

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Controle de uma planta de nível através de Controle Clássico e Controle Adaptativo via Aproximação

Lucas Bicalho Teixeira

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

Belo Horizonte, Julho de 2019

Monografia

Controle de uma planta de nível através de Controle Clássico e Controle Adaptativo via Aproximação

Monografia submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado Didático do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos para aprovação na disciplina Projeto Final de Curso II.

Belo Horizonte, Julho de 2019

Resumo

Este projeto tem como objetivo utilizar duas estratégias para controlar uma planta de nível. Uma das estratégias utilizada é a implementação de um controlador por um método clássico. A outra estratégia é utilizar controle adaptativo baseado em aproximação em que são utilizados sistemas nebulosos como aproximadores universais para modelagem de um sistema que contém dinâmica desconhecida. Depois dos dois controladores implementados, comparar as duas estratégias, definindo os prós e contras de cada metodologia para o problema apresentado.

Abstract

This project aims to use two strategies to control a level plant. One of these strategies is an implementation of a controller by a classical control method. The other strategy is to use Adaptive Approximation Based Control in which fuzzy systems are used as universal approximators for modeling a system that contains unknown dynamics. After the two controllers implemented, compare the two strategies, defining the pros and cons of each methodology for the presented problem.

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	iii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Justificativa	2
1.2 Objetivos do Projeto	3
1.3 Local de Realização	3
1.4 Estrutura da Monografia	3
2 Descrição do Processo	5
2.1 Instrumentação do Processo	5
2.1.1 A planta de Nível	5
2.1.2 Placa de Aquisição	6
2.1.3 Condicionador de Sinais	8
2.1.4 Softwares utilizados	10
2.1.5 Diagrama de interligação do sistema	10
2.2 Estado da Arte	10
2.3 Resumo do Capítulo	11
3 Metodologia	13
3.1 Técnica 1 - Controladores PI em cascata	13
3.1.1 Modelagem e validação do modelo da Válvula CV-1	13
3.1.2 Projeto e simulação do Controlador PI da Válvula CV-1	15
3.1.3 Modelagem e validação do modelo do Tanque	17
3.1.4 Projeto e simulação do controlador PI do Tanque	18
3.2 Técnica 2 - Controle adaptativo via aproximação	21
3.2.1 Projeto e ajuste do controlador adaptativo via aproximação da válvula CV-1	22
3.2.2 Projeto e ajuste do controlador adaptativo via aproximação do nível do tanque	27

4	Resultados	29
4.1	Técnica 1 - Controladores em cascata	29
4.1.1	Controle da Válvula CV-1 e comparação com a simulação	29
4.1.2	Controle do nível do Tanque e comparação com a simulação	30
4.2	Técnica 2 - Controle adaptativo via aproximação	33
4.2.1	Controle adaptativo da Válvula CV-1 e comparação com o controle clássico	33
4.2.2	Controle adaptativo do nível do Tanque e comparação com o controle clássico	34
5	Conclusões	39
5.1	Considerações Finais	39
5.2	Propostas de Continuidade	39
	Referências Bibliográficas	41

Lista de Figuras

1.1	Gráfico que relaciona, no eixo X, a corrente(mA) fornecida à válvula e, no eixo Y, a tensão(V) no potenciômetro instalado como posicionador da válvula. <i>Fonte:</i> [1]	1
1.2	Representação da malha de controle com dois controladores PI em cascata, já que são sistemas de primeira ordem, para controlar todo o processo.	2
1.3	Representação do elementos que compõem um sistema de controle adaptivo por aproximação. Nesse caso, o sistema é o conjunto tanque, válvula de controle e sensor de nível. O nível medido pelo sensor é a saída do sistema e a ação de controle é a atuação sobre a válvula. O controlador, a cada iteração, atualiza seus ganhos a partir do aproximador universal. <i>Fonte:</i> [2]	2
2.1	Imagem da planta em uma versão mais nova, mas muito similar à utilizada, com toda sua instrumentação empregada no projeto. <i>Fonte:</i> [3] .	5
2.2	Fluxograma de processos da planta de nível que contém todos os instrumentos, e suas respectivas identificações. <i>Fonte:</i> [3]	6
2.3	Foto da válvula de controle CV-1 e seu sensor de posição instalados na planta de nível.	7
2.4	Foto do sensor de nível instalado na planta.	7
2.5	Placa de Aquisição de dados - USB-6009	8
2.6	Imagem do circuito condicionador de sinais utilizado para integração entre a placa de aquisição e a instrumentação da planta.	9
2.7	Foto do protoboard utilizado para alimentar o circuito condicionador de sinais.	9
2.8	Diagrama com todos equipamentos utilizados no projeto e como estão interligados.	10
3.1	Gráfico que apresenta, em amarelo, o degrau de 2,5 V aplicado como entrada. A saída do sistema, em azul, medido pelo sensor de posição da válvula de controle CV-1 e a saída do modelo obtido, em vermelho, com a aplicação da mesma entrada aplicada ao sistema.	14
3.2	Gráfico que apresenta, em azul, a saída do sistema medido pelo sensor de posição da válvula de controle CV-1 e, em vermelho, a simulação da saída do modelo obtido com a aplicação do mesmo degrau aplicado ao sistema.	15

3.3	Lugar das raízes de malha fechada. Em azul o polo de malha aberta do modelo da Válvula CV-1, em vermelho o polo e o zero do controlador PI desenvolvido. Em rosa os polos de malha fechada.	16
3.4	Simulação da malha de controle da Válvula de controle CV-1 com referência constante de 3,2 V.	17
3.5	Gráfico que apresenta, em amarelo, o degrau de 3.5 V aplicado como entrada. A saída do sistema, em azul, medido pelo sensor de nível do tanque e a saída do modelo obtido, em vermelho, com a aplicação da mesma entrada aplicada ao sistema.	18
3.6	Gráfico que apresenta, em azul, a saída do sistema medido pelo sensor de nível do tanque e, em vermelho, a simulação da saída do modelo obtido com a aplicação do mesmo degrau aplicado ao sistema.	19
3.7	Lugar das raízes de malha fechada. Em azul o polo de malha aberta do modelo do tanque, em vermelho o polo e o zero do controlador PI desenvolvido. Em rosa os polos de malha fechada.	20
3.8	Zoom do Lugar das raízes de malha fechada para melhor visualização da alocação de polos e zeros da malha de controle do tanque.	20
3.9	Simulação da malha de controle do nível do tanque com referência constante de 3,5 V.	21
3.10	Gráfico que traz a disposição de todas as 5 funções de pertinência gaussianas de \mathbf{h}^f e \mathbf{h}^g igualmente espaçadas no intervalo de [1,5].	24
4.1	Gráfico que apresenta, em azul, o <i>setpoint</i> de 3,2 V da malha de controle da válvula CV-1 e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de posição da válvula de controle CV-1.	29
4.2	Gráfico que apresenta, em azul, o <i>setpoint</i> de 3,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta.	30
4.3	Gráfico que apresenta, em azul, o <i>setpoint</i> de 2,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. Este <i>setpoint</i> está fora do ponto de operação utilizado para modelagem do sistema, que é 3,5 V.	31
4.4	Gráfico que apresenta, em azul, o <i>setpoint</i> de 3,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. A válvula de dreno V-8 estava fechada, ou seja, apresentava abertura de 0%, abertura a qual estava fora do ponto de operação utilizado para modelagem do sistema.	32
4.5	Gráfico que apresenta, em azul, o <i>setpoint</i> de 3,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. A válvula de dreno V-8 apresentava abertura de aproximadamente 75%, abertura que estava fora do ponto de operação utilizado para modelagem do sistema.	33
4.6	Gráfico que apresenta, em azul, o <i>setpoint</i> de 3,2 V da malha de controle adaptativo da válvula CV-1 e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de posição da válvula de controle CV-1.	34

4.7	Gráfico que apresenta, em azul, o <i>setpoint</i> de 3,5 V da malha de controle adaptativo externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta.	35
4.8	Gráfico que apresenta, em azul, o <i>setpoint</i> de 2,0 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. Este <i>setpoint</i> está fora do ponto de operação (3,5 V) utilizado para modelagem do sistema.	36
4.9	Gráfico que apresenta, em azul, o <i>setpoint</i> de 2,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. Este <i>setpoint</i> está fora do ponto de operação (3,5 V) utilizado para modelagem do sistema.	36
4.10	Gráfico que apresenta, em azul, o <i>setpoint</i> de 3,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. A válvula de dreno V-8 estava fechada, ou seja, apresentava abertura de 0%, abertura a qual estava fora do ponto de operação utilizado para modelagem do sistema.	37
4.11	Gráfico que apresenta, em azul, o <i>setpoint</i> de 3,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. A válvula de dreno V-8 apresentava abertura de aproximadamente 75%, abertura que estava fora do ponto de operação utilizado para modelagem do sistema.	38

Lista de Tabelas

4.1	Tabela com análise da resposta ao degrau do sistema controlado para referência que está fora do ponto de operação do sistema modelado. . .	32
4.2	Tabela com análise da resposta ao degrau do sistema controlado para referência que está fora do ponto de operação do sistema modelado na seção 3.1.3	37

Capítulo 1

Introdução

A cada dia cresce o número de produtos inovadores presentes no mercado. E, para que esse número continue crescendo, o processo da fabricação de um novo produto deve ser cada vez mais rentável, confiável, rápido e seguro. Um Engenheiro de Controle e Automação deve prezar essas vertentes para desenvolver o controle de um processo industrial.

Este projeto descreve o controle de um planta piloto de nível presente no Laboratório MACSIN (Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não-Lineares). Nessa planta existe um tanque que contém um sensor de nível, uma válvula de controle e uma bomba. A vazão de entrada do líquido para o tanque é controlada através da válvula de controle que contém um potenciômetro como posicionador. A resistência do potenciômetro varia de acordo com a abertura da válvula. A válvula apresenta não linearidade e histerese na abertura e fechamento, como mostra a Figura 1.1.

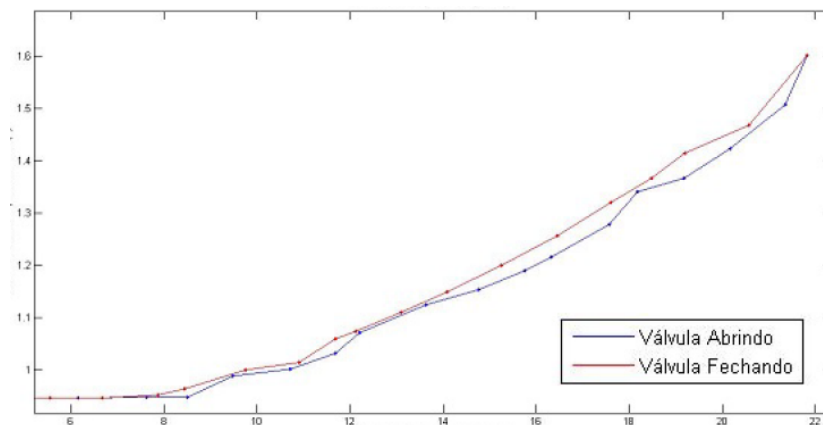


Figura 1.1: Gráfico que relaciona, no eixo X, a corrente(mA) fornecida à válvula e, no eixo Y, a tensão(V) no potenciômetro instalado como posicionador da válvula. *Fonte:* [1]

Entretanto, a válvula e o tanque podem ser linearizados em um determinado ponto de operação e modelados como um sistema linear de primeira ordem. Assim, definindo um ponto de operação para o tanque e para a válvula, consegue-se obter cada um dos dois modelos através da inspeção da resposta de cada sistema a uma variação em degrau na variável manipulada (pressão e posição).

Com os sistemas modelados, utilizando uma estratégia de controle clássico, a Figura 1.2 representa a malha de controle.

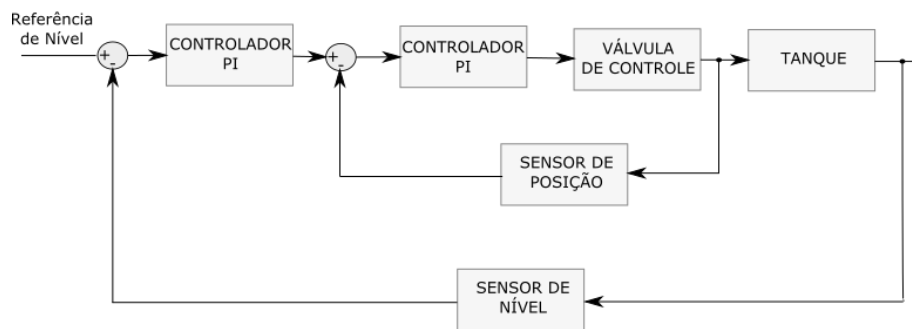


Figura 1.2: Representação da malha de controle com dois controladores PI em cascata, já que são sistemas de primeira ordem, para controlar todo o processo.

Outra estratégia para controlar todo processo é o controle adaptativo baseado em aproximação, representado pela Figura 1.3, nesse caso, utilizam-se sistemas nebulosos como aproximadores universais para modelar um sistema com dinâmica desconhecida.

