



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU



SABRINA DE ALMEIDA FONTANA MAGALHÃES

**ESCALONAMENTO DE GANHOS DE UM CONTROLADOR PI POR LÓGICA
FUZZY APLICADO AO PROCESSO DE DOIS TANQUES ACOPLADOS**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2016

SABRINA DE ALMEIDA FONTANA MAGALHÃES

ESCALONAMENTO DE GANHOS DE UM CONTROLADOR PI POR LÓGICA FUZZY
APLICADO AO PROCESSO DE DOIS TANQUES ACOPLADOS

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Agnaldo José da Rocha Reis

Co-orientador: José Alberto Naves Cocota Junior

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Agosto/2016

M188e Magalhães, Sabrina de Almeida Fontana.
Escalonamento de ganhos de um controlador PI por Lógica Fuzzy aplicado ao processo de dois tanques acoplados [manuscrito] / Sabrina de Almeida Fontana Magalhães. - 2016.

49f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis.
Coorientador: Prof. Msc. José Alberto Naves Cocota Junior.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

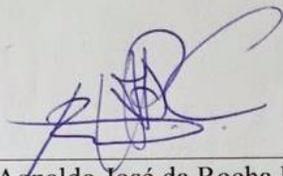
1. Controle de processo - Nivelamento. 2. Sistemas de controle ajustavel. 3. Lógica difusa. 4. Controle de Nível. I. Reis, Agnaldo José da Rocha. II. Cocota Junior, José Alberto Naves. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV.

Título.

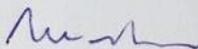
Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

CDU: 681.5

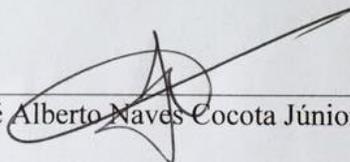
Monografia defendida e aprovada, em 04 de agosto de 2016, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Orientador



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado



Prof. M. Sc. José Alberto Naves Cocota Júnior – Professor Convidado

Agradecimentos:

Agradeço primeiramente à Deus pela conclusão de mais uma etapa em minha vida.

À minha mãe, pelo apoio às minhas decisões, dedicação e luta diária na criação minha e de minhas irmãs, se hoje me formo em Engenharia de Controla e Automação, o mérito é todo seu!

À Escola de Minas, aos professores, especialmente Agnaldo e Cocota pelos ensinamentos e paciência de sempre, muito obrigada!

Aos meus amigos de Mariana, Itabirito e aos que fiz durante o meu percurso na UFOP, obrigada pelo companheirismo, com vocês a caminhada até aqui tornou-se mais fácil.

Viva a Escola de Minas! Viva! Viva! Viva!

RESUMO

Atualmente, com o aumento da complexidade dos processos industriais e da tecnologia, a hegemonia dos controladores convencionais, tal como o controlador proporcional integrativo, é ameaçada devido às suas limitações, como por exemplo a questão ganhos fixos. Dessa forma, é possível ver um advento de controladores adaptativos, nos quais os ganhos são ajustados no decorrer do tempo de acordo com o comportamento do processo. Um exemplo deste tipo de controlador, é o Controlador Adaptativo PI Supervisório *Fuzzy*. Nele, a lógica *Fuzzy* tem o papel de monitorar o comportamento do processo e atualizar os ganhos proporcional e integral. Este trabalho foca no estudo, análise e comparação deste tipo de controlador com um controlador convencional, através de simulações e experimentos na planta real. O trabalho foi desenvolvido usando os softwares MATLAB e LabVIEW em conjunto com uma placa de aquisição de dados NI-USB 6009. As análises gráficas realizadas mostram um desempenho equiparável entre os dois controladores projetados, quando aplicados à sistemas não-lineares com uma dinâmica lenta.

Palavras-chave: Controlador PI, Controlador Adaptativo, Lógica *Fuzzy*, Controle de Nível.

ABSTRACT

Nowadays, with the increasing complexity of industrial processes and also technology, the hegemony of conventional controllers is under threat due to its limitations, for example the proportional integrative controller with fixed gains. Therefore, there has been an advent of adaptive controllers, in which the gains are adjusted over timing according to the process behavior. An example of adaptive controller is a *Fuzzy* gain scheduling of PI controller. In this controller the *Fuzzy* logic is monitoring the system behavior constantly and updating the proportional and integrative gains according to it. Thus, this paper aims to study, to analyze and to compare this controller with a conventional PI controller through simulations and test in the real plant. The work is developed using MATLAB and LabVIEW software in conjunction with a data acquisition board NI-USB 6009. Graphical analyzes shows a very similar performance among the designed controllers when they are applied to slow dynamic nonlinear system.

Key words: PI Controller, *Fuzzy* Logic, Adaptive Controller, Level Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de um controlador Fuzzy	13
Figura 2: Sistema de controle PI com ganho escalonado Fuzzy	14
Figura 3: Tanques	15
Figura 4: Sistema de dois tanques acoplados sem distúrbio.....	17
Figura 5: Sistema de dois tanques acoplados com distúrbio	20
Figura 6: Lugar das raízes do sistema sem compensador.....	24
Figura 7: Lugar das raízes do sistema compensado	25
Figura 8: Funções de pertinência para e e Δe	27
Figura 9: Função de pertinência para K_p' e K_i'	27
Figura 10: Exemplo de resposta ao degrau unitário	28
Figura 11: Exemplo de tela no software LabView	30
Figura 12: Sinal de Controle e nível sem distúrbio (controlador PI convencional)	32
Figura 13: Sinal de Controle e Nível sem distúrbio (controlador PI adaptativo).....	33
Figura 14: Valores de K_i sem distúrbio.....	34
Figura 15: Valores de K_p sem distúrbio.....	34
Figura 16: Sinal de Controle e nível com distúrbio (controlador PI convencional).....	35
Figura 17: Sinal de controle e nível com distúrbio (controlador PI adaptativo)	36
Figura 18: Valores de K_i com distúrbio	37
Figura 19: Valores de K_p com distúrbio	37

