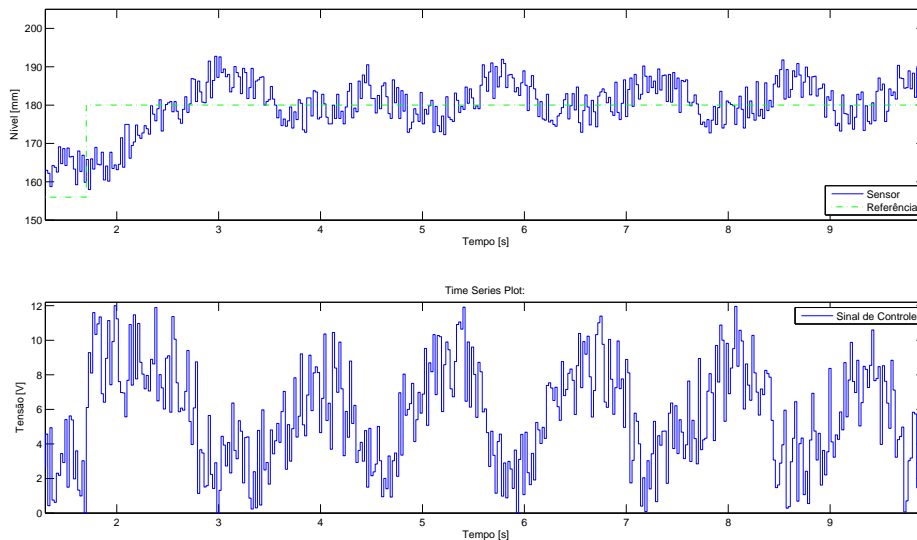


Figura 5.9: Resultado experimental para controle PI do nível do sistemas com dois tanques, com ganhos $K = 30$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$

Na Figura 5.9, podemos ver que também para este sistema o ganho proporcional elevado gera um comportamento indesejado para o sinal de controle, devido ao mesmo fator mencionado anteriormente, à oscilações da leitura de nível do sensor.

Novamente, notamos que reduzir o ganho proporcional para $K = 10$ melhorava significativamente as oscilações no sinal de controle, como pode ser visto na Figura 5.10.

Porém, com a diminuição do ganho proporcional o sistema se comporta cada vez mais de forma oscilatória, de modo que o mesmo não rastreia satisfatoriamente a referência.

Por fim, para diminuir as oscilações em torno da referência foi utilizado um

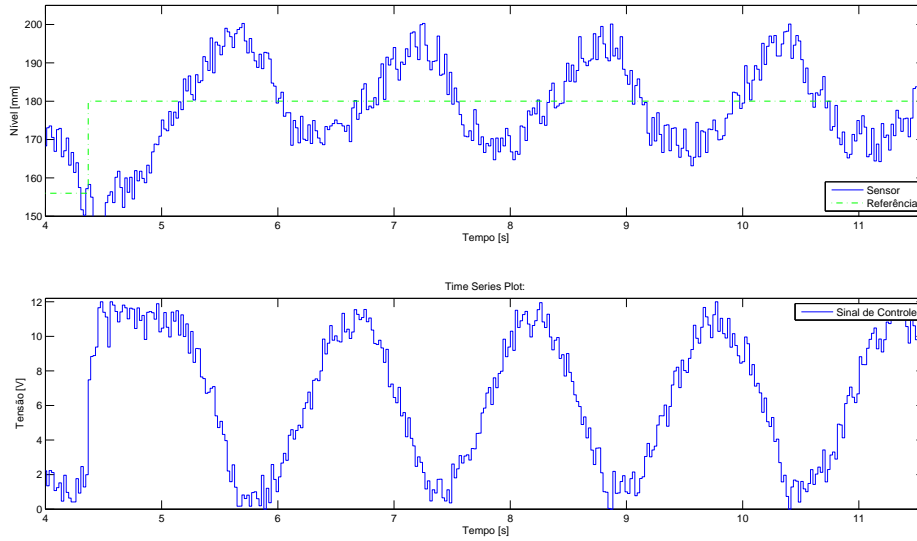


Figura 5.10: Resultado experimental para controle PI do nível do sistemas com dois tanques, com ganhos $K = 10$ e $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$

controle PID, com o ganho derivativo definido de forma experimental. Apenas com a finalidade de comparação com o controlador PI, verificando se o acréscimo de um fator derivativo diminuiria as oscilações.