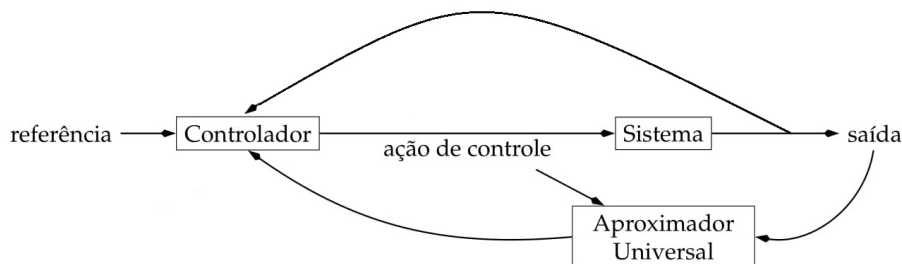


Figura 1.3: Representação dos elementos que compõem um sistema de controle adaptativo por aproximação. Nesse caso, o sistema é o conjunto tanque, válvula de controle e sensor de nível. O nível medido pelo sensor é a saída do sistema e a ação de controle é a atuação sobre a válvula. O controlador, a cada iteração, atualiza seus ganhos a partir do aproximador universal. *Fonte:* [2]

1.1 Motivação e Justificativa

A motivação desse trabalho partiu da ideia de aprofundar conhecimentos teóricos e alcançar maior experiência prática em um pilar do curso de Engenharia de Controle e Automação que é o controle de processos. Além de por em prática aprendizados vistos durante o curso, tem-se como motivação aprender e utilizar inovações na área de controle, como a lógica nebulosa, que vem sendo uma tendência na área de pesquisa e desenvolvimento industrial.

Com as duas metodologias aplicadas e comparadas é possível mostrar como essas inovações são benéficas para o controle de processos e que serão muito utilizadas em futuro próximo no meio industrial.

1.2 Objetivos do Projeto

Tendo em vista o exposto acima, este projeto tem por objetivos:

- 1) Levantamento de modelos lineares em torno do ponto de operação desejado (válvula e nível);
- 2) Sintonia dos controladores lineares e teste do controle em cascata (simulação);
- 3) Validação dos controladores no sistema real;
- 4) Teste com controlador adaptativo por aproximação;
- 5) Comparação entre os dois métodos de controle;

1.3 Local de Realização

O Projeto de Fim de Curso aqui descrito foi realizado no Departamento de Engenharia Eletrônica da UFMG, no Laboratório MACSIN (Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não-Lineares). A Escola de Engenharia situa-se dentro do campus Pampulha da UFMG na Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901. Nesse laboratório existe um módulo de circulação de água da LabVolt, o qual foi o objeto de trabalho deste projeto.

1.4 Estrutura da Monografia

O trabalho está dividido em cinco capítulos. Este capítulo apresentou uma introdução ao projeto a ser descrito nesta monografia e o laboratório onde o trabalho foi realizado. O Capítulo 2 descreve os princípios básicos do sistema de nível a ser controlado e abrange todos os conceitos necessários para um melhor entendimento do projeto, além de apresentar uma pesquisa bibliográfica sobre o tema de controle. O Capítulo 3 aborda a metodologia de desenvolvimento, seguida pela implementação dos controladores. No Capítulo 4 são apresentados e comparados os resultados obtidos com os controladores implementados na planta. Já no capítulo 5 tem-se a conclusão da monografia e algumas sugestões e dificuldades encontradas na realização do projeto.

Capítulo 2

Descrição do Problema

Este é o capítulo de descrição do processo e formulação do problema. Serão descritas a planta piloto e toda sua instrumentação para que o projeto seja implementado. E, ainda, uma revisão bibliográfica breve sobre o tema do trabalho.

2.1 Instrumentação do Processo

2.1.1 A planta de Nível

A planta piloto utilizada nesse projeto é do modelo 3503-MO fabricada pela *Lab Volt*. As Figuras 2.1 e 2.2 mostram a planta em si e o fluxograma de processos da *Level Process Station*, nome dado pelo fabricante à planta que contém um reservatório de água de 75 litros, um tanque com coluna de nível de 92 centímetros, uma bomba centrífuga com velocidade fixa, uma válvula de controle pneumática do tipo diafragma, um sensor de posição instalado para a válvula de controle, válvulas esfera, tubulação feita de policloreto de vinil(PVC), um conversor corrente/pressão e um sensor de pressão para medição de nível.



Figura 2.1: Imagem da planta em uma versão mais nova, mas muito similar à utilizada, com toda sua instrumentação empregada no projeto. *Fonte:* [3]

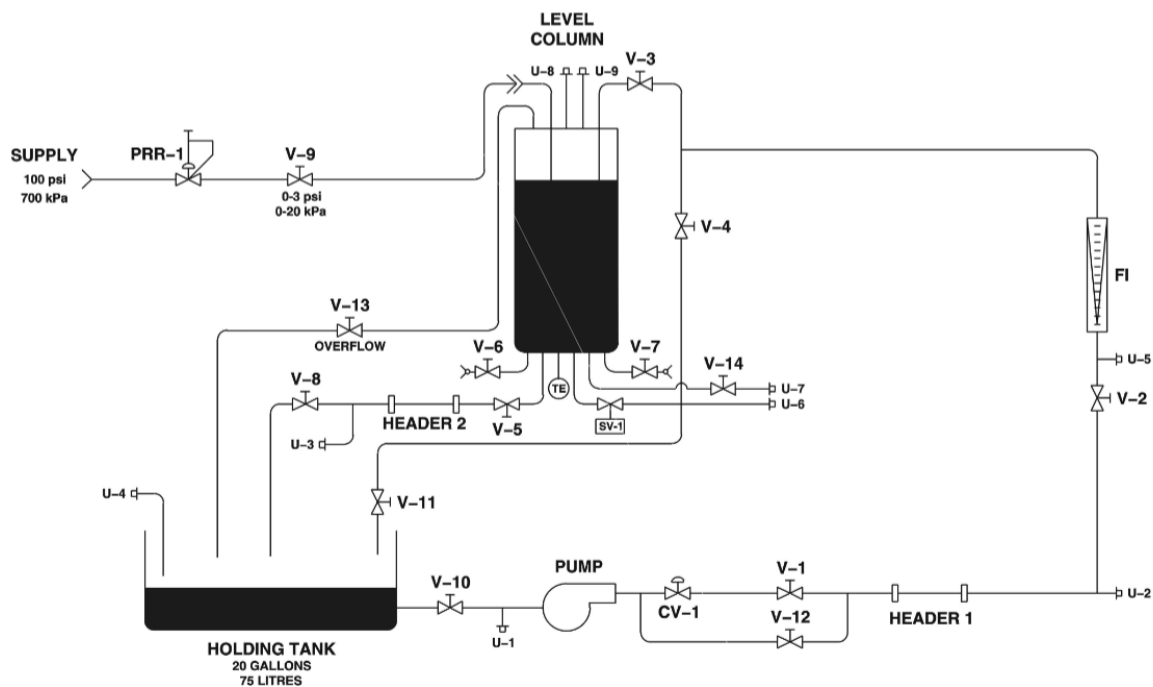


Figura 2.2: Fluxograma de processos da planta de nível que contém todos os instrumentos, e suas respectivas identificações. *Fonte:* [3]

Como o escopo do projeto é trabalhar com um sistema *SISO*, ou seja, uma entrada e uma saída, devem-se abrir todas válvulas esferas do sistema com exceção das válvulas: V-6, V-7, V-9, V-12, V-13, V-14, que devem ser mantidas fechadas. A válvula V-8, responsável pelo drenagem do líquido do tanque para o reservatório, inicialmente foi mantida com 50% de sua abertura total.

Na válvula de controle CV-1, Figura 2.3, foi instalado um sensor de posição, que é um potenciômetro que varia sua resistência de acordo com a abertura da válvula. Assim, é aplicada uma tensão nos terminais fixos do potenciômetro e medida a tensão no seu cursor com relação ao 0 V.

O sensor de nível, mostrado na Figura 2.4, é um sensor de pressão que é alimentado com 24 V (saída fornecida pelo fabricante) que calcula a pressão em cmH₂O e retorna um valor, proporcional à pressão, na faixa de 4 a 20 mA. Essa saída passa por um condicionador de sinais, que será explicitado ainda nesse capítulo, para que se tenha um sinal de 0 a 5 V. Assim esse sinal pode ser mandado para uma placa de aquisição, que também será identificada posteriormente, e conseqüentemente tem-se a medição do nível no computador.

2.1.2 Placa de Aquisição

Existe um equipamento fundamental que faz a comunicação entre o computador e a planta. Essa interface é possível devido à placa de aquisição, que é responsável por receber os sinais analógicos da planta (abertura da válvula e nível do tanque) e transformá-los em digitais e enviá-los ao computador. A placa ainda é capaz de emitir



Figura 2.3: Foto da válvula de controle CV-1 e seu sensor de posição instalados na planta de nível.



Figura 2.4: Foto do sensor de nível instalado na planta.

um sinal analógico de 0 a 5 V como saída, e assim atuar sobre válvula CV-1, único atuador da malha de controle.

A placa em questão utilizada é a USB 6009, como mostrado na Figura 2.5. A placa é fabricada pela *National Instruments*, empresa referência no assunto, e sua interface com o computador é feita via comunicação USB. Como foi dito no parágrafo anterior, a placa tem uma saída analógica de 0 a 5V, entrando, a corrente de operação de cada saída é de 5 mA [4] assim a potência de saída não é suficiente para atuar sozinha sobre a válvula CV-1.



Figura 2.5: Placa de Aquisição de dados - USB-6009

2.1.3 Condicionador de Sinais

Para que a atuação da válvula seja satisfeita, existe um condicionador de sinais, mostrado na Figura 2.6, responsável por amplificar o sinal de saída da placa de aquisição e, conseqüentemente, sendo possível a atuação sobre a válvula. Como a válvula é atuada indiretamente por corrente e a placa de aquisição fornece saída em tensão, existe uma resistência de $250\ \Omega$ que transforma o sinal de 1 a 5V para um sinal de 4 a 20mA.

No projeto, os terminais "+12V", "-12V" e "GND" do condicionador foram conectados ao *protoboard*, mostrado na Figura 2.7, nas saídas de tensão, +12V, -12V e 0V respectivamente. O terminal "SAÍDA PLACA" é ligado à saída da placa de aquisição, em tensão. O terminal "VÁLV." corresponde ao sinal em tensão que será ligado à resistência $250\ \Omega$, e finalmente ligado ao conversor I/P, para que assim o sinal seja convertido para a faixa de 3 a 15 Psi e válvula seja atuada.

O condicionador ainda conta com um filtro passa-baixas para atenuação de ruídos, cujo uso não foi necessário nesse projeto.

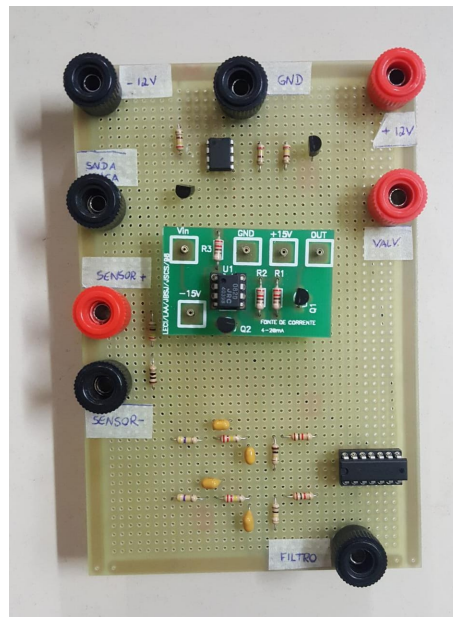


Figura 2.6: Imagem do circuito condicionador de sinais utilizado para integração entre a placa de aquisição e a instrumentação da planta.

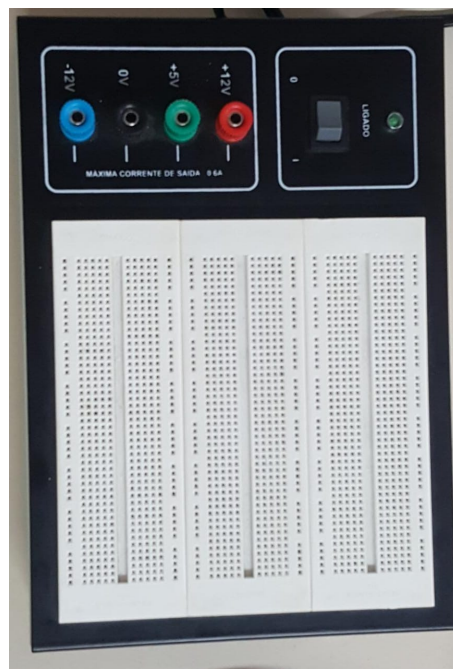


Figura 2.7: Foto do protoboard utilizado para alimentar o circuito condicionador de sinais.

2.1.4 Softwares utilizados

Para a execução do projeto são necessários dois softwares responsáveis para a comunicação entre o computador e a placa de aquisição e também o controle do processo. Abaixo estão listados os softwares com suas respectivas funções:

- 1) *Driver NI-DAQmx 15.5*: Software da *National Instruments* necessário para a comunicação entre a Placa de Aquisição USB-6009 e o computador utilizado;
- 2) *MATLAB* com pacote *Data Acquisition Toolbox*: Software necessário para modelagem, controle e obtenção dos resultados de todo o projeto. É necessário instalar o pacote *Data Acquisition Toolbox* para que seja possível a leitura e a escrita na Placa de Aquisição via *MATLAB*.