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros gerais.....	18
Tabela 2: Parâmetros identificados.....	19
Tabela 3: Parâmetros gerais da planta com distúrbio	21
Tabela 4: Parâmetros identificados da planta com distúrbio.....	22
Tabela 5: Regras para cálculo de K_p'	28
Tabela 6: Regras para cálculo de K_i'	29
Tabela 7: Valores de máximo sobressinal e tempo de acomodação para os controladores (planta sem distúrbio)	32
Tabela 8: Valores de máximo sobressinal e do tempo de acomodação para os controladores (planta com distúrbio).....	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Considerações iniciais.....	8
1.2	Objetivos.....	9
1.3	Justificativa	9
1.4	Metodologia.....	9
2	CONTROLADORES	11
2.1	Controlador Convencional PI	11
2.2	Controladores por lógica Fuzzy	12
2.2.1	Lógica Fuzzy	12
2.2.2	Controladores Fuzzy.....	12
2.2.3	Controlador adaptativo PI supervisorio <i>Fuzzy</i>	14
3	PROCESSO DE DOIS TANQUES ACOPLADOS	15
3.1	Descrição da planta	15
3.1.1	Configuração da planta sem distúrbio	16
3.1.2	Configuração da planta com distúrbio.....	19
3.2	Modelo matemático do processo	22
4	PROJETO DOS CONTROLADORES	24
4.1	Projeto do controlador PI com parâmetros fixos	24
4.2	Projeto do controlador adaptativo PI supervisorio <i>Fuzzy</i>	26
5	SIMULAÇÕES, EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	30
5.1	Simulações e experimentos.....	31
5.1.1	Sem Distúrbio.....	31
5.1.2	Com Distúrbio	35
6	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	39
	APÊNCIDE A – Modelo não-linear da planta no SIMULINK.....	42
	APÊNCIDE B – Constantes do Modelo não-linear da planta no MATLAB	45
	APÊNCIDE C – Código MATLAB	47
	APÊNCIDE D – Diagrama de conexão.....	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Sistemas de controle são uma parte integrante da sociedade moderna e encontrados por toda a parte em processos industriais. Atualmente, percebemos seu grande uso em processos químicos, beneficiamentos de minérios, no controle de nível de reservatórios, entre outros exemplos. Um sistema de controle consiste em subsistemas e processos (ou plantas) programados com o intuito de obter uma saída e uma performance desejada, a partir de uma determinada entrada (NISE, 2011).

A maioria desses sistemas de controle usam técnicas de controle clássicas, tais como controle ON/OFF, controle Proporcional (P), Proporcional Integrativo (PI), Proporcional Derivativo (PD) e controle proporcional integrativo e derivativo (PID), este último sendo o mais usado no ambiente industrial. Essas técnicas necessitam de um profundo conhecimento sobre a dinâmica do processo.

Em muitos casos, a planta a ser controlada é muito complexa e não-linear, além de requerer um controle com um alto grau de precisão. Para esses casos, uma das possíveis soluções é o uso de um controlador adaptativo. Esse tipo de controlador é capaz de estimar parâmetros desconhecidos da planta controlada, alterando assim o comportamento do sistema ajustando-o à novas circunstâncias (SILVA JÚNIOR, 2005).

Ao usar um controlador adaptativo, os ganhos de um controlador, e.g., PI são recalculados e atualizados ao passar do tempo, fazendo com que o sistema tenha um desempenho satisfatório de acordo com variações causadas por ruídos ou pela não-linearidade do próprio sistema. Neste trabalho é estudado e utilizado o controlador adaptativo *Fuzzy Gain Scheduling of PI Controllers* (Escalonamento de Ganhos de controladores PI por Lógica *Fuzzy*). Esse tipo de controlador usa regras *Fuzzy* para determinar os ganhos do controlador PI (K_p e K_i), que conseqüentemente gera o sinal de controle para a planta (ZHAO, TOMIZUKA e ISAKA, 1993).

1.2 Objetivos

Estudar, analisar e aplicar um controlador adaptativo supervisorio *Fuzzy* no controle de um sistema não-linear, mais precisamente, num sistema de tanques acoplados, bem como comparar a performance deste controlador com um controlador PI de parâmetros fixos.

1.3 Justificativa

Tendo em vista que atualmente os processos industriais são cada vez mais não-lineares e exigem um controle robusto, é possível observar que controladores convencionais têm perdido espaço no mercado devido às suas limitações. Dessa forma, é preciso buscar novas soluções. O uso de controladores adaptativos no controle de processos combinados com sistemas baseados em conhecimento, como, e.g., a lógica *Fuzzy*, vem crescendo gradativamente e, em muitos casos, apresentando um melhor desempenho em relação aos controladores convencionais.

1.4 Metodologia

Neste trabalho é realizado o controle de um sistema não-linear por meio de um controlador convencional PI e de um controlador adaptativo PI supervisorio *Fuzzy*. O controlador *Fuzzy* é responsável por monitorar o processo através do erro e da variação do erro, calculando novos parâmetros (ganho proporcional e ganho integral) para o controlador PI ao longo do tempo. Sendo assim, a partir de qualquer variação ou distúrbio que ocorra no sistema, o controlador se adapta de forma a garantir uma melhoria na performance. Posteriormente os dois controladores desenvolvidos são comparados entre si por meios de experimentos realizados com e sem distúrbio no sistema. O estudo foi desenvolvido em caráter de simulação e experimentos na planta física do sistema. Para a simulação foram utilizados os softwares MATLAB e SIMULINK versão R2012b e para os experimentos físicos foram utilizados uma

placa de aquisição de dados da National Instruments (USB-6009), o software LabVIEW 2015 com o Módulo de Controle e Simulação e Toolkit de Lógica Fuzzy, e uma planta didática de tanques acoplados presente no Laboratório de Máquinas Elétricas da Escola de Minas.

Esta monografia está organizada como se segue. No capítulo 2 é descrito o controlador convencional PI, além de uma rápida revisão sobre lógica *Fuzzy*, controladores *Fuzzy* e o controlador adaptativo supervisorio *Fuzzy*, foco deste trabalho. O capítulo 3 descreve a planta utilizada. No capítulo 4 tem-se o projeto do controlador PI convencional com parâmetros fixos e o projeto do controlador adaptativo PI supervisorio *Fuzzy*. Por fim, são apresentados os resultados, análises e conclusões.