Foi utilizado, então, ganho proporcional $K = 10$, o ganho integral $\frac{1}{\tau_i} = 0,2$ e ganho derivativo $K_d = 0,03$. O PID utilizado neste experimento não possui filtro para o calculo da função derivativa. Considerando o PID na forma:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(s) ds + K_d \frac{de(t)}{dt} \right].$$

Como pode ser verificado na Figura 5.11, com o uso do controle PID o sistema segue referência de forma satisfatória, porém o sinal de controle apresenta grandes oscilações.

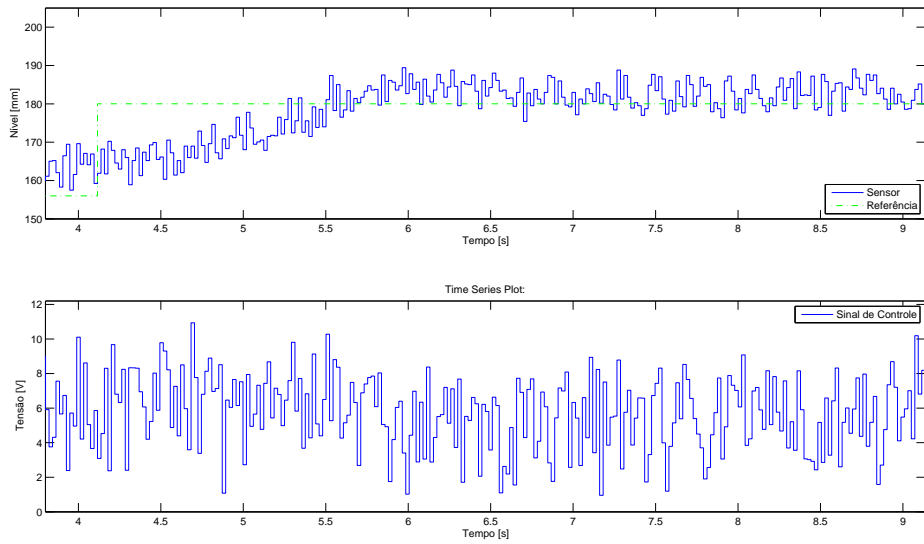


Figura 5.11: Resultado experimental para controle PID do nível do sistemas com dois tanques, com ganhos $K = 10$, $\frac{1}{\tau_i} = 0.2$ e $K_d = 0,03$

Capítulo 6

Conclusão

Neste trabalho foi proposta uma modificação na bancada de controle de nível composta por quatro tanques desenvolvida em [1] de modo a utilizar visão computacional para detecção do nível do tanque. Sensores capacitivos eram usados em JÚNIOR et al. 2009. Neste projeto enfoque foi dado ao sensoriamento através da visão computacional, que se faz de forma rápida e precisa, com nível de ruído similar ao sensor capacitivo. Este esquema de medição via câmeras foi desenvolvido com sucesso, se mostrou preciso para esta aplicação, com uma resolução adequada e com baixa interferência, satisfazendo os requisitos do projeto. Além disso, o uso de visão computacional possibilita diversos ajustes e aperfeiçoamentos futuros que podem melhorar significativamente o desempenho do sistema.