2.1.5 Diagrama de interligação do sistema

Para ficar mais fácil o entendimento de todo sistema, foi feito um diagrama, mostrado na figura 2.8, para representar como os equipamentos e a planta estão interligados.

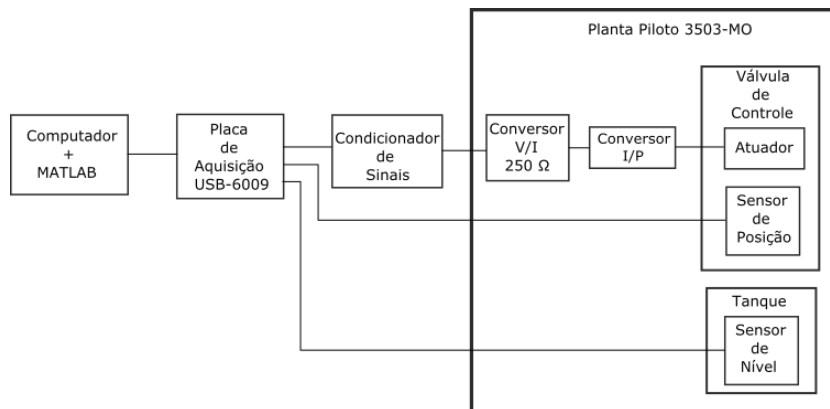


Figura 2.8: Diagrama com todos equipamentos utilizados no projeto e como estão interligados.

2.2 Estado da Arte

Duas soluções possíveis para controle de nível desta planta, propostas por [5] em seu trabalho de fim de curso, são: implementações de um controlador P(Proporcional) ou um controlador PI(Proporcional-Integral), de forma que esses controladores sejam projetados analisando-se a margem de fase do modelo do sistema. Assim, ajustam-se os ganhos dos controladores para que sejam atendidas as especificações do projeto. Os prós dessas soluções são a facilidade de implementação e funcionamento adequado; em contrapartida ocorre o problema dos controladores só funcionarem no ponto de operação em que foi modelado o sistema.

Outra solução, proposta por [6] para outro problema, é o controle ótimo de um sistema empregando um método iterativo de Controle Preditivo Baseado em Modelo para sistemas não lineares.

Já [7] propõe a identificação em tempo real dos sistemas a serem controlados pelo método dos mínimos quadrados recursivos (MQR), levando em consideração uma estrutura predefinida para cada sistema em questão. Os parâmetros obtidos são usados na implementação do controlador adaptativo. Neste caso não é necessário a definição de um ponto de operação já que o sistema é identificado em tempo real. O ponto negativo é o custo computacional para identificação do sistema e implementação do controlador em tempo real.

Assim, na teoria, utilizando-se controle adaptativo tem-se a vantagem de não ser necessário um modelo em certo ponto de operação e, logo, o controle da planta funciona em qualquer ponto de operação. O aspecto negativo é o fato de essa implementação não ser tão simples quanto as outras. Existe também a solução proposta por [8] em seu trabalho de fim de curso, em que ele implementa controladores com abordagens *fuzzy*, utilizando modelos de Takagi-Sugeno. É uma boa alternativa já que nesse caso existe uma interpolação de vários modelos locais, e assim o sistema apresenta controle satisfatório em qualquer ponto de operação. O aspecto ruim é a necessidade de se levantar modelos para a planta em diferentes pontos de operação, o que é trabalhoso[7].

2.3 Resumo do Capítulo

Esse capítulo teve como objetivo indicar e explicar a função de cada *software* e *hardware* necessário, e como eles foram interligados, para que o projeto seja implementado.

Também foram apresentadas soluções concorrentes de controladores da mesma planta e, também, de outras plantas com aspectos semelhantes.

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo descreve os métodos utilizados no projeto. Em primeiro momento é explicitada a técnica de controle da planta piloto de nível por dois controladores proporcional-integral(PI) em cascata, representada pela Figura 1.2. Depois é apresentada a segunda técnica, na qual se controla a mesma planta pelo método de controle adaptativo via aproximação, representada pela Figura 1.3.

3.1 Técnica 1 - Controladores PI em cascata

A técnica consiste em dividir o controle da planta em duas partes, um controle para a válvula de controle CV-1 e um controle para o nível do tanque. Para isso, primeiro tem que ser modelada e controlada a válvula CV-1 formando a malha interna do sistema, como mostra a Figura 1.2. Com a válvula CV-1 controlada, modela-se e controla-se o nível do tanque, que é a malha de controle externa.

Como dito no Capítulo 1, é necessário definir um ponto de operação para a modelagem e controle da válvula CV-1 devido à sua não linearidade. Consequentemente também é necessário definir um ponto de operação do nível do tanque.

3.1.1 Modelagem e validação do modelo da Válvula CV-1

A válvula é modelada a partir da análise à resposta ao degrau. Aplica-se um degrau de tensão em malha aberta a partir da placa de aquisição da Figura 2.5 e analisa-se o tempo de subida e o ganho da planta com a saída medida pelo sensor de posição da válvula CV-1.

Foi escolhido o ponto de operação de 4 V após alguns testes, visto que para valores acima de 4 V o sensor de posição apresenta valor máximo, logo, a abertura da válvula está saturada. Já para valores de tensão abaixo de 1,5 V a válvula não apresenta abertura, possivelmente devido a agarramento.

Assim é aplicado um degrau de 2,5 V de amplitude, ou seja, um degrau partindo de 1,5 V até 4 V e obtem-se a saída medida pelo sensor de posição da válvula CV-1, como mostra a Figura 3.1.

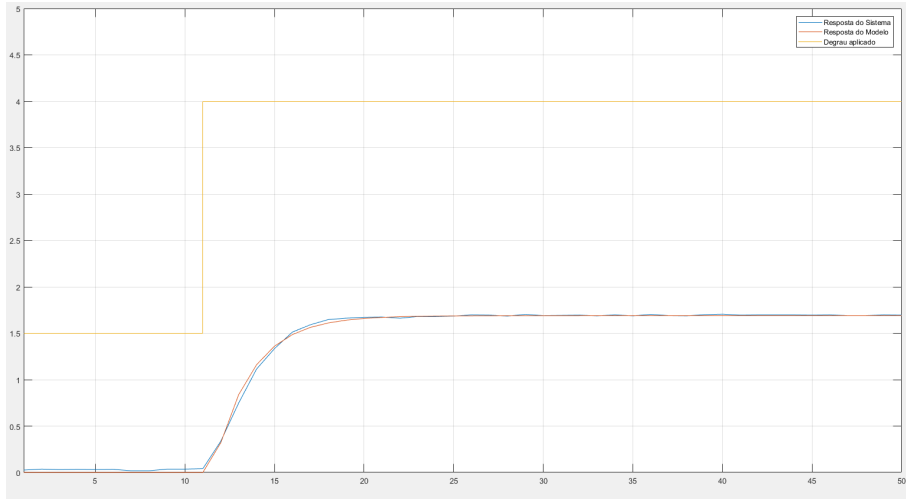


Figura 3.1: Gráfico que apresenta, em amarelo, o degrau de 2,5 V aplicado como entrada. A saída do sistema, em azul, medido pelo sensor de posição da válvula de controle CV-1 e a saída do modelo obtido, em vermelho, com a aplicação da mesma entrada aplicada ao sistema.

A partir da resposta ao degrau percebe-se que o sistema pode ser representado por um modelo de primeira ordem, cuja função de transferência é dada por:

$$f(s) := \frac{G}{\tau s + 1} ,$$

onde os escalares G e τ são constantes. Em que G representa o ganho do modelo e τ a constante de tempo do modelo.

O ganho G do modelo é obtido por:

$$G = \frac{\Delta Y}{\Delta R} ,$$

onde ΔY é a variação da saída medida pelo sensor de posição da válvula CV-1 e ΔR é a amplitude do degrau de tensão aplicado sobre a válvula.

O τ é obtido a partir de:

$$\tau = \frac{T_a}{4} ,$$

onde T_a é o tempo de acomodação do sistema, ou seja, o tempo necessário para que a resposta alcance uma faixa de valores de 2% em torno da saída em regime permanente.

Como mostra a Figura 3.1, a saída do modelo também é plotada no gráfico. A partir da função "lsim" (*linear simulation*), do MATLAB, é feita uma simulação do modelo em que aplica-se o mesmo degrau aplicado sobre o sistema em malha aberta.

Foram feitos alguns ajustes manuais sobre os valores de τ e G com a intenção de validar o modelo.

Por fim, obtem-se a função de transferência do modelo da Válvula CV-1 :

$$f(s) = \frac{0,676}{2,1s + 1} . \quad (3.1)$$

Como a aquisição é feita de forma discreta, com certo tempo de amostragem, é necessária a discretização do modelo para que seja feita a comparação de uma melhor forma com a resposta do sistema obtida. É utilizado o método do retentor de ordem zero com o mesmo período de amostragem utilizado pela placa de aquisição, ou seja, 1 segundo. Assim, o modelo discretizado é:

$$f(z) = \frac{0,2561}{z - 0,6211} \quad (3.2)$$

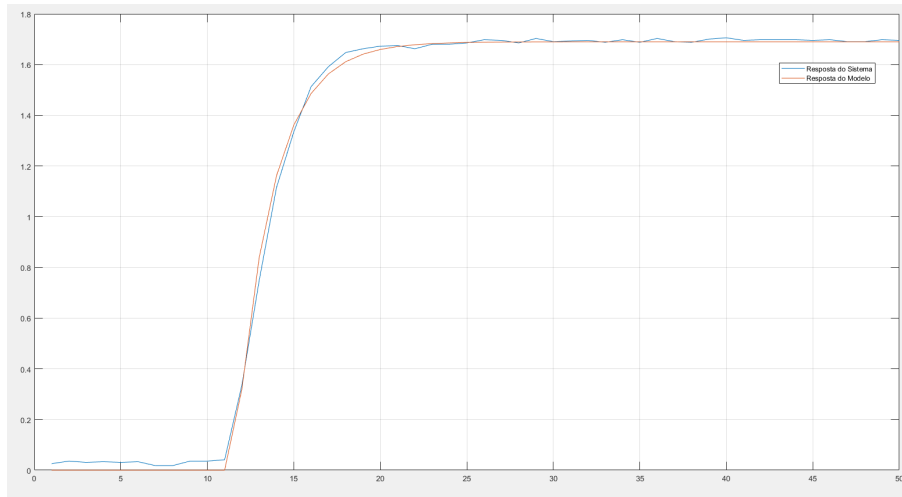


Figura 3.2: Gráfico que apresenta, em azul, a saída do sistema medido pelo sensor de posição da válvula de controle CV-1 e, em vermelho, a simulação da saída do modelo obtido com a aplicação do mesmo degrau aplicado ao sistema.

A Figura 3.2 deixa claro que, para o ponto de operação escolhido, o modelo apresenta comportamento bem próximo do sistema, tanto em transitório quanto em regime permanente.

3.1.2 Projeto e simulação do Controlador PI da Válvula CV-1

Pela equação (3.1) comprova-se que o modelo obtido para a válvula de controle CV-1 é de primeira ordem, logo, um controlador PI é capaz de melhorar características de regime transitório e também de regime permanente, fazendo com que o sistema controlado consiga rastreamento em regime permanente à entradas em degrau.

O controlador é desenvolvido com auxílio da ferramenta *SISOTOOL* do software MATLAB. O projeto do controlador foi feito com alocação de polos e zeros sobre o plano Z, de forma que foi alocado um polo sobre o círculo de raio unitário para zerar o erro à entrada de degraus em regime permanente e um zero próximo ao polo natural do modelo obtido. Foi ajustado o ganho proporcional do controlador para melhorar a dinâmica do sistema sem que exista sobressinal.

A Figura 3.3 mostra que o controlador projetado consegue melhorar a dinâmica do sistema, já que os polos de malha fechada estão à esquerda do polo do modelo em malha aberta, ou seja, têm dinâmica mais rápida. E, também, mostra que existe um

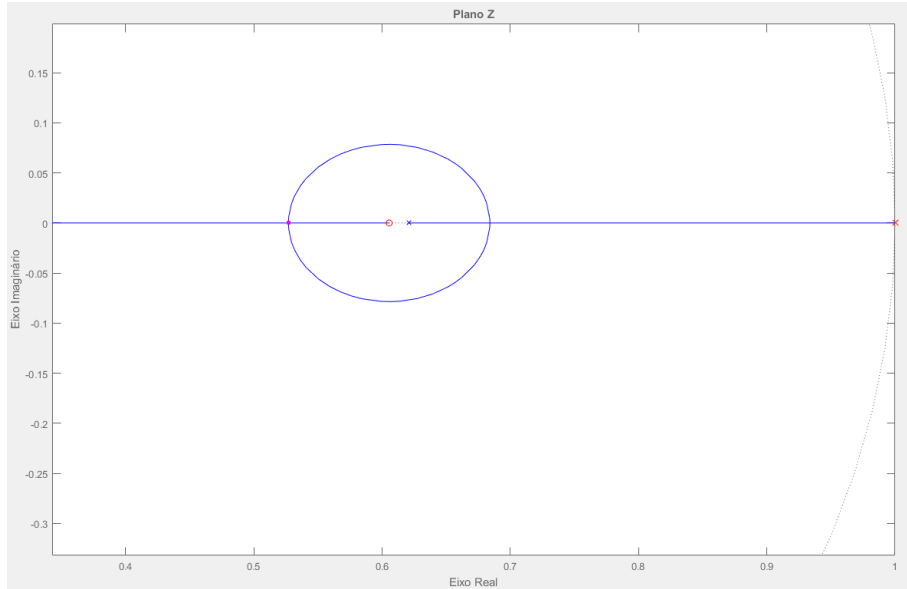


Figura 3.3: Lugar das raízes de malha fechada. Em azul o polo de malha aberta do modelo da Válvula CV-1, em vermelho o polo e o zero do controlador PI desenvolvido. Em rosa os polos de malha fechada.

polo de malha aberta do controlador sobre círculo de raio unitário, o que garante erro zero à entradas em degrau.