2 CONTROLADORES

2.1 Controlador Convencional PI

Em um controlador proporcional a ação de controle, ou correção, deve ser aplicada ao processo na proporção em que o erro entre a saída e o sinal de entrada (setpoint) cresce. Porém, esse erro nunca será eliminado somente com a ação proporcional. Para que seja possível a eliminação desse erro, é necessária a adição de uma ação integral, temos então um controlador Proporcional-Integrativo (PI). O controlador PI é caracterizado pela seguinte função de transferência:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1)$$

O controlador Proporcional-Integrativo (PI) possui um zero em $s = -1/T_i$ e um polo em $s = 0$, então a característica de um controlador PI é ter ganho infinito quando a frequência é zero, o que melhora as características do sistema em regime permanente. Porém, quando incluído no sistema, esse tipo de controlador aumenta o grau do sistema em 1, fazendo o sistema ficar menos estável ou até completamente instável. Portanto, os valores dos ganhos proporcional (K_p) e da taxa integral (T_i), devem ser cuidadosamente escolhidos para que o sistema tenha uma resposta transiente apropriada. Ao projetar o controlador PI corretamente, é possível fazer que a resposta do sistema ao degrau exiba um pequeno ou praticamente nenhum sobressinal. Dessa forma, a ação integral age de forma que a saída do processo controlado possa acompanhar o sinal de entrada, com tendência a diminuir o erro estacionário de um controlador proporcional. É importante ressaltar que se a ação integral no processo for acentuada, esta pode causar uma instabilidade no sistema (OGATA, 2009).

2.2 Controladores por lógica Fuzzy

2.2.1 Lógica Fuzzy

A lógica *Fuzzy* ou lógica nebulosa baseia-se em modos de raciocínios não exatos, dando espaço à possibilidade de mensuração, ou seja, uma aproximação da solução. Para que isso seja possível, ao invés de números ou valores booleanos (0 ou 1), a lógica *Fuzzy* utiliza expressões e termos linguísticos e toma 0 e 1 como valores para mínimos e máximos permitindo um grau de pertinência compreendido entre esses valores. Um sistema Fuzzy é um sistema de variáveis que são associadas usando lógica Fuzzy e conseqüentemente controlado por um controlador Fuzzy, este que usa regras definidas e baseadas de acordo com o valor atual das variáveis de entrada do sistema. As três principais partes das quais consiste um sistema Fuzzy são: variáveis linguísticas, funções de pertinência e regras (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

As variáveis linguísticas são representadas por categorias de valores chamadas termos linguísticos. Por exemplo, uma variável chamada *Nível* e *Nível Desejado* pode incluir termos linguísticos como *alto*, *médio* ou *baixo*. Por sua vez, os termos linguísticos são representados por funções numéricas chamadas funções de pertinência que definem o grau de pertinência de determinado termo em relação à sua variável linguística. Por exemplo, o termo *quente*, correspondente à 100 graus, pode ter um alto grau de pertinência em relação a variável *Temperatura*, nenhum grau de pertinência quando menor que 70 graus ou um grau de pertinência parcial quando compreendido entre 70 e 100. Já as regras descrevem em palavras as relações entre uma variável de entrada e outra de saída baseando-se nos seus termos linguísticos (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

2.2.2 Controladores Fuzzy

Controladores *Fuzzy* são normalmente usados para controlar sistemas *Fuzzy*. Controladores convencionais necessitam de uma modelagem matemática precisa do sistema a

ser controlado, entretanto, muitos desses sistemas podem ser não-lineares, extremamente complexos e difíceis de serem modelados. Tendo em vista essas características e se for possível descrever o processo e uma estratégia de controle qualitativamente, é possível criar e usar um controlador Fuzzy.

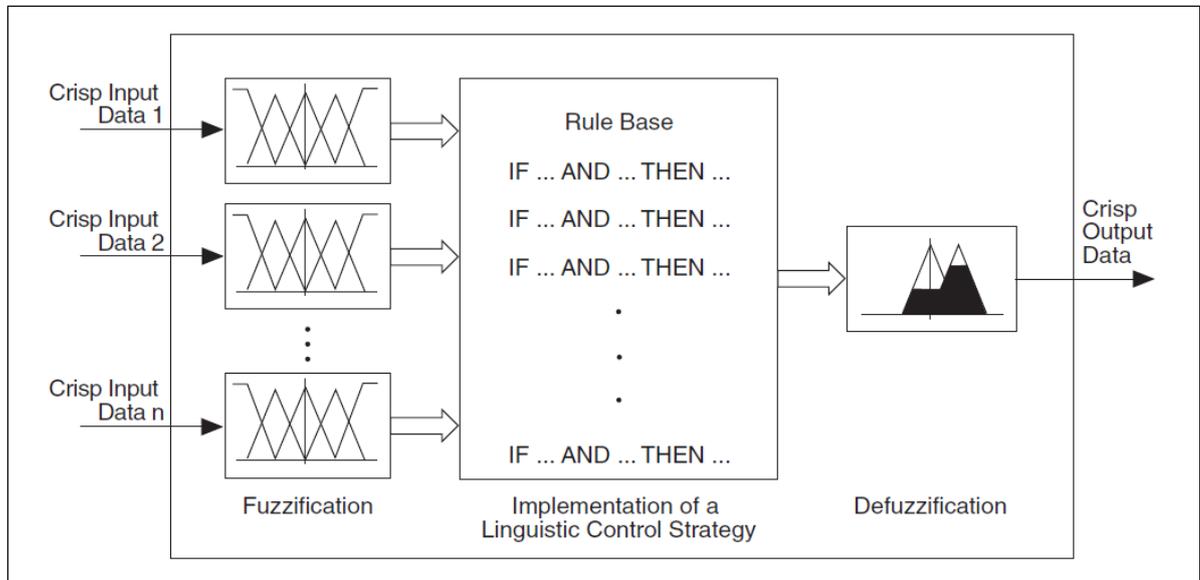


Figura 1: Estrutura de um controlador *Fuzzy*

Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS, 2009

Na figura 1 tem-se a estrutura de um controlador Fuzzy, composto pelas etapas de fuzzificação, implementação da estratégia de controle linguística e finalmente a defuzzificação.

A fuzzificação é o processo em que entradas numéricas são associadas com as variáveis linguísticas de entrada e seus correspondentes termos linguísticos. Após a fuzzificação, o controlador usa os termos linguísticos de entrada e a base de regras para determinar os termos linguísticos das variáveis de saída. Um exemplo de regra seria: SE *temperatura atual* é *frio* E *temperatura desejada* é *moderada*, ENTÃO *setpoint aquecedor* é *baixo*. Levando em consideração o grau de pertinência de cada variável e o antecedente conector (E), o controlador calcula o valor verdade da regra. O processo de defuzzificação é feito usando esse valor verdade, onde o grau de pertinência das variáveis de saída é convertido em valores numéricos (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

Controladores *Fuzzy* são versáteis, robustos e altamente adaptáveis, por essas razões esses controladores apresentam um bom desempenho quando o processo é complexo e de difícil modelagem matemática. Então, quando se tem a incorporação de um controlador convencional PI à um controlador *Fuzzy*, pode-se esperar um desempenho superior no processo (BRITO, 2015).