A modelagem de todo o sistema composto pelos quatro tanques foi revisitada e modelos lineares e não lineares foram apresentados. A partir das equações de Bernoulli foi obtido um modelo não linear (MIMO). Para avaliar o funcionamento do novo sistema dotado de visão computacional, diferentemente de JÚNIOR et al. 2009, a implementação em ambiente Matlab & Simulink considerou dois subsistemas monovariáveis, com um e dois tanques. Uma vez que foram utilizados os tanques e a bomba de acionamento de [1], não foi necessário realizar a identificação do modelo. Para o primeiro subsistema apresentado, subsistema com apenas um tanque, o modelo linear e a correspondente identificação mostraram-se satisfatórios, de modo que as simulações corresponderam aos resultados obtidos experimentalmente. Já para o segundo subsistema, utilizando dois tanques, o modelo linear obtido apresentou resultados em simulações diferentes dos resultados experimentais, indicando possivelmente erro na identificação do sistema.

Enquanto em JÚNIOR et al. 2009 o foco foi dado ao projeto do controlador, aqui o enfoque foi dado a modificação da planta visando utilizar visão computacional para medir o nível. Apesar dos diferentes enfoques em ambos os projetos foram utilizados controladores do tipo Proporcional-Integral (PI). Com as poucas restrições de projeto e objetivos de controle apresentados neste trabalho, o projeto de controle

se fez por alocação de polos, tendo este atendido as especificações apresentadas. Porém, observou-se nos resultados experimentais que as oscilações presentes no sinal do nível do tanque interferem bastante no comportamento do sistema com a utilização do controle aqui apresentado.

Quanto ao *Hardware* de controle, neste projeto e em JÚNIOR et al. 2009, todo o controle da planta foi codificado em linguagem Ladder, usando os ganhos de controle projetados. Em JÚNIOR et al. 2009, utilizou-se o pacote *Guide* do *Matlab* para criação de um supervisor. Neste trabalho o supervisor foi implementado em ambiente *Matlab/Simulink* utilizando o pacote *OPC*. Utilizar o ambiente *Simulink* como supervisor é atrativo por oferecer um ambiente familiar de desenvolvimento permitindo a leitura das variáveis do processo.

Todos os componentes foram reavaliados e testados para tornar a bancada operacional. A bancada encontra-se funcional e disponível para utilização no Laboratório de Controle do Curso de Engenharia de Controle e Automação (LabECA). Com isso podemos dizer que o projeto atingiu os objetivos propostos. Por fim, em resumo, pode-se concluir que este trabalho contribuiu para a disponibilização:

1. de uma **bancada para controle de quatro tanques para o LabECA** para práticas de laboratório e demais estudos acadêmicos.
2. da **medição de nível através de visão computacional** como alternativa para medição do nível.
3. de um supervisor que utiliza o **servidor OPC e integra o CLP ao ambiente *Simulink***, possibilitando leitura e escrita de variáveis no controlador através do *Simulink*. Esta interface oferece um fácil e rápido ajuste de parâmetros, assim como botões de ação para o processo.

6.1 Trabalhos Futuros

Podemos listar algumas propostas para desenvolvimento em trabalhos futuros:

- Devida a diferença nos resultados de simulação numérica e os resultados práticos, é importante desenvolver um melhor estudo do modelo utilizando para dois tanques, considerando a apresentação de um modelo não linear e incluindo também a modelagem do ruído de leitura do nível a fim de estudar a interferência deste no controle projetado. E verificar se os testes e simulações realizados foram feitos no entorno do ponto de operação considerado na linearização do modelo do sistema.

- É desejável realizar o desenvolvimento de um controle menos sensível a perturbações na leitura do nível, de modo a melhorar o comportamento do sinal de controle.
- A ampliação do *software* do sistema de visão computacional para leitura do nível de todos os tanques. Na realidade, basta replicar o algoritmo aqui desenvolvido utilizando cor ou formas geométricas diferentes.
- Seria interessante também a implementação de um sistema que seja capaz de reconhecer a distância da câmera em relação ao tanque, removendo assim a restrição de posicionamento fixo desta. Este sistema pode ser feito por exemplo, identificando o raio dos marcadores, sabendo assim a posição da câmera em relação ao tanque.