O controlador PI desenvolvido é descrito pela seguinte função de transferência discreta:

$$C(z) = \frac{2,2149 * (z - 0,6055)}{z - 1} . \quad (3.3)$$

Da equação (3.3) é possível obter a equação de diferenças que relaciona a ação de controle $U(z)$ e a diferença entre a referência e o valor medido $E(z)$. Sabendo que:

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} ,$$

em que $E(z)=R(z)-Y(z)$ onde $R(z)$ é a referência e $Y(z)$ é o sinal medido.

Fazendo a substituição e multiplicando ambos lados por z^{-1} tem-se a equação:

$$U(z) = 2,2149 * E(z) - 2,2149 * 0,6055 * z^{-1} * E(z) + z^{-1} * U(z) .$$

Com isso, aplicando-se a transformada Z inversa pode-se obter a seguinte equação de diferenças:

$$U(k) = 2,2149 * E(k) - 2,2149 * 0,6055 * E(k - 1) + U(k - 1) , \quad (3.4)$$

onde $k \in \mathbb{N}$ e considerando as condições iniciais: $U(0)=E(0)=0$.

Foi feita uma simulação da malha de controle, ainda na ferramenta *SISOTOOL*, com a aplicação de um degrau próximo do ponto de operação como visto na Figura 3.4.

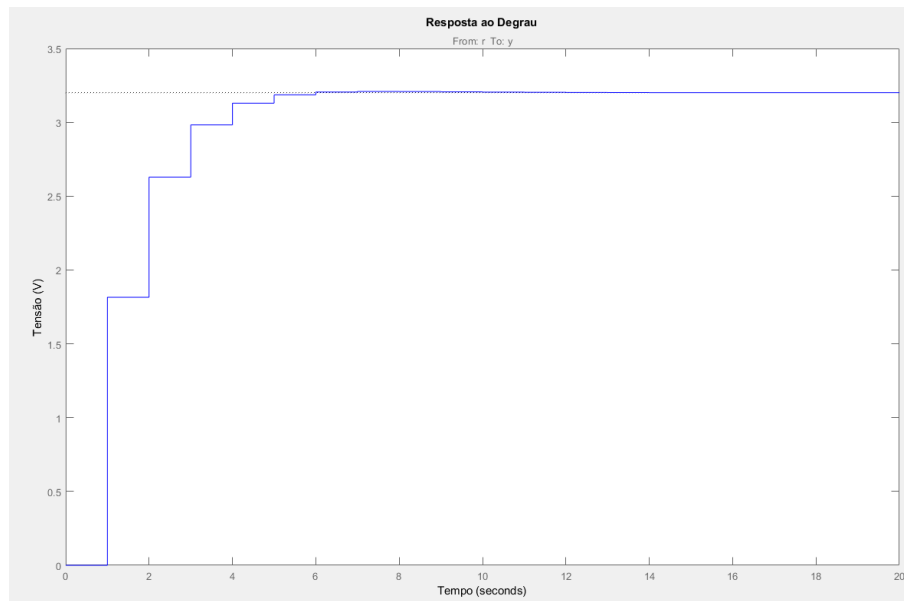


Figura 3.4: Simulação da malha de controle da Válvula de controle CV-1 com referência constante de 3,2 V.

Com a simulação exemplificada na Figura 3.4 podem-se extrair alguns dados importantes:

- 1) Rastreamento ao Degrau: Em regime permanente a saída simulada tem o mesmo valor da referência, ou seja, erro nulo.
- 2) Sobressinal: Para esse valor de referência, próximo do ponto de operação escolhido, não houve sobressinal na saída simulada.
- 3) Tempo de acomodação: O tempo de acomodação da saída simulada, para esse valor de referência, foi de aproximadamente 6 segundos. Valor menor que o medido quando aplicado o degrau sobre a válvula em malha aberta.

3.1.3 Modelagem e validação do modelo do Tanque

Com a malha da Válvula CV-1 fechada e controlada, é possível modelar o tanque da mesma forma em que foi feita a modelagem da válvula, ou seja, a partir da análise à resposta ao degrau. Aplica-se um degrau de tensão em malha aberta a partir da placa de aquisição e analisam-se o tempo de subida e o ganho da planta com a saída medida pelo sensor de nível do tanque.

O ponto de operação definido para o tanque foi de 3,5 V. Este vale equivale à uma altura média do tanque.

Assim é aplicado um degrau de 3.5 V de amplitude, ou seja, um degrau partindo de 0 V até 3.5 V e obtém-se a saída medida pelo sensor de nível do tanque, como mostra a Figura 3.5.

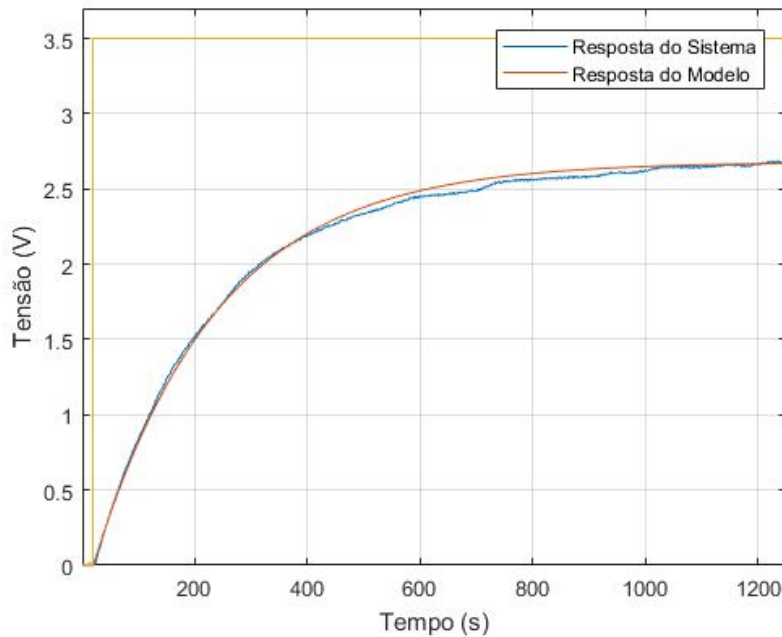


Figura 3.5: Gráfico que apresenta, em amarelo, o degrau de 3.5 V aplicado como entrada. A saída do sistema, em azul, medido pelo sensor de nível do tanque e a saída do modelo obtido, em vermelho, com a aplicação da mesma entrada aplicada ao sistema.

O tipo de resposta do sistema da Figura 3.5 é bem similar à apresentada na Figura 3.1. Logo, a metodologia utilizada na seção 3.1.3 é a mesma da seção 3.1.1.

A função de transferência do modelo da tanque obtida é:

$$f(s) = \frac{0,7658}{200s + 1} . \quad (3.5)$$

Já o modelo discretizado é:

$$f(z) = \frac{0,003473}{z - 0,9955} . \quad (3.6)$$

A Figura 3.2 deixa claro que, para o ponto de operação escolhido, o modelo apresenta comportamento bem próximo do sistema, tanto em transitório quanto em regime permanente.

3.1.4 Projeto e simulação do controlador PI do Tanque

Pela equação (3.5) comprova-se que o modelo obtido para o tanque também é de primeira ordem, logo, um controlador PI é capaz de melhorar características de regime transitório e também de regime permanente, fazendo com que o sistema controlado consiga rastreamento em regime permanente à entradas em degrau. Nota-se que a constante de tempo do modelo do tanque é muito maior que da válvula, cerca de 100 vezes maior.

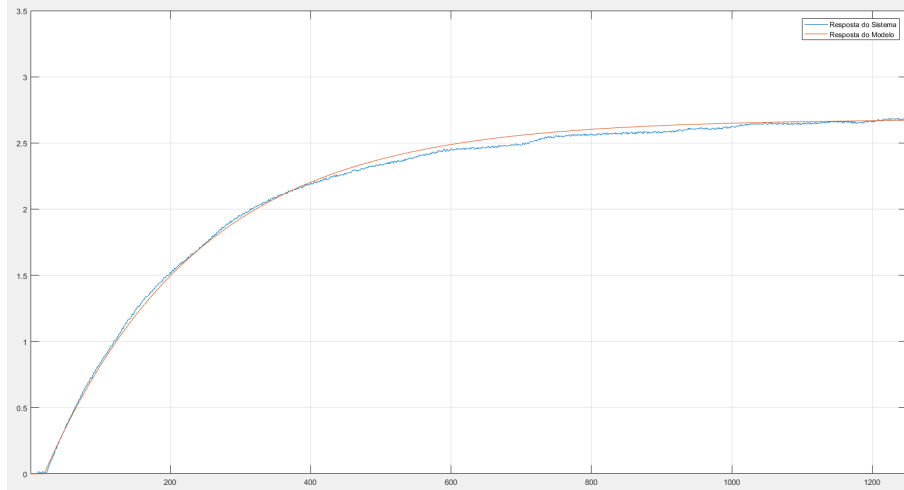


Figura 3.6: Gráfico que apresenta, em azul, a saída do sistema medido pelo sensor de nível do tanque e, em vermelho, a simulação da saída do modelo obtido com a aplicação do mesmo degrau aplicado ao sistema.

O controlador é desenvolvido com auxílio da ferramenta *SISOTOOL* do software MATLAB. O projeto do controlador foi feito com alocação de polos e zeros sobre o plano Z, de forma que foi alocado um polo sobre o círculo de raio unitário para zerar o erro à entrada de degraus em regime permanente e um zero próximo ao polo natural do modelo obtido. Foi ajustado o ganho proporcional do controlador para melhorar a dinâmica do sistema sem que exista sobressinal.

As Figuras 3.7 e 3.8 mostram que o controlador projetado consegue melhorar a dinâmica do sistema, já que os polos de malha fechada estão à esquerda do polo do modelo em malha aberta, ou seja, têm dinâmica mais rápida. E, também, mostra que existe um polo de malha aberta do controlador sobre círculo de raio unitário, o que garante erro zero à entrada de degraus.

O controlador PI desenvolvido é descrito pela seguinte função de transferência discreta:

$$C(z) = \frac{8,2562 * (z - 0,9954)}{z - 1} . \quad (3.7)$$

Da equação (3.7) é possível obter a equação de diferenças que relaciona a ação de controle $U(z)$ e a diferença entre a referência e o valor medido $E(z)$. Sabendo que:

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} ,$$

em que $E(z) = R(z) - Y(z)$ onde $R(z)$ é a referência e $Y(z)$ é o sinal medido.

Fazendo a substituição e multiplicando ambos lados por z^{-1} tem-se a equação:

$$U(z) = 8,2562 * E(z) - 8,2562 * 0,9954 * z^{-1} * E(z) + z^{-1} * U(z) .$$

Com isso, aplicando-se a transformada Z inversa pode-se obter a seguinte equação de

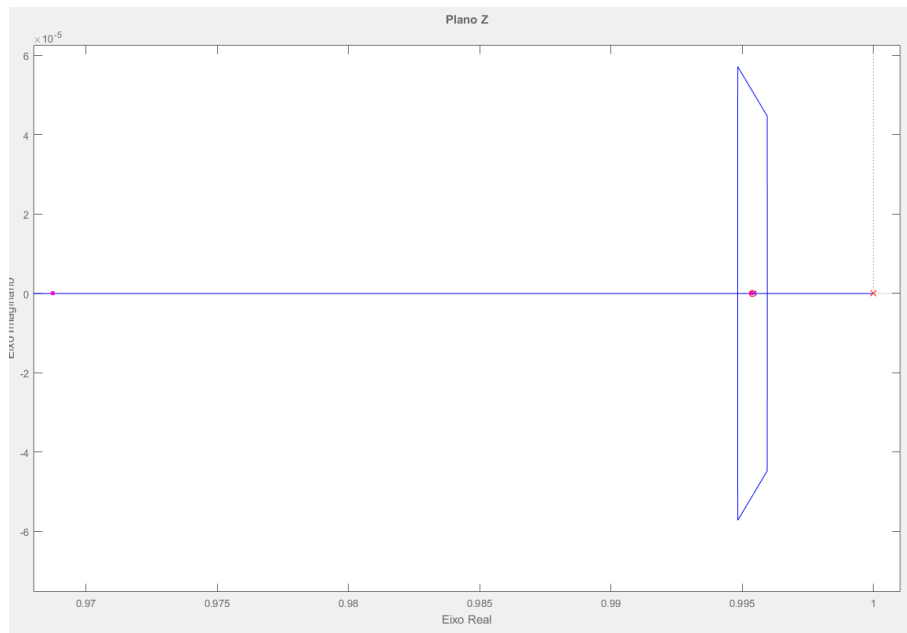


Figura 3.7: Lugar das raízes de malha fechada. Em azul o polo de malha aberta do modelo do tanque, em vermelho o polo e o zero do controlador PI desenvolvido. Em rosa os polos de malha fechada.