2.2.3 Controlador adaptativo PI supervisório *Fuzzy*

Um controlador adaptativo é empregado em sistemas que apresentam mudanças significativas em sua operação ao longo do tempo, dessa forma se torna necessário monitorar e variar os parâmetros mantendo o controle do sistema de acordo com as condições de operação. Essa forma de controle é conhecida também como escalonamento de ganhos.

O controlador adaptativo proposto neste trabalho utiliza a lógica *Fuzzy* para o cálculo dos parâmetros K_p e K_i de um controlador Proporcional Integrativo (PI). Esses cálculos são realizados a cada instante de amostragem baseadas em regras pré-determinadas e nos valores do erro (diferença entre entrada e saída do processo) e da derivada do erro. Na figura 2 tem-se o esquema de um sistema de controle PI com ganho escalonado *Fuzzy*.

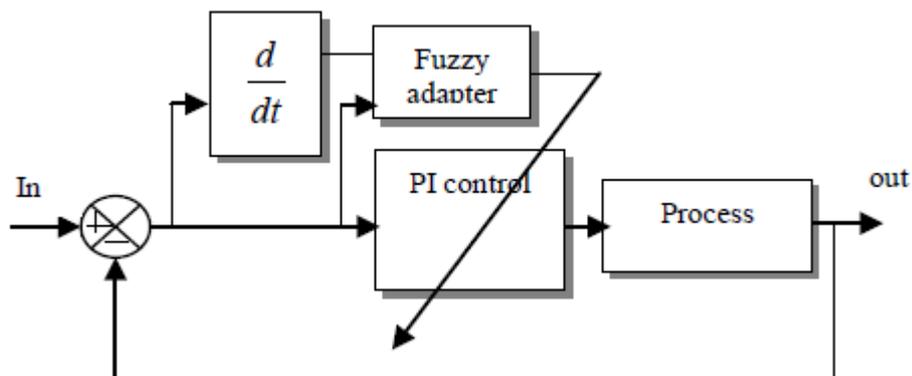


Figura 2: Sistema de controle PI com ganho escalonado *Fuzzy*

3 PROCESSO DE DOIS TANQUES ACOPLADOS

3.1 Descrição da planta

A bancada experimental é composta de dois tanques acoplados em série e um reservatório, conforme a figura 3. As dimensões de cada tanque são 43,8 milímetros de diâmetro interno e 250 milímetros de altura, a capacidade do reservatório é de aproximadamente 14 litros.

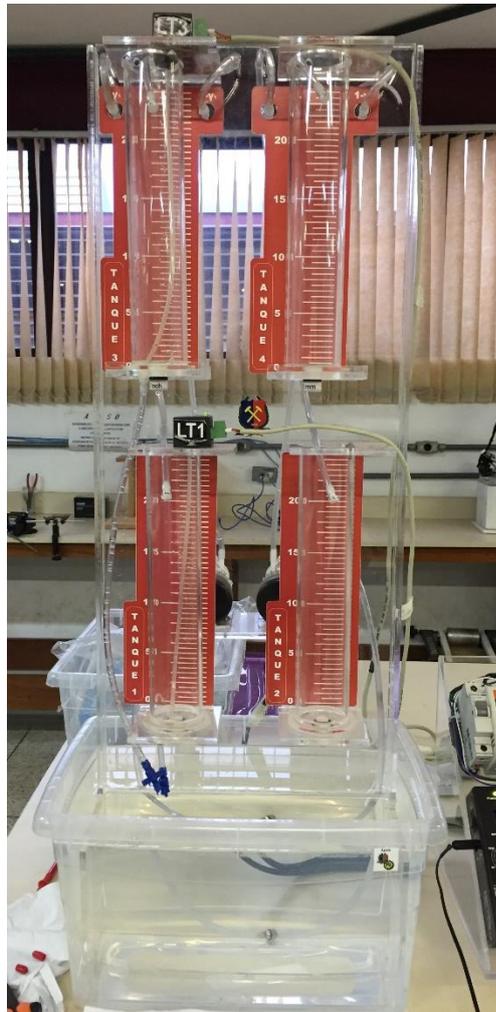


Figura 3: Tanques

Fonte: Autor

É usada uma moto-bomba composta por um motor de corrente contínua de 12 Vcc, um dissipador de calor e uma bomba de engrenagens acoplada ao eixo do motor como atuador. Um módulo de potência de entrada analógica de 0 a 10 Vcc e sinal de saída modulado por largura de pulsos (PWM) de 0 a 12 Vcc, é usado para acionar o atuador. A água é bombeada para os dois tanques e a saída do tanque superior (tanque 2) flui para o tanque inferior (tanque 1), e a saída do tanque inferior flui para o reservatório. Dessa forma o sistema é fechado e sua massa permanece constante durante o processo. Para a medição dos níveis do tanque é usado um sensor de pressão diferencial (COCOTA et al, 2014).

3.1.1 Configuração da planta sem distúrbio

Na figura 4 temos o diagrama esquemático da planta utilizada nos experimentos e simulações sem distúrbio. A água é bombeada para os dois tanques, de forma que o fluxo da bomba para o tanque 1 é γ_1 e para o tanque 2 é $1 - \gamma_1$. A saída do tanque 2 flui para o tanque 1, e a saída do tanque 1 flui para o tanque dois. Na tabela 1 temos os parâmetros inerentes a este sistema sem distúrbio, e na tabela 2 os parâmetros identificados para efeito de simulação.