Referências Bibliográficas

- [1] JÚNIOR, J. A. N. C. *MODELAGEM E CONTROLE DE NÍVEL DE UM SISTEMA DE QUATRO TANQUES*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [2] CHEN, H.-M., CHEN, Z.-Y., SU, J.-P. “Design of a sliding mode controller for a water tank liquid level control system”. In: *Innovative Computing, Information and Control, 2007. ICICIC’07. Second International Conference on*, pp. 335–335. IEEE, 2007.
- [3] NAVEIRA-COTTA, C. P., PONTEDEIRO, E. M., COTTA, R. M. “Environmental impact assessment of liquid waste ponds in uranium milling installations”, *Waste and Biomass Valorization*, v. 4, n. 2, pp. 197–211, 2013.
- [4] JOHANSSON, K. H. “The quadruple-tank process: a multivariable laboratory process with an adjustable zero”, *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, v. 8, n. 3, pp. 456–465, 2000.
- [5] BOLTON, W. “Programmable logic controllers. Burlington”, *USA: Newnes*, v. 5, 2006.
- [6] TOMÉ, J. A., DE MATTOS, G. P. A. “Síntese de Controle para Busca Extremal em um giroscópio utilizando visão computacional e microcontrolador Arduíno”, (a ser publicado), 2016.
- [7] LIBII, J. N. “Mechanics of the slow draining of a large tank under gravity”, *American Journal of Physics*, v. 71, n. 11, pp. 1204–1207, 2003.
- [8] BRADSKI, G., KAEHLER, A. *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. 2008.
- [9] GOODWIN, G. C., GRAEBE, S. F., SALGADO, M. E. *Control system design*, v. 240. Prentice Hall New Jersey, 2001.
- [10] ÖHMAN, M., JOHANSSON, S., ÅRZÉN, K.-E. “Implementation aspects of the PLC standard IEC 1131-3”, *Control Engineering Practice*, v. 6, n. 4, pp. 547–555, 1998.

- [11] FABIAN, M., HELLGREN, A. “PLC-based implementation of supervisory control for discrete event systems”. In: *Decision and Control, 1998. Proceedings of the 37th IEEE Conference on*, v. 3, pp. 3305–3310. IEEE, 1998.
- [12] GEORGINI, M. *Automação aplicada: descrição e implementação de sistemas sequenciais com PLCs*. Ed. Érica, 2000.
- [13] DE OLIVEIRA FARIA, R. “CONTROLE DE NÍVEL EM UM TANQUE SUJEITO A PERTURBAÇÕES E MUDANÇAS DO VALOR DE REFERÊNCIA”. 2013.
- [14] FRANCHI, C. M., CAMARGO, V. L. A. *Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos*. 2008.
- [15] KARLJ, A., TORE, H. “PID controller: theory, design and tuning”, *Instrument Society of America*, 1995.
- [16] ÅSTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. “The future of PID control”, *Control engineering practice*, v. 9, n. 11, pp. 1163–1175, 2001.
- [17] ÇENGEL, Y. C. “JM Mecânica dos fluidos: Fundamentos e aplicações”. 2007.
- [18] RUSLI, E., ANG, S., BRAATZ, R. D. “A quadruple-tank process control experiment”, *Chemical Engineering Education*, v. 38, n. 3, pp. 174–187, 2004.
- [19] WANG, F., REN, X., LIU, Z. “A robust blob recognition and tracking method in vision-based multi-touch technique”. In: *Parallel and Distributed Processing with Applications, 2008. ISPA '08. International Symposium on*, pp. 971–974. IEEE, 2008.

Apêndice A

Rotinas do Matlab/Simulink

Neste apêndice são apresentados os *scripts* e os diagramas de blocos implementados nos simuladores do modelo linear.