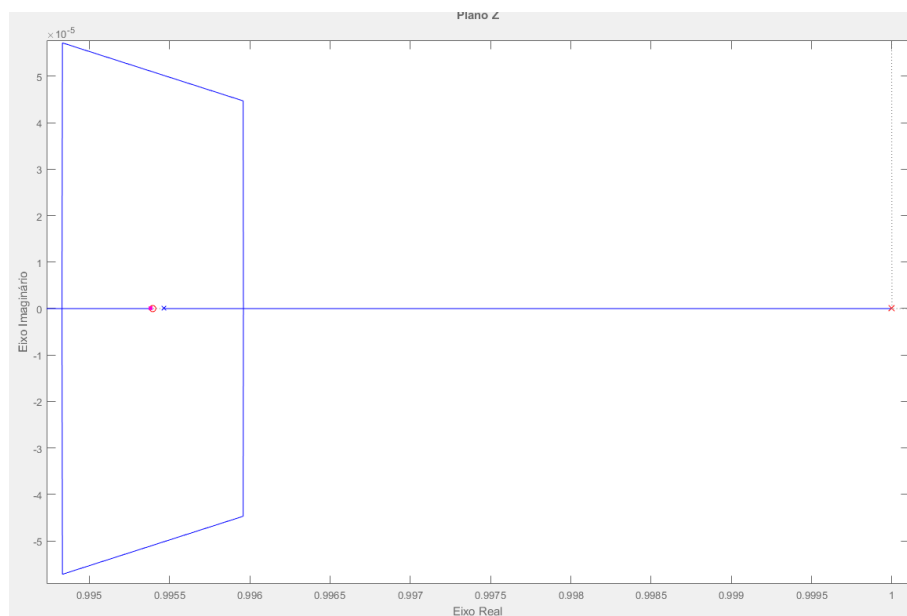


Figura 3.8: Zoom do Lugar das raízes de malha fechada para melhor visualização da alocação de polos e zeros da malha de controle do tanque.

diferenças:

$$U(k) = 8,2562 * E(k) - 8,2562 * 0,9954 * E(k - 1) + U(k - 1) , \quad (3.8)$$

onde $k \in \mathbb{N}$ e considerando as condições iniciais: $U(0)=E(0)=0$.

Foi feita uma simulação da malha de controle, ainda na ferramenta *SISOTOOL*, com a aplicação de um degrau próximo do ponto de operação como visto na Figura 3.9.

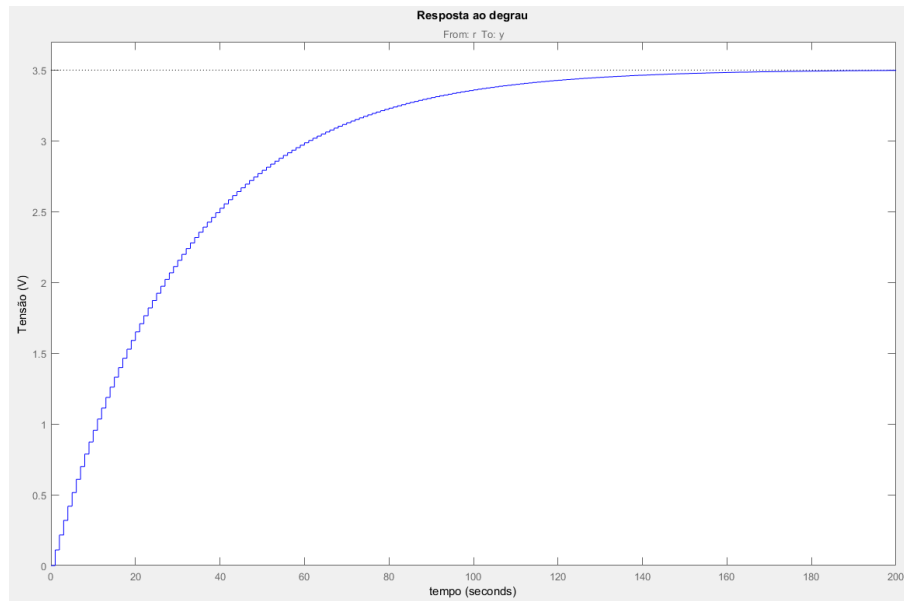


Figura 3.9: Simulação da malha de controle do nível do tanque com referência constante de 3,5 V.

Com a simulação exemplificada na Figura 3.9 podem-se extrair alguns dados importantes:

- 1) Rastreamento ao Degrau: Em regime permanente a saída simulada tem o mesmo valor da referência, ou seja, erro nulo.
- 2) Sobressinal: Para esse valor de referência, próximo do ponto de operação escolhido, não houve sobressinal na saída simulada.
- 3) Tempo de acomodação: O tempo de acomodação da saída simulada, para esse valor de referência, foi de aproximadamente 140 segundos. Valor bem abaixo do que o medido quando aplicado o degrau sobre a válvula em malha aberta que foi acima de 1000 segundos.

3.2 Técnica 2 - Controle adaptativo via aproximação

Seguindo a ideia da técnica anterior, apresentada na seção 3.2, foram projetados dois controladores adaptativos via aproximação. Sendo um controlador para a malha interna

do sistema, que é a abertura da válvula de controle CV-1, e outro controlador para a malha externa, que é o nível do tanque.

A ideia do sistema segue a mesma representação da Figura 1.2, entretanto o tipo de controlador é diferente e este tem seus parâmetros atualizados a cada iteração.

Sabe-se que o sistema pode ser representado por espaço de estados, neste caso têm-se dois estados, um para a abertura da válvula de controle e outro estado para o nível do tanque. A equação (3.9) ilustra a representação do sistema por espaço de estados, considerada:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_q \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\delta_q) + g_1(\delta_q)u \\ f_2(h) + g_2(h)\delta_q \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

em que δ_q representa a abertura da válvula de controle, h o nível do tanque e f, g funções a serem definidas.

A equação (3.9) representa o sistema em tempo contínuo, para ser possível controlá-lo a partir de um sistema digital é necessária sua discretização. A equação (3.10) ilustra a representação do sistema em espaço de estados discreto:

$$\begin{bmatrix} \delta_{q_{k+1}} \\ h_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\delta_{q_k}) + g_1(\delta_{q_k})u_k \\ f_2(h_k) + g_2(h_k)\delta_{q_k} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Como foi dito anteriormente, o sistema é dividido em duas malhas para facilitar a implementação dos controladores. Desta forma pode-se dividir o sistema, em espaço de estados, por duas equações, uma em cada linha da representação (3.11). Assim, o controlador da abertura válvula de controle utiliza a equação da primeira linha e o controlador do nível do tanque utiliza a equação da segunda linha.

$$\begin{bmatrix} \delta_{q_{k+1}} \\ \dots \\ h_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\delta_{q_k}) + g_1(\delta_{q_k})u_k \\ \dots \\ f_2(h_k) + g_2(h_k)\delta_{q_k} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.2.1 Projeto e ajuste do controlador adaptativo via aproximação da válvula CV-1

Como dito na seção 3.1, a abertura da válvula de controle pode ser aproximada por um sistema de primeira ordem. Assim, tem-se a relação entre a abertura δ_q da válvula de controle e a ação de controle u :

$$\Delta \dot{\delta}_q = -\frac{1}{\tau_q} \Delta \delta_q + K_q \Delta u, \quad ,$$

em que τ_q é a constante de tempo do sistema e K_q o ganho do sistema, constantes essas que já foram encontradas na modelagem da válvula conforme equação (3.1).

Considerando tal modelo, tem-se a aproximação da derivada da abertura da válvula pela equação:

$$\dot{\delta}_q = -\frac{1}{\tau_q} \Delta \delta_q + K_q \Delta u + f(\delta_q) + g(\delta_q)u, \quad (3.12)$$

em que $f(\delta_q)$ e $g(\delta_q)$ são funções que serão obtidas por aproximadores universais.

De acordo com [2], as funções $\mathbf{f}(\delta_q)$ e $\mathbf{g}(\delta_q)$ podem ser definidas por:

$$\begin{aligned} f(\delta_q) &= \sum_{i=1}^{r_f} h_i^f(\delta_q)\theta_{f_i} + \epsilon_f(\delta_q) \\ g(\delta_q) &= \sum_{j=1}^{r_g} h_j^g(\delta_q)\theta_{g_j} + \epsilon_g(\delta_q) \end{aligned}, \quad (3.13)$$

em que:

- $h_i^f(\delta_q)$ é a pertinência da regra i do vetor de funções de pertinência \mathbf{h}^f para a abertura δ_q ;
- $h_j^g(\delta_q)$ é a pertinência da regra j do vetor de funções de pertinência \mathbf{h}^g para a abertura δ_q ;
- θ_{f_i} é o parâmetro i do vetor de parâmetros de aprendizagem θ_f ;
- θ_{g_j} é o parâmetro j do vetor de parâmetros de aprendizagem θ_g ;
- r_f é o número de regras do vetor de funções de pertinência \mathbf{h}^f ;
- r_g é o número de regras do vetor de funções de pertinência \mathbf{h}^g ;
- $\epsilon_f(\delta_q)$ é um erro de aproximação no cálculo de $f(\delta_q)$;
- $\epsilon_g(\delta_q)$ é um erro de aproximação no cálculo de $g(\delta_q)$.

Para facilitação dos cálculos, podem-se usar propriedades de vetores e matrizes e considerar que:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{r_f} h_i^f(\delta_q)\theta_{f_i} &= \mathbf{h}_f^T \theta_f \\ \sum_{j=1}^{r_g} h_j^g(\delta_q)\theta_{g_j} &= \mathbf{h}_g^T \theta_g \end{aligned}, \quad (3.14)$$

em que \mathbf{h}_f^T e \mathbf{h}_g^T são os vetores transpostos das funções de pertinência.

Em primeiro momento foi definido que tanto \mathbf{h}^f quanto \mathbf{h}^g teriam 5 regras contidas no intervalo [1,5], intervalo de tensão em que a válvula sofre alteração em sua abertura.

Entretanto, durante testes na planta, percebeu-se uma demora na convergência da resposta sistema à uma entrada. Assim, como o objetivo de diminuir os erros de aproximação ϵ_f e ϵ_g , mudou-se o número de regras r_f e r_g de 5 para 20, obtendo uma convergência muito mais rápida da resposta do sistema à uma entrada.

Para atualização dos vetores de parâmetros θ , usam-se as leis de adaptação apresentadas em [2] e discretizadas utilizando o método de Euler. Tal que:

$$\begin{aligned} \theta_{\mathbf{f}_{k+1}} &= \theta_{\mathbf{f}_k} + T_s \Gamma_f \mathbf{h}_f e \\ \theta_{\mathbf{g}_{k+1}} &= \theta_{\mathbf{g}_k} + T_s \Gamma_g \mathbf{h}_g e u_k \end{aligned},$$

em que:

- T_s é período de amostragem utilizado para o controle da planta;

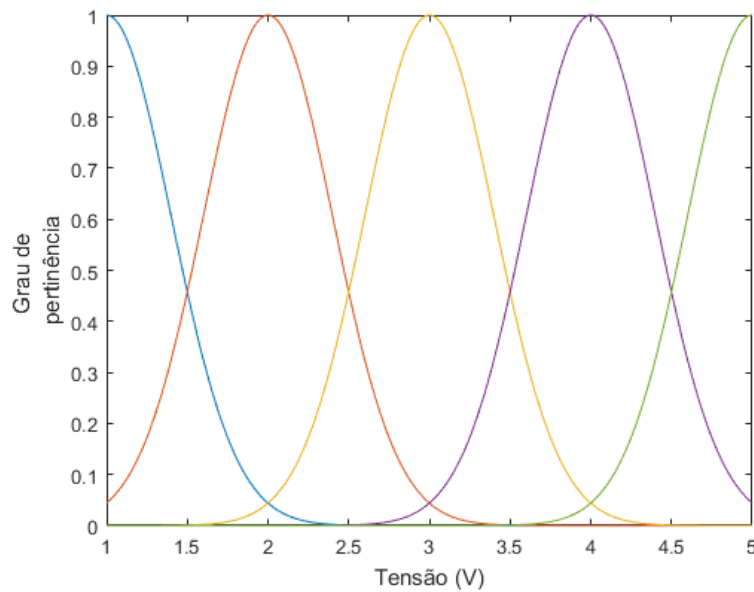


Figura 3.10: Gráfico que traz a disposição de todas as 5 funções de pertinência gaussianas de \mathbf{h}^f e \mathbf{h}^g igualmente espaçadas no intervalo de $[1,5]$.

- Γ_f e Γ_g são matrizes de aprendizado que devem ser não singulares.

Assim, para ambos casos, foram obtidas pela multiplicação da matriz identidade $\mathbf{I}_{20 \times 20}$ por um fator de aprendizado escalar ξ ;

- $e = \delta_{q_{med}} - \delta_{q_{ref}}$, ou seja, é o erro do sistema que é obtido pela diferença entre abertura da válvula medida e a referência de abertura definida;
- u_k é a ação de controle para a válvula calculada na iteração k .

Depois de implementado o controlador, percebeu-se que quando a resposta do sistema entrava em uma faixa bem próxima da referência, depois de algum tempo o sistema saía da faixa e o erro em relação a referência aumentava indefinidamente e não convergia mais.

Isto também é explicado por [2], dizendo que, dentro de uma faixa de valores, as leis de adaptação podem aumentar indefinidamente o erro de aproximação. Este fenômeno é chamado de **deriva dos parâmetros**.