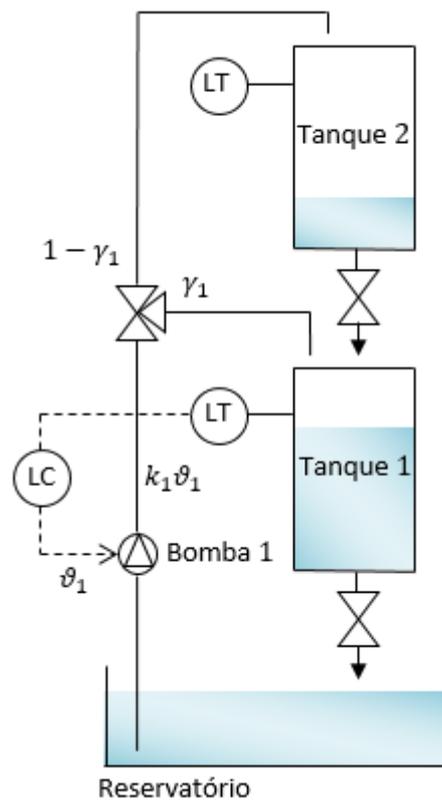


Figura 4: Sistema de dois tanques acoplados sem distúrbio

Fonte: COCOTA et al, 2014

SÍMBOLO	VALOR [unid.]	DESCRIÇÃO
A_1, A_2	1506,74 [mm ²]	Área da seção transversal dos tanques
a_1	14.96 [mm ²]	Área da seção transversal do dreno do tanque 1
a_2	6,06 [mm ²]	Área da seção transversal do dreno do tanque 2
d_{1e}	4.36 [mm]	Diâmetro de estrangulamento do fluxo da bomba na entrada do tanque 1
d_{2e}	2,77 [mm]	Diâmetro de estrangulamento do fluxo da bomba na entrada do tanque 2
g	9787,9 [mm/s ²]	Aceleração da gravidade
k_{mod}	1	Ganho do módulo de potência da bomba
k_c	1/25.88 [V/mm]	Ganho do sensor para a amostragem do nível na faixa de 0 a 240 [mm]

Tabela 1: Parâmetros gerais

SÍMBOLO	VALOR [UNID.]	DESCRIÇÃO
$h_{1,0}$	59[mm]	Nível do tanque 1 no ponto de operação
$h_{2,0}$	66[mm]	Nível do tanque 2 no ponto de operação
$v_{1,0}$	3.9[V]	Tensão média aplicada na entrada do módulo de potência para o ponto de operação
$\vartheta_{1,0}$	3.9[V]	Tensão média aplicada no motor da bomba
k_b	35981[mm ³ /Vs]	Ganho da bomba
γ_1	0.6228	Parcela do fluxo de água da bomba para o tanque 1
k_{11}	0.89	Constante de perda de carga do dreno do tanque 1
k_{12}	0.78	Constante de perda de carga do dreno do tanque 2

Tabela 2: Parâmetros identificados

3.1.2 Configuração da planta com distúrbio

Na figura 5 temos o diagrama esquemático da planta utilizada nos experimentos e simulações com distúrbio. Na tabela 3 temos os parâmetros inerentes a este sistema sem distúrbio, e na tabela 4 os parâmetros identificados para efeito de simulação.

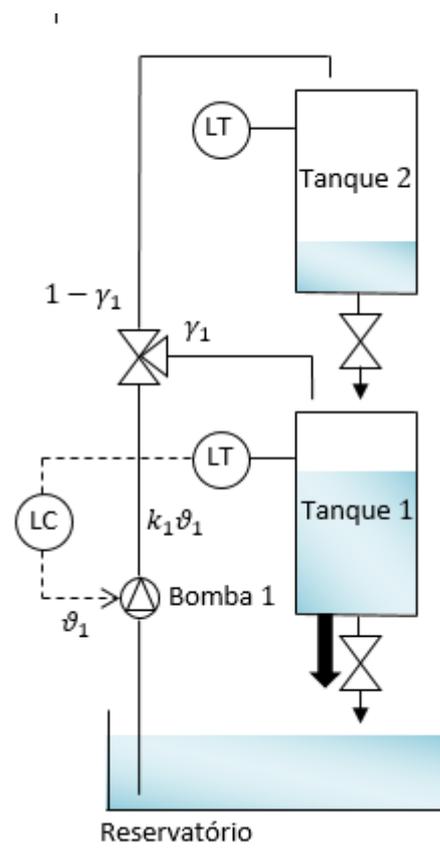


Figura 5: Sistema de dois tanques acoplados com distúrbio

Fonte: Autor

SÍMBOLO	VALOR [unid.]	DESCRIÇÃO
A_1, A_2	1506,74 [mm ²]	Área da seção transversal dos tanques
a_1	14,96 [mm ²]	Área da seção transversal do dreno do tanque 1
a_2	12,37 [mm ²]	Área da seção transversal do dreno do tanque 2
d_{1e}	4,36 [mm]	Diâmetro de estrangulamento do fluxo da bomba na entrada do tanque 1
d_{2e}	3,97 [mm]	Diâmetro de estrangulamento do fluxo da bomba na entrada do tanque 2
g	9787,9 [mm/s ²]	Aceleração da gravidade
k_{mod}	1	Ganho do módulo de potência da bomba
k_c	1/25.88 [V/mm]	Ganho do sensor para a amostragem do nível na faixa de 0 a 240 [mm]

Tabela 3: Parâmetros gerais da planta com distúrbio

SÍMBOLO	VALOR [UNID.]	DESCRIÇÃO
$h_{1,0}$	50[mm]	Nível do tanque 1 no ponto de operação
$h_{2,0}$	15[mm]	Nível do tanque 2 no ponto de operação
$v_{1,0}$	5.15[V]	Tensão média aplicada na entrada do módulo de potência para o ponto de operação
$\vartheta_{1,0}$	5.15[V]	Tensão média aplicada no motor da bomba
k_b	21995 [mm ³ /Vs]	Ganho da bomba
γ_1	0,656	Parcela do fluxo de água da bomba para o tanque 1
k_{11}	0,75	Constante de perda de carga do dreno do tanque 1
k_{12}	0,79	Constante de perda de carga do dreno do tanque 2

Tabela 4: Parâmetros identificados da planta com distúrbio

3.2 Modelo matemático do processo

A modelagem matemática adotada para esse processo foi baseada no modelo de caixa cinza, que consiste em um processo intermediário entre a modelagem caixa branca e caixa preta. Assim sendo, alguns parâmetros do processo foram determinados experimentalmente e outros valendo-se da modelagem fenomenológica. O modelo não linear (Eq. 2 e Eq. 3) do processo foi obtido a partir da lei de conservação para escoamentos incompressíveis e da lei de Bernoulli.

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{(1-\gamma_1)}{A_2} k_b \vartheta_1 - k_{l2} \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} \quad (2)$$

$$\frac{dh_1}{dt} = k_{l2} \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{\gamma_1}{A_1} k_b \vartheta_1 - k_{l1} \frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} \quad (3)$$

Onde k_b é o ganho da bomba, h é a altura dos tanques no ponto de operação, ϑ é a tensão média aplicada no motor da bomba, k_{li} são constantes de perda de carga nos drenos dos tanques e γ_1 é a parcela do fluxo de água da bomba para o tanque 1.