A.1 Constantes

O *script* apresentado nesta seção está relacionado aos pontos de operação definidos para o modelo linear utilizado neste trabalho.

```
clc
clear all

h1i = 156.7; %Altura h1 inicial [mm]
h3i = 44; %Altura h3 inicial [mm]

%----- Parametros do modulo -----
kmod = 1.2; %ganho do modulo
v_min = 0; % tensão mínima de saída
v_max = 12; % tensão máxima de saída

%----- Parametros universais -----
g = 978.79*10; % Valor da aceleracao da gravidade [mm/s^2]

%----- Parametros do tanque -----
A = 10.8*10.8*10^2; % Area do tanque [mm^2]
rd1 = 2.3; % raio do dreno 2 [mm]
rd3 = 3.45; % raio do dreno 1 [mm]
k11 = 0.73; % cte de perda de carga pelo dreno 2 para o tq 3
k13 = 0.68; % cte de perda de carga pelo dreno 2 para o tq 3
```

```

a1 = k11*pi*(rd1^2); % Area do orificio de saida do tanque
[mm^2]
a3 = k13*pi*(rd3^2); % Area do orificio de saida do tanque
[mm^2]
h_min = 0; % Nível mínimo
h_max = 395; % Nível máximo [mm]

%————— Parametros da bomba ———
% Verificar bomba que está sendo usada
k1 = 4.47*10^3; % Ganho da bomba 1 + ganho do mod
q1_min = 0; % Vazão mínima
q1_max = k1*v_max; % Vazão máxima (mm^3/s)

r_min = 0; % Tensão mínima da saída A do PLC
r_max = 10; % Tensão máxima da saída A do PLC [V]
kc = 1/30; % Ganho do sensor
ymax = 10; % Tensão máxima da saída do sensor de nível [V]
ymin = 0; % Tensão mínima da saída do sensor de nível [V]
gamma1 = 0.75; % Parcela do fluxo da bomba 1 para o tq 1

```

A.2 Diagrama de blocos

Serão apresentados os diagramas de blocos utilizados no Simulink para realização das simulações realizadas neste trabalho.