A solução do problema é simples, basta adicionar uma **zona morta à adaptação**, ou seja, dentro de uma faixa de erro pequena os parâmetros θ não são atualizados. Assim, há a garantia que o erro de adaptação não cresça.

$$|e_k| \leq \varepsilon \rightarrow \theta_{\mathbf{k}} = \theta_{\mathbf{k}-1} ,$$

sendo ε um número pequeno definido durante testes na planta. Para o caso da malha da válvula de controle, um valor bem ajustado foi $\varepsilon = 0,1$.

Retornando às equações (3.12), (3.13) e (3.14), utilizando substituições e colocando

a ação de controle u em evidência, obtêm-se:

$$u = \frac{1}{K_q + h_g^T \theta_g} \left(\frac{1}{\tau_q} \Delta \delta_q - h_f^T \theta_f + K_q u_0 + \dot{\delta}_q \right) , \quad (3.15)$$

em que:

- A seguinte condição deve ser estabelecida: $\theta_{g_i} \leq K_q \rightarrow \theta_{g_i} = K_q + \varepsilon, \forall 0 < i \leq r_g$. Assegurando assim que a ação de controle u calculada não exploda ou seja negativa devido ao denominador;
- u_0 é o ponto de operação da ação de controle sobre qual o sistema foi modelado na seção 3.1.1;
- $\Delta \delta_q = \delta_{q_{med}} - \delta_{q_0}$, sendo δ_{q_0} o ponto de operação da abertura da válvula sobre qual o sistema foi modelado na seção 3.1.1.

Para $\dot{\delta}_q$ existem alguns tipos de implementações diferentes. Como o objetivo é seguimento a referência, foi implementado $\dot{\delta}_q$ como sendo a integral do erro. Para maior facilidade na compreensão é feita a substituição de variáveis em que:

$$\dot{\delta}_q = v \quad (3.16)$$

Foi utilizada a ferramenta *SISOTOOL* do *software* MATLAB para sintonia de v . Foi obtido um sistema de primeira ordem que relaciona v ao erro, que discretizado pode ser representado pela seguinte equação de diferenças:

$$V[k] = V[k-1] - 6,6E[k] + 6,6 * 0.83E[k-1] , \quad (3.17)$$

sendo considerado $V[0] = E[0] = 0$.

Durantes testes com o controlador na planta, foram necessárias duas últimas alterações no código implementado:

1) Filtragem de comando:

Quando o sistema com os dois controladores é feito em cascata, a referência da malha de controle interna, ou seja, da válvula CV-1 não é uma constante. A referência desta malha é a ação de controle dada pelo controlador externo, ou seja, do nível, como mostra a Figura 1.2.

Como foi projetado um controlador em que o sinal seguisse a referência do tipo degrau, é necessário a implementação de filtro sobre a referência da malha de controle interno.

Desta forma foi implementado um filtro com ganho unitário na banda de passagem e banda passante muito maior que a maior frequência do sinal de referência.

$$\frac{U_{hf}[s]}{U_h[s]} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (3.18)$$

A partir da multiplicação cruzada na equação (3.18) e mudando o domínio de Laplace para o tempo, tem-se:

$$\dot{u}_{h_f} = \frac{-1}{\tau}u_{h_f} + \frac{1}{\tau}u_h \quad (3.19)$$

Utilizando o método de Euler sobre a equação (3.19) obtêm-se a seguinte relação discretizada:

$$u_{h_{fk}} = \frac{\tau - T_s}{\tau}u_{h_{fk-1}} + \frac{T_s}{\tau}u_{h_k} ,$$

em que:

- τ é a constante de tempo do filtro e foi ajustada durante testes e obtidos melhores resultados para $\tau = 0,3$;
- u_h é a referência da malha do sistema interno, que também é a ação de controle do controlador da malha externa;
- u_{h_f} é a referência da malha interna do sistema filtrada;
- T_s é o período de amostragem, em segundos, utilizado no controle do sistema. Foi notado que quando utilizado o mesmo T_s do método apresentado na seção 3.1, o controle não foi possível. Com isso **foi alterado o valor de T_s de 1,0s para 0,1s**.

Isto foi necessário devido a utilização de aproximações de Euler durante a implementação, pois quanto menor o período de amostragem melhor é a aproximação. Durante testes percebeu-se que o melhor período de amostragem possível na aplicação é 0.1s.

Ou seja, durante todos testes na planta, com controlador adaptativo por aproximação, foi utilizado o período de amostragem de 0,1s.

Com a filtragem de comando sendo implementada é necessária mais uma modificação na equação (3.15) de obtenção da ação de controle u , já que a equação (3.16) do cálculo de $\dot{\delta}_q$ muda para:

$$\dot{\delta}_q = v + \dot{u}_{h_f} \quad (3.20)$$

2) *Anti Wind-up*:

Como é utilizado no cálculo da ação de controle u um integrador para o erro do sistema, na prática ocorre um fenômeno conhecido como *Wind-Up*.

Esse fenômeno ocorre quando há saturação do atuador no sinal de controle. Assim o valor do erro cresce muito devido à ação integral e a ação de controle permanece saturada até que o termo integral do erro se " Descarregue".

Esse fenômeno ocasiona uma resposta transitória do sistema lenta e oscilatória. No caso da aplicação na planta, em alguns casos, foi observado que o sistema apresentava apenas resposta oscilatória.

A solução adotada foi adequar o termo $V[k-1]$ da equação (3.17), de forma que ele seja calculado com a ação de controle que foi enviada à planta, não necessariamente a ação de controle calculada pela equação (3.15).

Assim, toda vez que a ação de controle é saturada, o cálculo de $V[k - 1]$ leva em conta o valor da ação de controle saturada. Entretanto quando o controlador volta a trabalhar na região linear, fora da saturação, o cálculo de $V[k - 1]$ leva em conta o valor de u obtido na equação (3.15).

3.2.2 Projeto e ajuste do controlador adaptativo via aproximação do nível do tanque

Como pode ser visto pela representação do sistema na equação (3.10), tanto a abertura da válvula quanto o nível do tanque têm modelos bem semelhantes.

Ambos modelos são de primeira ordem como visto nas seções 3.1.1 e 3.1.3. Uma diferença é a constante de tempo τ e o ganho K de cada modelo, entretanto a implementação do controlador da malha externa, ou seja do nível, segue a mesma metodologia do controlador da malha interna do sistema definida na seção 3.2.1.

A única diferença da implementação é que no caso do controlador da malha externa não é necessário uso de **filtragem de comando**. Como pode ser visto na figura 1.2, a referência da malha externa é uma constante definida pelo "operador", diferente da referência da malha interna que altera durante o processo de acordo com a ação de controle definida pelo controlador do nível.

Assim a ação de controle é obtida pela equação:

$$u_h = \frac{1}{K_h + h_{g_2}^T \theta_{g_2}} \left(\frac{1}{\tau_h} \Delta h - h_{f_2}^T \theta_{f_2} + K_h \delta_0 + \dot{h} \right), \quad (3.21)$$

em que:

- A seguinte condição deve ser estabelecida: $\theta_{g_{2_i}} \leq K_h \rightarrow \theta_{g_{2_i}} = K_h + \varepsilon, \forall 0 < i \leq r_{g_2}$. Assegurando assim que a ação de controle u calculada não exploda ou seja negativa devido ao denominador;
- δ_{q_0} é o ponto de operação da abertura da válvula sobre qual o sistema foi modelado na seção 3.1.1;
- $\Delta h = h_{med} - h_0$, sendo h_0 o ponto de operação do nível sobre qual o sistema foi modelado na seção 3.1.3;
- τ_h é a constante de tempo do sistema e K_h o ganho do sistema, constantes essas que já foram encontradas na modelagem do nível do tanque conforme equação (3.5).

A \dot{h} foi implementado da mesma forma que na seção 3.2.1, ou seja, \dot{h} como sendo a integral do erro. Para maior facilidade na compreensão é feita a substituição de variáveis em que:

$$\dot{h} = v_2 \quad (3.22)$$

Novamente foi utilizada a ferramenta *SISOTOOL* do *software* MATLAB para sintonia de v_2 . Foi obtido um sistema de primeira ordem que relaciona v_2 ao erro, que

discretizado pode ser representado pela seguinte equação de diferenças:

$$V_2[k] = V_2[k - 1] - 2,495E_2[k] + 2,495 * 0.984E_2[k - 1] , \quad (3.23)$$

sendo considerado $V_2[0] = E_2[0] = 0$.

Tanto \mathbf{h}_{f_2} quanto \mathbf{h}_{g_2} foram implementados da mesma maneira que na seção 3.2.1. Sendo que ambos apresentam **20** regras contidas no intervalo de **[1,5]**.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo serão discutidos os resultados de testes realizados na Planta Piloto para os controladores descritos no capítulo 3 e comparados com as simulações também apresentadas no capítulo 3. Foram analisados três aspectos sobre os testes: estabilidade do sistema em malha fechada, transitório do sistema (tempo de acomodação, sobressinal) e seguimento de referência.

4.1 Técnica 1 - Controladores em cascata

4.1.1 Controle da Válvula CV-1 e comparação com a simulação

Para o controle da válvula, já que é uma malha interna, só é aplicado um degrau de 3,2 V, ponto de operação escolhido para o projeto do controlador. Não foram feitos testes com outros valores de referência.

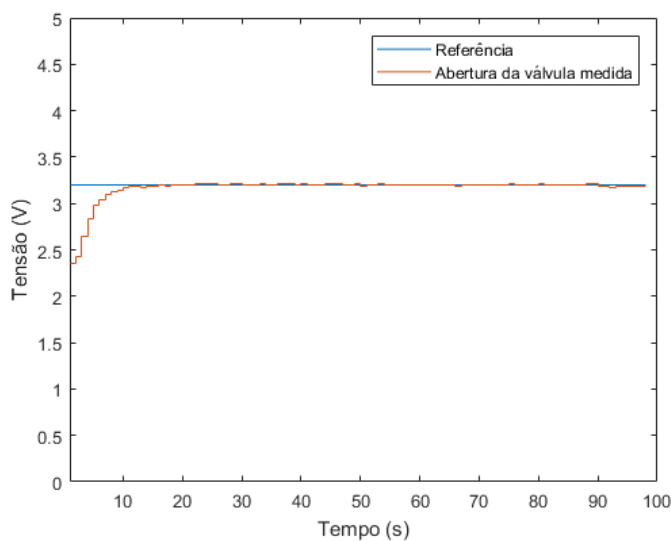


Figura 4.1: Gráfico que apresenta, em azul, o *setpoint* de 3,2 V da malha de controle da válvula CV-1 e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de posição da válvula de controle CV-1.

É válida a percepção de que as condições iniciais da válvula de controle para o teste apresentado na Figura 4.1 e para a simulação na Figura 3.4 são diferentes. Entretanto, o resultado obtido no teste é satisfatório, analisando-se:

- 1) Rastreamento ao Degrau: Em regime permanente a saída medida pelo sensor de posição tem valor muito próximo da referência, ou seja, erro praticamente nulo. O erro não é nulo possivelmente devido a ruídos de medição do sensor de posição.
- 2) Sobressinal: Para esse valor de referência, ponto de operação escolhido, não houve sobressinal na saída medida pelo sensor.
- 3) Tempo de acomodação: O tempo de acomodação do sistema em malha fechada, para esse valor de referência, foi de aproximadamente 12 segundos.

Nos itens 1) e 2) citados acima, o sistema é compatível com a simulação da Figura 3.4. Já no item 3) percebe-se um erro em relação ao ganho do sistema, já que o tempo de acomodação da simulação é menor que do teste.

4.1.2 Controle do nível do Tanque e comparação com a simulação

Para o controle do nível do tanque, malha externa, foi aplicado um degrau de 3,5 V e também foi aplicado outro degrau fora do ponto de operação do projeto do controlador. Além disso, foi analisado como o sistema responde à distúrbios sobre a válvula de dreno V-8.

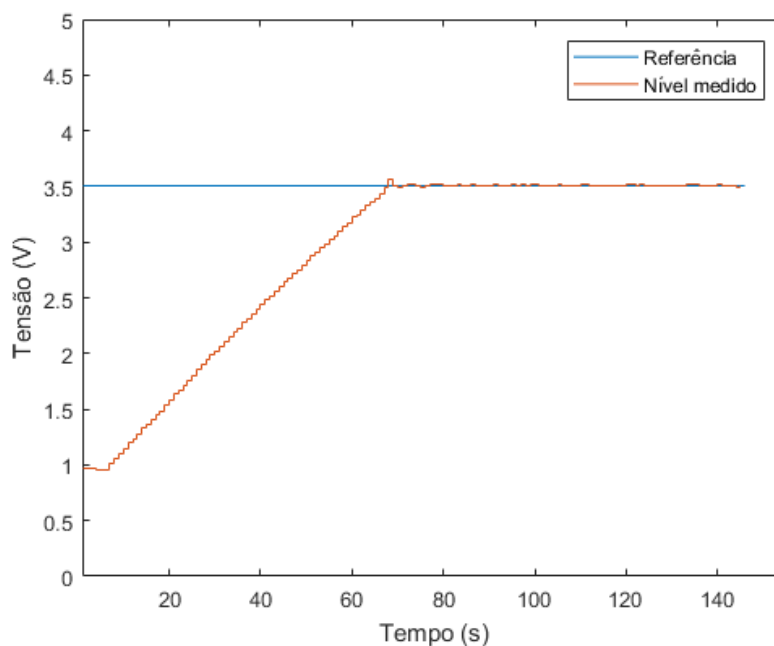


Figura 4.2: Gráfico que apresenta, em azul, o *setpoint* de 3,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta.