O modelo linear (Eq. 4 e Eq. 5) foi então obtido pela expansão em série de Taylor da Eq. (1) e Eq. (2), e após a aplicação da transformada de Laplace, temos as seguintes funções de transferência:

$$\frac{X_2(s)}{U_1(s)} = \frac{(1-\gamma_1)c_2}{(T_2s+1)} \quad (4)$$

$$\frac{X_1(s)}{U_1(s)} = \frac{\gamma_1 c_1 T_2 s + c_1}{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)} \quad (5)$$

Sendo $X_1(s)$ e $X_2(s)$ os sinais de saída referente aos níveis dos tanques, $U_1(s)$ o sinal de entrada dos tanques referente à tensão aplicada na bomba, $c_1 = k_b k_c T_1 / A_1$, $c_2 = k_b k_c T_2 / A_2$ e as constantes de tempo T_i dadas por:

$$T_i = \frac{A_i}{k_{li} a_i} \sqrt{\frac{2h_{i,0}}{g}}, i = 1,2 \quad (6)$$

4 PROJETO DOS CONTROLADORES

4.1 Projeto do controlador PI com parâmetros fixos

O método para o projeto do controlador escolhido foi o Lugar das Raízes. Para isso, a partir do modelo matemático linearizado do processo, obteve-se a função de transferência em malha fechada (Eq. 4 e Eq. 5). Em posse da função de transferência foi possível esboçar o lugar das raízes sem compensador (figura 6). Como era desejado projetar um controlador PI, foram adicionados um polo na origem e um zero para minimizar a influência do polo dominante no comportamento do sistema. Na figura 7 temos o lugar das raízes do sistema já compensado.

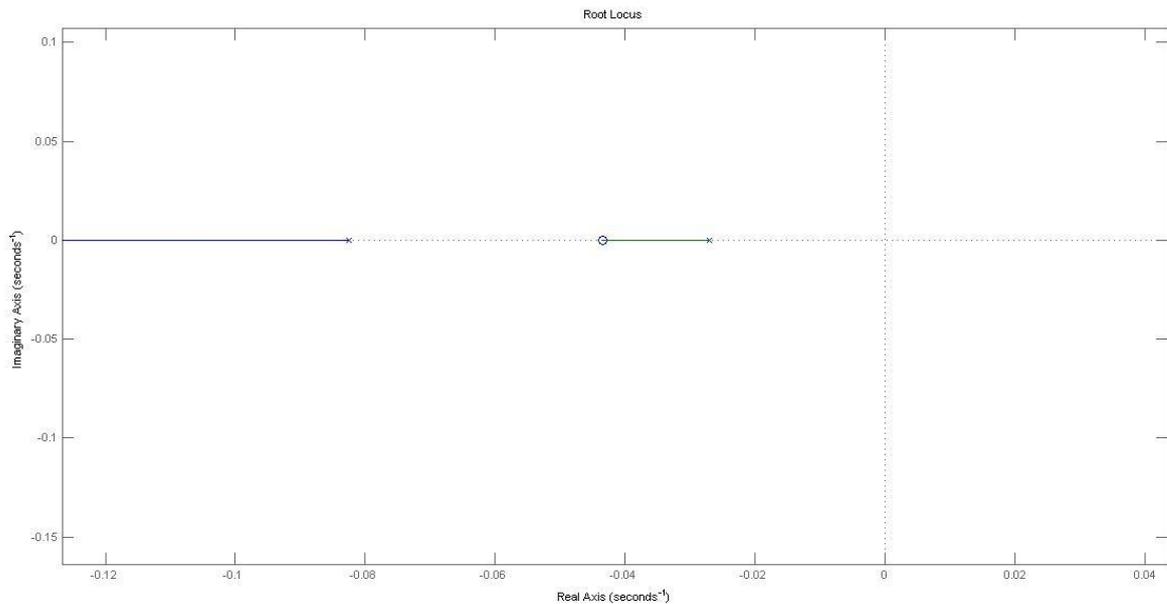


Figura 6: Lugar das raízes do sistema sem compensador

Fonte: Autor

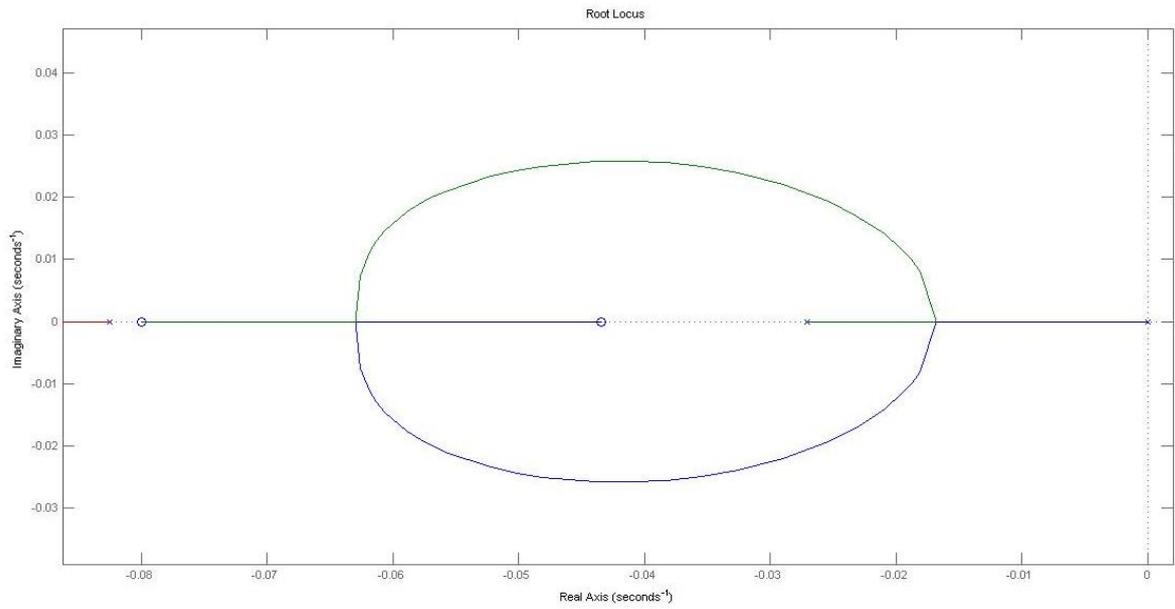


Figura 7: Lugar das raízes do sistema compensado

Fonte: Autor

Os valores encontrados para o ganho proporcional (K_p) e para a constante de tempo de integração (T_i) foram respectivamente 1,33 e 12,5s.