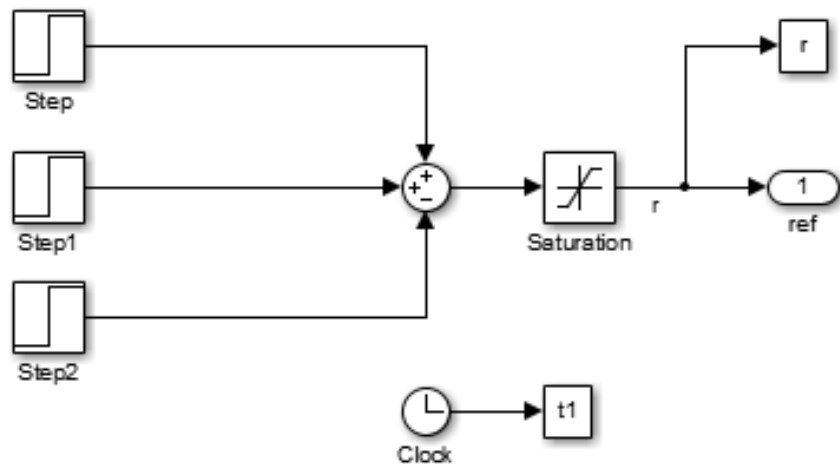


Figura A.1: Diagrama de blocos da referência

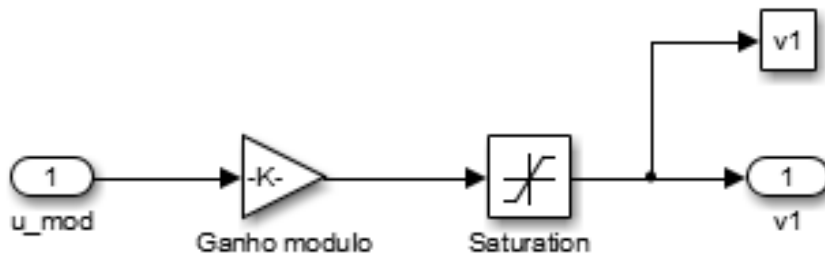


Figura A.2: Diagrama de blocos do módulo de potência

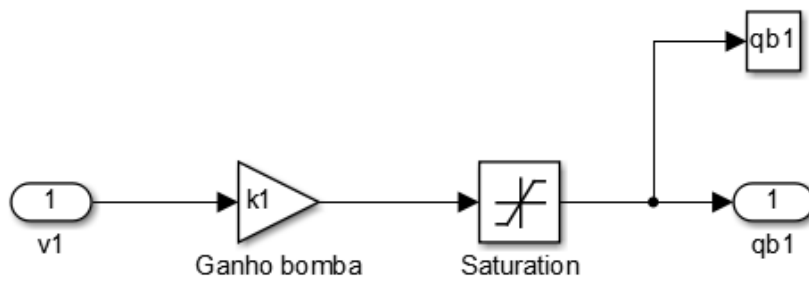


Figura A.3: Diagrama de blocos da bomba

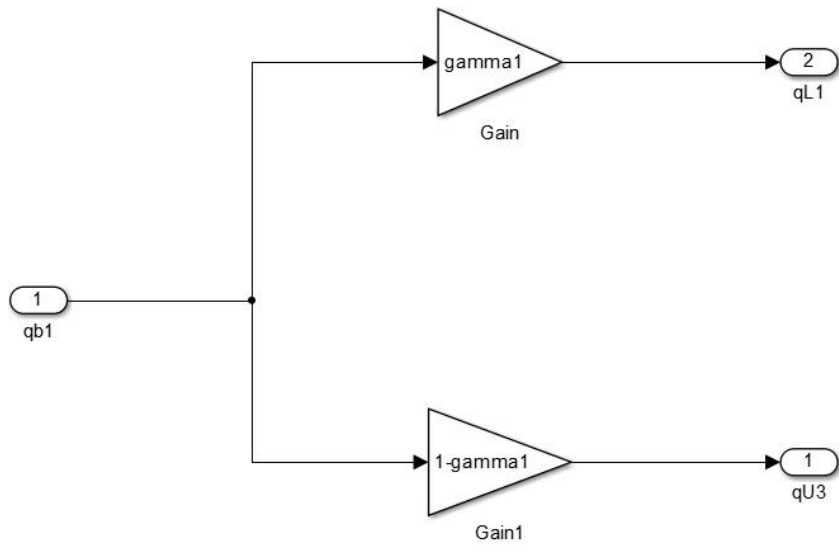


Figura A.4: Diagrama de blocos da conexão T