Analisando o resultado obtido no teste e comparando à simulação, pode-se dizer:

- 1) Rastreamento ao Degrau: Em regime permanente, a saída medida pelo sensor de nível tem valor muito próximo da referência, ou seja, erro praticamente nulo.
- 2) Sobressinal: Para esse valor de referência, ponto de operação escolhido, houve um pequeno sobressinal na saída medida pelo sensor. Isto pode ser melhorado ajustando o ganho do controlador implementado.
- 3) Tempo de acomodação: O tempo de acomodação do sistema em malha fechada, para esse valor de referência, foi de aproximadamente 70 segundos. Valor bem abaixo dos 140 segundos obtidos na simulação da Figura 3.9.

É válido lembrar que a condição inicial do sistema foi significativa para que tenha sido obtido esse tempo de acomodação, pois com tanque totalmente vazio o sensor de nível mede 1 V, diferente da simulação da Figura 3.9 em que o valor inicial é 0 V.

Teste feito com referência fora do ponto de operação

Foi alterado o valor de *setpoint* de nível para testar o controle da planta fora do ponto de operação. Foi definido um *setpoint* de 2,5 V. O gráfico 4.3 a seguir mostra o resultado:

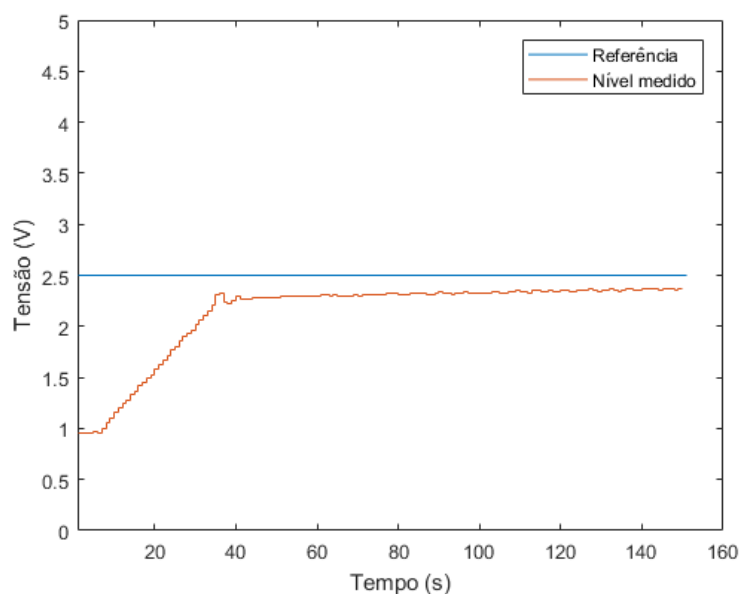


Figura 4.3: Gráfico que apresenta, em azul, o *setpoint* de 2,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. Este *setpoint* está fora do ponto de operação utilizado para modelagem do sistema, que é 3,5 V.

A Tabela 4.1 analisa como o sistema controlado responde quando trabalha fora do ponto de operação em que foi modelado. Percebe-se que algumas das especificações de projeto não foi respeitada. Assim, fora do ponto de operação, os controladores não fornecem desempenho satisfatório.

<i>Setpoint</i>	Seguimento de referência do tipo degrau	Sobressinal
2,5V	Não, abaixo da referência	Não

Tabela 4.1: Tabela com análise da resposta ao degrau do sistema controlado para referência que está fora do ponto de operação do sistema modelado.

Testes feitos com distúrbios na planta

Como já dito na seção 2.1.1, a válvula de dreno do planta V-8 foi mantida com 50% de abertura durante toda modelagem da planta. Com a finalidade de testar a planta dentro do ponto de operação, foi mudada a abertura da válvula V-8 para cerca de 75% e mantido o *setpoint* de nível 3,5V (ponto de operação).

Também foi testado o sistema controlado fechando completamente a mesma válvula V-8, ou seja, 0% de abertura.

Outro teste foi manter a válvula V-8 totalmente aberta, ou seja, 100% de abertura. Entretanto, **percebeu-se que para o *setpoint* de 3,5 V (ponto de operação) a bomba não possui vazão suficiente no recalque para que o tanque encha até esta referência.**

Os gráficos 4.4 e 4.5 mostram os resultados dos testes citados acima:

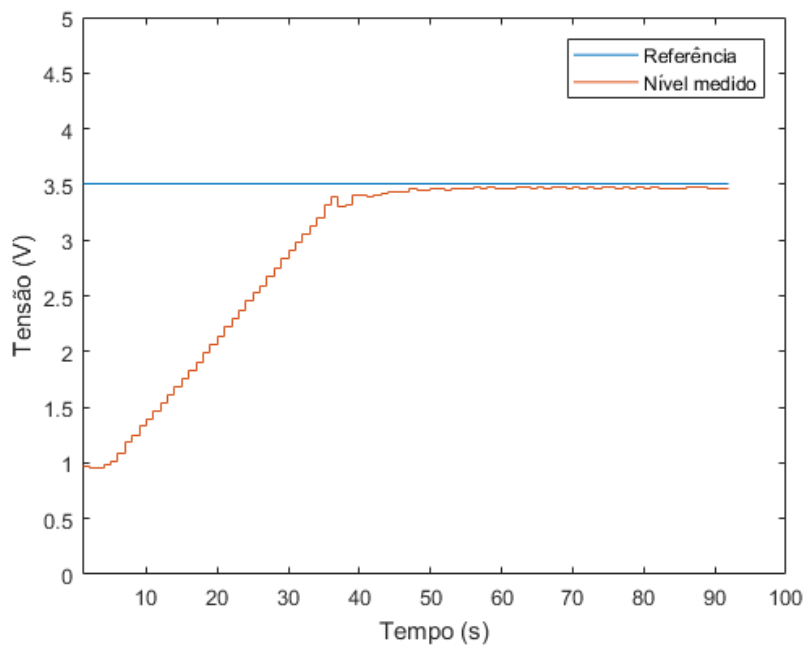


Figura 4.4: Gráfico que apresenta, em azul, o *setpoint* de 3,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. A válvula de dreno V-8 estava fechada, ou seja, apresentava abertura de 0%, abertura a qual estava fora do ponto de operação utilizado para modelagem do sistema.

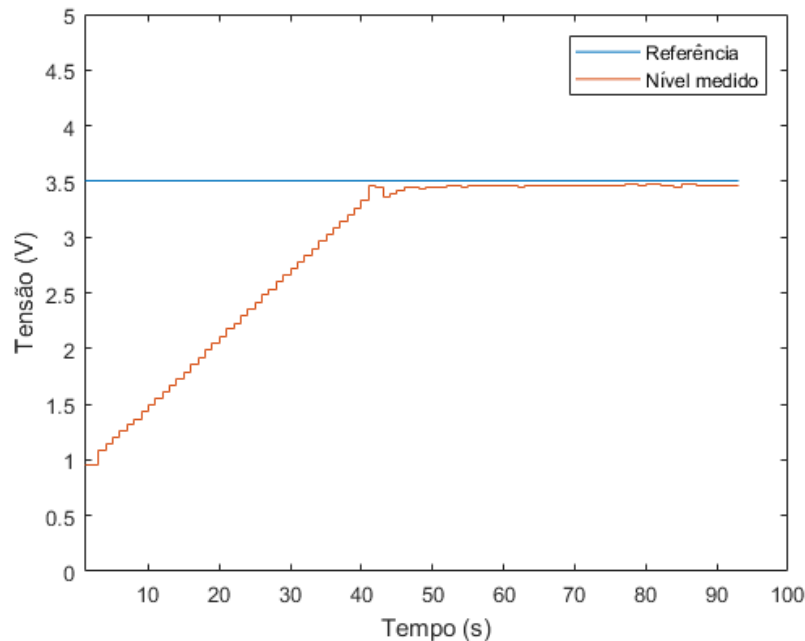


Figura 4.5: Gráfico que apresenta, em azul, o *setpoint* de 3,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. A válvula de dreno V-8 apresentava abertura de aproximadamente 75%, abertura que estava fora do ponto de operação utilizado para modelagem do sistema.

A partir dos dados apresentados acima, percebe-se que mesmo com distúrbios na válvula de dreno, o sistema apresentou controle satisfatório. Em ambos casos, o sistema apresentou erro praticamente nulo em regime permanente e não houve sobressinal.

4.2 Técnica 2 - Controle adaptativo via aproximação

4.2.1 Controle adaptativo da Válvula CV-1 e comparação com o controle clássico

Como já dito na seção 4.1.1, para o controle da válvula só é aplicado um degrau de 3,2 V, ponto de operação escolhido para o projeto do controlador. Não foram feitos testes com outros valores de referência.

Comparando os resultados obtidos a partir das figuras 4.1 e 4.6, algumas observações podem ser feitas:

- 1) Rastreamento ao Degrau: Em regime permanente a saída medida pelo sensor de posição tem valor próximo da referência. Entretanto, percebeu-se um erro em regime permanente maior que o apresentado no teste da seção 4.1.1.

Isso se deve à **zona morta de adaptação** que teve de ser implementada para o controle adaptativo.

- 2) Sobressinal: Não houve sobressinal na saída medida pelo sensor, assim como no teste da seção 4.1.1.

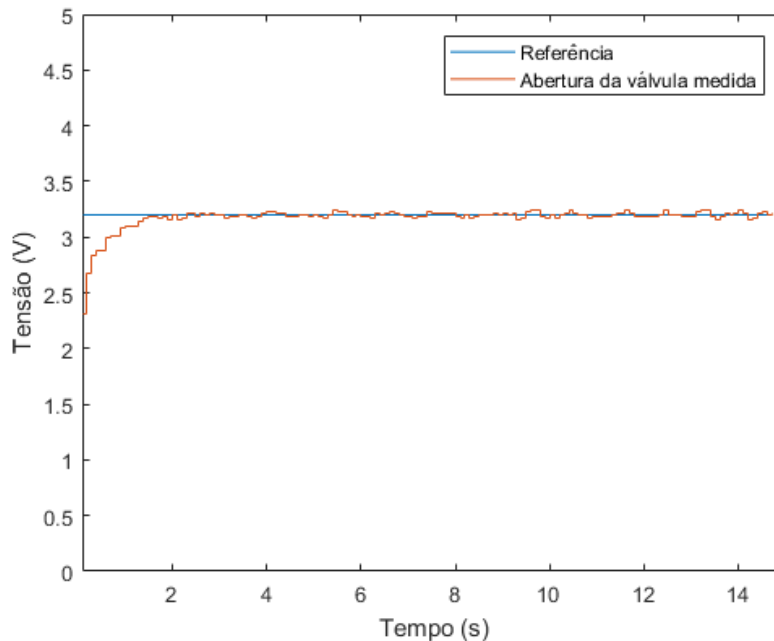


Figura 4.6: Gráfico que apresenta, em azul, o *setpoint* de 3,2 V da malha de controle adaptativo da válvula CV-1 e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de posição da válvula de controle CV-1.

- 3) Tempo de acomodação: O tempo de acomodação do sistema em malha fechada, para esse valor de referência, foi de aproximadamente 2 segundos. Tempo muito menor que os 12 segundos obtidos no teste da seção 4.1.1.

4.2.2 Controle adaptativo do nível do Tanque e comparação com o controle clássico

Foram executados testes bem parecidos aos da seção 4.1.2, ou seja, aplicado um degrau de 3,5 V e outros degraus fora do ponto de operação do projeto do controlador. Também foi analisado como o sistema responde à distúrbios sobre a válvula de dreno V-8.

Pode-se comparar os testes apresentados na Figura 4.7 e na Figura 4.2 quanto:

- 1) Rastreamento ao Degrau: Para ambos casos, em regime permanente, a saída dada pelo medidor de nível tem valor muito próximo da referência, ou seja, erro praticamente nulo.

Para esse parâmetro pode-se dizer que ambos apresentam resultado equivalentes.

- 2) Sobressinal: No caso do teste com controladores adaptativos em cascata não houve sobressinal na saída medida pelo sensor. Já no teste com controladores PI em cascata houve um pequeno sobressinal.

Neste parâmetro já é possível notar um melhor resultado com uso de controladores adaptativos.

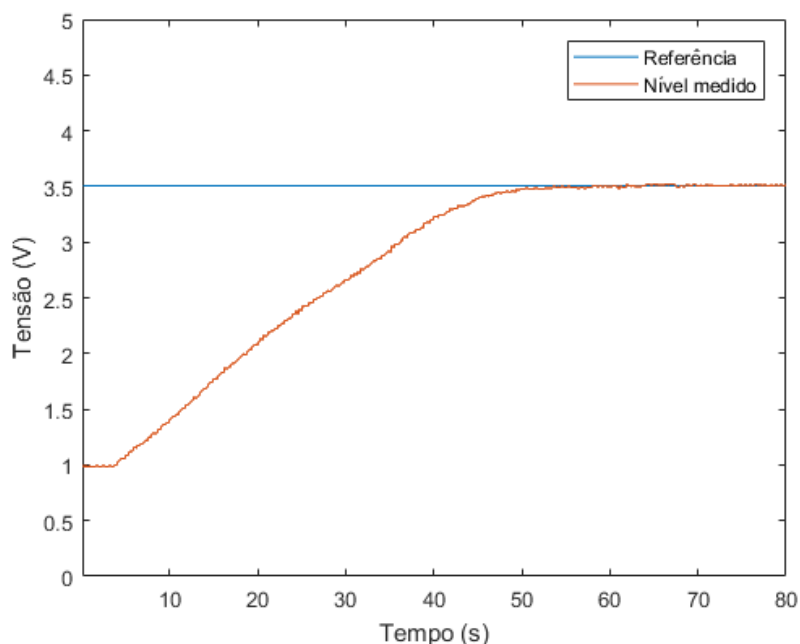


Figura 4.7: Gráfico que apresenta, em azul, o *setpoint* de 3,5 V da malha de controle adaptativo externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta.

- 3) Tempo de acomodação: O tempo de acomodação do sistema em malha fechada, para esse valor de referência, foi de aproximadamente 50 segundos. Tempo inferior aos 70 segundos obtidos no teste da seção 4.1.2. Comparando os dois testes, o tempo de acomodação foi quase 30% menor.

Neste caso, este teste apresenta resultados significativamente melhores que o teste da seção 4.1.2.

Teste feito com referência fora do ponto de operação

Foi alterado o valor de *setpoint* de nível para testar o controle da planta fora do ponto de operação. Foram definidas as referências de 2,0 V e 2,5 V. Os gráficos 4.8 e 4.9 apresentam os resultados.

A Tabela 4.2 analisa como o sistema controlado responde quando trabalha fora do ponto de operação em que foi modelado. Percebem-se resultados muito melhores que os apresentados nos testes da seção 4.1.2. Para todas referências definidas o sistema controlado respondeu como se estivesse no ponto de operação.

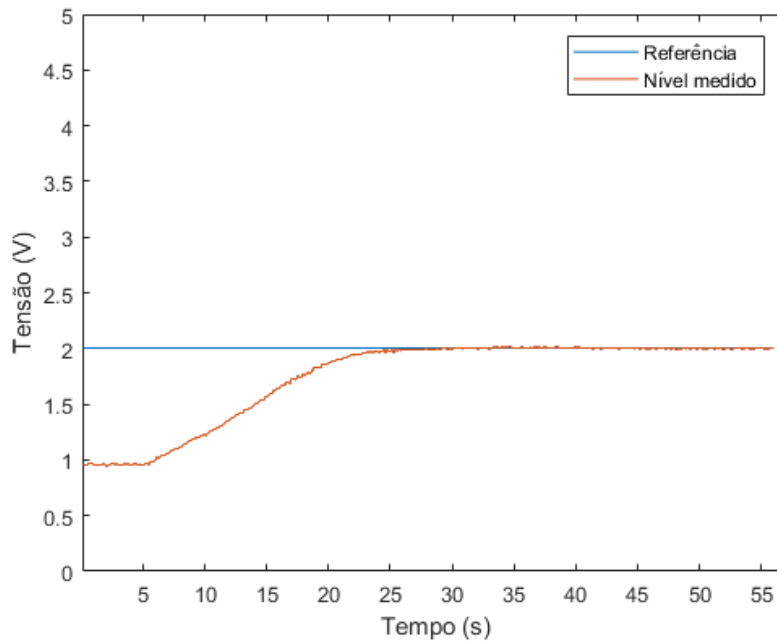


Figura 4.8: Gráfico que apresenta, em azul, o *setpoint* de 2,0 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. Este *setpoint* está fora do ponto de operação (3,5 V) utilizado para modelagem do sistema.

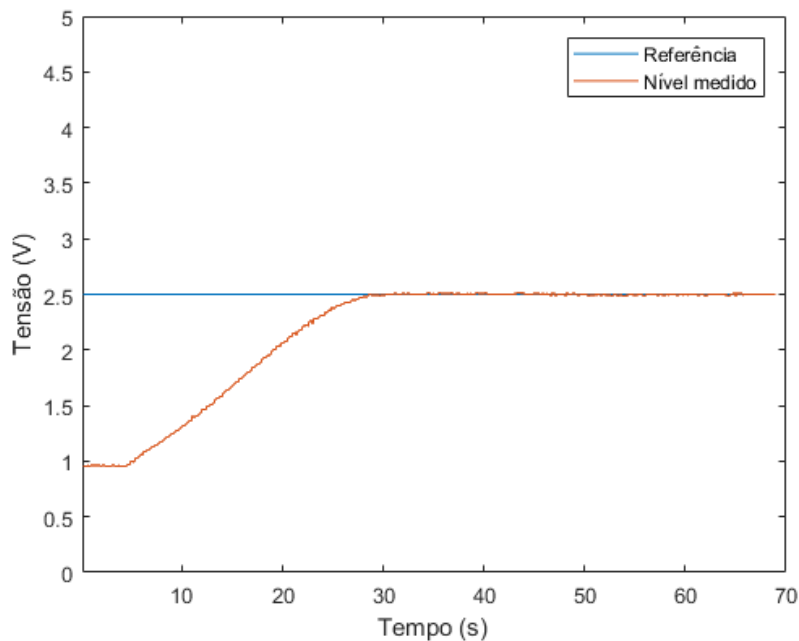


Figura 4.9: Gráfico que apresenta, em azul, o *setpoint* de 2,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. Este *setpoint* está fora do ponto de operação (3,5 V) utilizado para modelagem do sistema.

<i>Setpoint</i>	Seguimento de referência do tipo degrau	Sobressinal
2,0V	Sim	Não
2,5V	Sim	Não

Tabela 4.2: Tabela com análise da resposta ao degrau do sistema controlado para referência que está fora do ponto de operação do sistema modelado na seção 3.1.3

Testes feitos com distúrbios na planta

Foram executados os mesmo testes da seção 4.1.2, ou seja, mudada a abertura da válvula V-8 para 0% e para cerca de 75%, mantendo o *setpoint* de nível 3,5V (ponto de operação).

O teste de manter a válvula V-8 totalmente aberta, ou seja, 100% de abertura foi executado e foi confirmado, como dito na seção 4.1.2, que a bomba não possui vazão suficiente no recalque para que o tanque encha até a referência de 3,5 V.

Os gráficos 4.10 e 4.11 mostram os resultados dos testes citados acima:

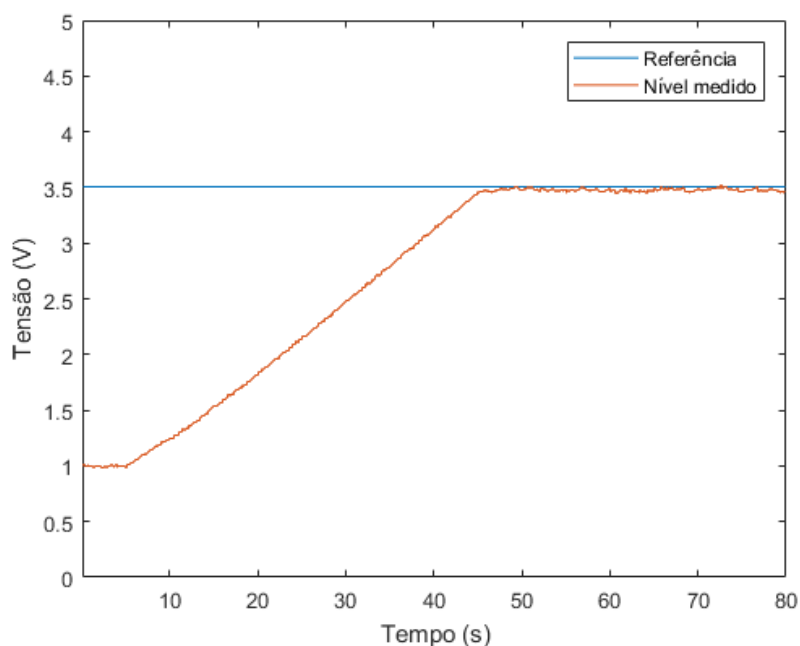


Figura 4.10: Gráfico que apresenta, em azul, o *setpoint* de 3,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. A válvula de dreno V-8 estava fechada, ou seja, apresentava abertura de 0%, abertura a qual estava fora do ponto de operação utilizado para modelagem do sistema.

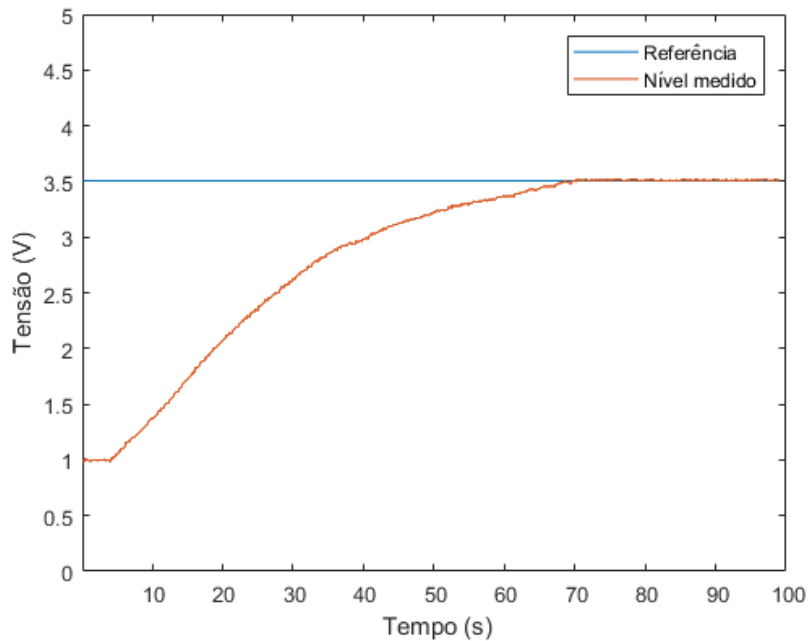


Figura 4.11: Gráfico que apresenta, em azul, o *setpoint* de 3,5 V da malha de controle externa e, em vermelho, a saída do sistema medido pelo sensor de nível da planta. A válvula de dreno V-8 apresentava abertura de aproximadamente 75%, abertura que estava fora do ponto de operação utilizado para modelagem do sistema.

Analisando as Figuras 4.10 e 4.11 percebe-se que os resultados obtidos com esse tipo de controlador são melhores que os resultados obtidos nos mesmos testes da seção 4.1.2. Pode-se notar que tanto o tempo de acomodação quanto o erro em regime permanente são menores nos dois testes com controladores adaptativos em cascata.

Capítulo 5

Conclusões

O trabalho expõe a implementação e comparação entre duas técnicas de controle distintas sobre uma planta de nível didática. A primeira técnica conta com a implementação de dois controladores "PI"(Proporcional-Integral) em cascata, já na segunda técnica utilizada são implementados, novamente em cascata, dois controladores adaptativos via aproximação.

5.1 Considerações Finais

A partir dos resultados apresentados e explanados no capítulo 4 pode-se concluir que o sistema com controladores adaptativos via aproximação expôs, para **todos** testes, melhores resultados, tanto em regime permanente quanto transitório, do que os apresentados quando sistema englobava controladores "PI"(Proporcional-Integral).

Assim, comparando as duas técnicas, conclui-se que o controle adaptativo via aproximação apresenta resultados melhores para sistemas que são não lineares e contém histerese, como é o caso da planta de estudo utilizada.

O único ponto negativo é complexidade de implementação deste tipo de controlador. Já que, como foi dito no capítulo 3, durante teste na planta várias alterações no projeto inicial dos controladores adaptativos foram feitas de forma que o sistema apresente uma melhor resposta.

5.2 Propostas de Continuidade

Por fim, pode-se dar continuidade ao projeto executando outros testes para uma melhor sintonia dos diversos parâmetros dos controladores adaptativos. Alguns desses parâmetros que podem ser alterados são:

- O tipo função de pertinência;
- O número de regras dos vetores de funções de pertinência;
- As matrizes de aprendizado Γ ;
- As zonas mortas à adaptação.

Também pode-se implementar outros tipos de controladores, que não sejam clássicos, nesta planta de nível e comparar os resultados obtidos com os apresentados neste texto.

Referências Bibliográficas

- [1] GOMES, D. *Desenvolvimento de Comunicação Computador - Planta 3503-MO e Implementação do Controlador Digital*. 2018.
- [2] CAMPOS, V. C. d. S. Notas de aula. In: *Controle Usando Sistemas Nebulosos*. Ouro Preto (MG): [s.n.], 2018.
- [3] LABVOLT. *Mobile Instrumentation and Process Control Training Systems: Labvolt series, 3500*. [S.l.], 2015.
- [4] NATIONAL INSTRUMENTS. *SPECIFICATION - USB-6009: 8 ai (14-bit, 48 ks/s), 2 ao (150 hz), 13 dio usb multifunction i/o device*. [S.l.], 2017.
- [5] RESENDE, C. M. F. L. *Aplicação de Técnicas de Controle Digital em uma Planta Piloto*. 2018.
- [6] JUNIOR, N. F. da S. *Controle Preditivo Iterativo Não Linear Multivariável sob Restrições com Complexidade Temporal Reduzida*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.
- [7] SILVA, I. M. de S. S. Controle adaptativo de um robô manipulador de dois graus de liberdade em uma rede zigbee. *Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria*, Novembro 2014.
- [8] ROCHA, J. M. *Implementação de Controle Fuzzy em CLP Industrial*. 2016.