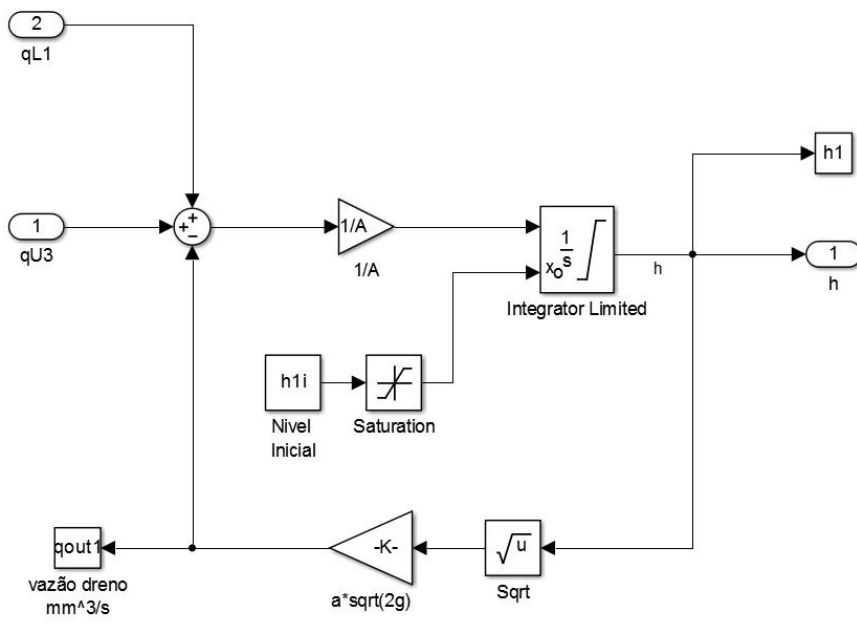


Figura A.5: Diagrama de blocos do tanque 1

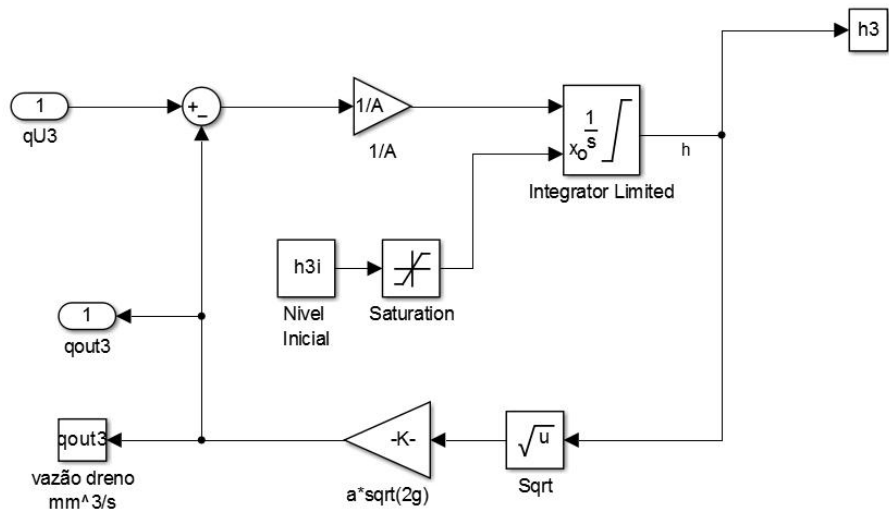


Figura A.6: Diagrama de blocos do tanque 3

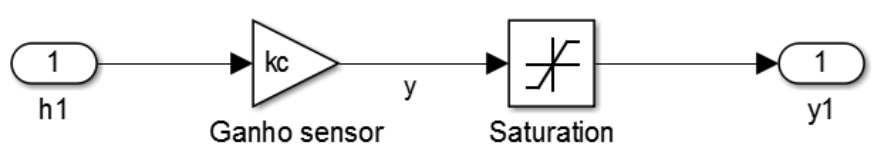


Figura A.7: Diagrama de blocos do sensor

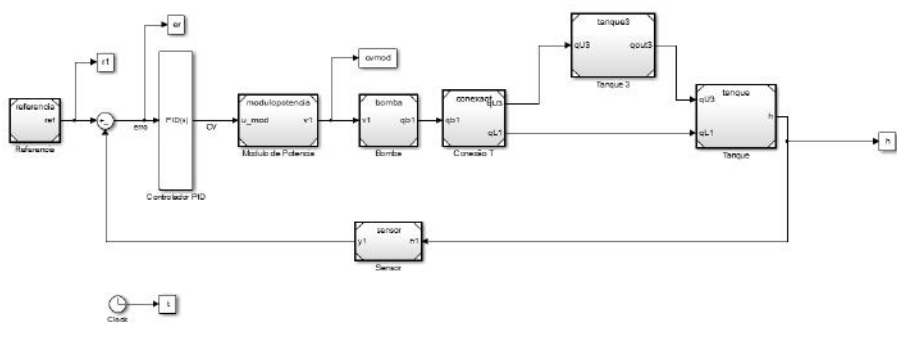


Figura A.8: Diagrama de blocos da malha fechada de controle do sistema