4.2 Projeto do controlador adaptativo PI supervisório *Fuzzy*

Tem-se por definição que um controlador adaptativo é um controlador no qual seus parâmetros são ajustados ao longo do tempo por algum algoritmo. Dessa forma, pode-se considerar que o controlador antes linear, torna-se não-linear devido ao ajuste dos parâmetros (GOMES, ARAÚJO e LIMA, 2006).

Com base nessa definição, tem-se que em um controlador adaptativo PI supervisório *Fuzzy*, os parâmetros são calculados e atualizados através de uma lógica pré-definida. Essa característica amplia a ação de um controlador linear (PI), para que este atue bem para um sistema não-linear (MELIANI, MEROULFEL e KHOUIDMI, 2012).

A lógica *Fuzzy* nesse controlador tem o papel de calcular e ajustar novos parâmetros (K_p e K_i), baseados no erro (e) e na derivada do erro (Δe). As entradas do sistema *Fuzzy* são então o erro e sua variação e as saídas são valores normalizados do ganho proporcional (K_p') e ganho integral (K_i'). A estratégia de controle, ou inferência, usa a base de regras para tomar decisões. As funções de pertinência para e e Δe são mostradas na figura 8, onde Gn é grande negativo, Mn é médio negativo, Pn é pequeno negativo, ZR é zero, Pp é pequeno positivo, Mp é médio positivo e finalmente Gp é grande positivo. A faixa de variação destes parâmetros na função de pertinência define a partir de qual momento o controlador adaptativo atuará no sistema recalculando os ganhos. Quanto maior for a faixa de variação, o quanto antes os ganhos serão recalculados. A figura 9 mostra as funções de pertinência para K_p' e K_i' , divididas em duas regiões: pequena (Peq) e grande (Grd).

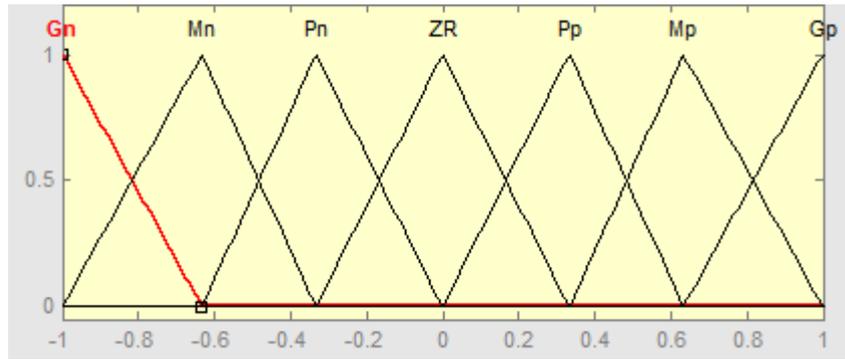


Figura 8: Funções de pertinência para e e Δe

Fonte: Autor

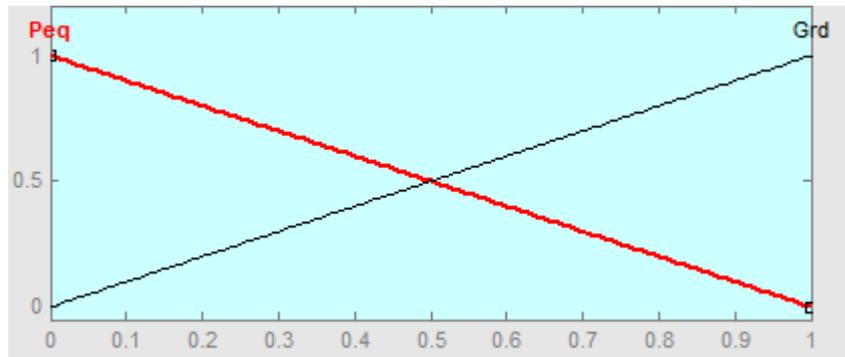


Figura 9: Função de pertinência para Kp' e Ki'

Fonte: Autor

O conjunto de regras é definido de acordo com a resposta em degrau desejada (figura 10). Tem-se, portanto, nas tabelas 5 e 6 o conjunto de regras para cálculo de Kp' e Ki' . A defuzzificação é realizada pelo método do centro de massa.

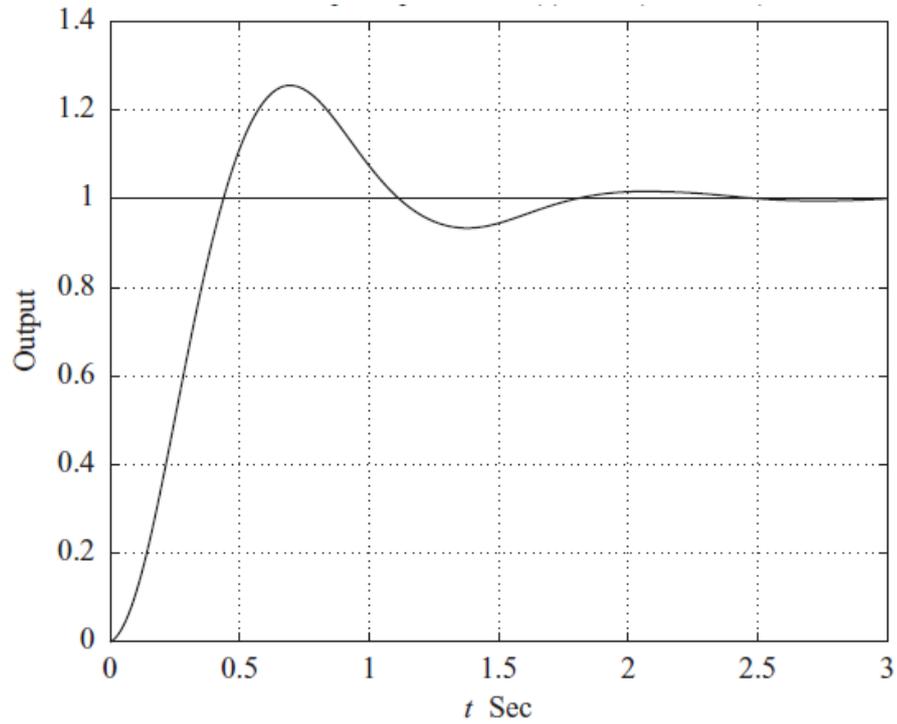


Figura 10: Exemplo de resposta ao degrau unitário

Fonte: OGATA, 2009

	Derivada do erro							
Erro	Gn	Mn	Pn	ZR	Pp	Mp	Gp	
Gn	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd
Mn	Peq	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Peq
Pn	Peq	Peq	Grd	Grd	Grd	Peq	Peq	Peq
ZR	Peq	Peq	Peq	Grd	Peq	Peq	Peq	Peq
Pp	Peq	Peq	Grd	Grd	Grd	Peq	Peq	Peq
Mp	Peq	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Peq
Gp	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd

Tabela 5: Regras para cálculo de K_p'

		Derivada do erro							
Erro		Gn	Mn	Pn	ZR	Pp	Mp	Gp	
	Gn	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd
	Mn	Grd	Peq	Grd	Grd	Grd	Peq	Grd	
	Pn	Grd	Peq	Peq	Grd	Peq	Peq	Grd	
	ZR	Grd	Peq	Peq	Peq	Peq	Peq	Grd	
	Pp	Grd	Peq	Peq	Grd	Peq	Peq	Grd	
	Mp	Grd	Peq	Grd	Grd	Grd	Peq	Grd	
	Gp	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	Grd	

Tabela 6: Regras para cálculo de K_i'

Com posse dos valores normalizados (de 0 a 1) de K_p' e K_i' , os novos valores dos ganhos são calculados de acordo com as equações abaixo:

$$K_i = (K_{imax} - K_{imin})K'_i + K_{imin} \quad (7)$$

$$K_p = (K_{pmax} - K_{pmin})K'_p + K_{pmin} \quad (8)$$

Onde os valores máximos e mínimos dos ganhos são obtidos experimentalmente e são valores em que o sistema ainda apresenta um controle satisfatório. Para esta planta os valores encontrados foram os seguintes:

$$K_{pmax} = 1.8$$

$$K_{pmin} = 1$$

$$K_{imax} = 0,225$$

$$K_{imin} = 0,067$$

5 SIMULAÇÕES, EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Com o objetivo de controlar uma planta não-linear, foram projetados dois tipos de controladores PI: um convencional e um adaptativo. Para a comparação e análise do desempenho destes controladores foram realizados experimentos na planta real e simulações com e sem distúrbio. Nas simulações foi utilizado um modelo não-linear da planta no MATLAB, e para os experimentos na planta real, foi utilizado o software LabVIEW juntamente à uma placa de aquisição de dados (USB-6009). Na figura 11 tem-se um exemplo de tela programada no software LabVIEW.

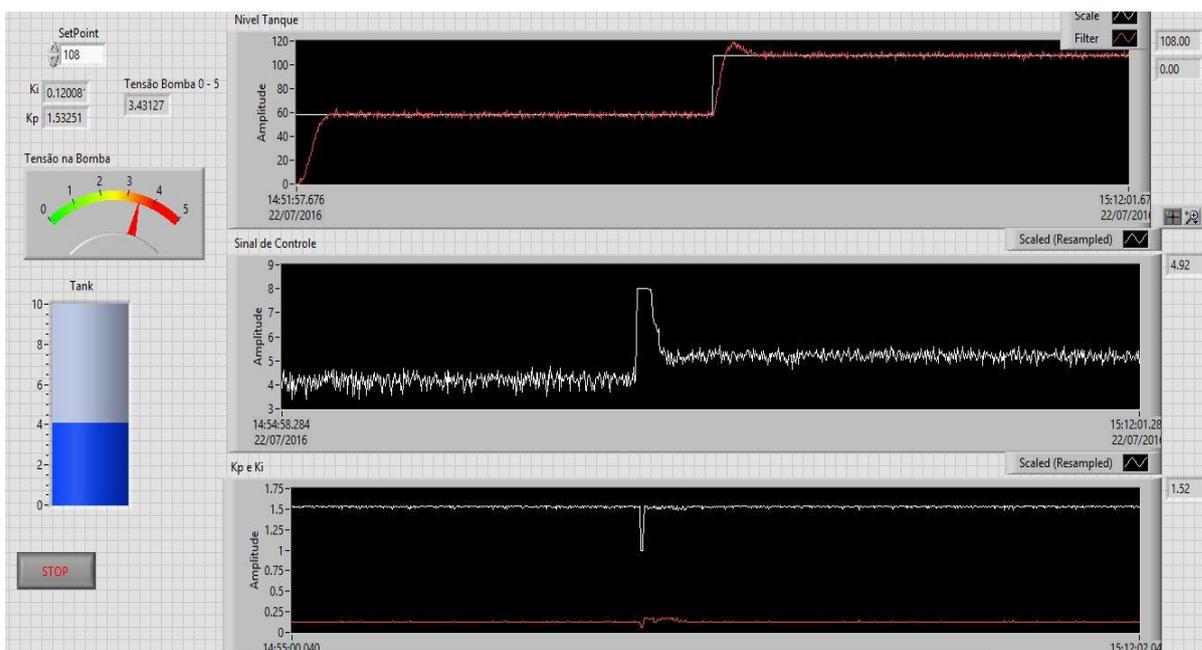


Figura 11: Exemplo de tela no software LabView

Fonte: Autor

A primeira simulação e teste foram realizados no sistema sem nenhum distúrbio, ou seja, no sistema para o qual o controlador PI convencional foi projetado. O ponto de operação era o nível do tanque inferior em regime permanente em 58mm, que correspondia à aproximadamente 3,9V aplicados ao motor da bomba de acordo com as condições de operação

do dia. O diâmetro do dreno do tanque superior era 2,77mm e o diâmetro do dreno do tanque inferior era 4,36mm.

Já a segunda simulação e teste foram realizados com o objetivo de analisar como seria o desempenho de ambos os controladores quando é alterada a dinâmica da planta. Assim o dreno do tanque superior foi alterado para 3,97mm de diâmetro e simulado um vazamento no tanque inferior, dessa forma, tanto a vazão do tanque superior para o inferior, e do tanque inferior para o reservatório, foram maiores e o nível em regime permanente do tanque inferior foi 50mm.

Os parâmetros utilizados para a análise do desempenho dos controladores foram o máximo sobressinal (M_p) e o tempo de acomodação (T_s) para o critério de 2% de máximo sobressinal.

5.1 Simulações e experimentos

5.1.1 Sem Distúrbio

Nas figuras 12 e 13 é possível observar os resultados para a simulação e os experimentos realizados. Tanto para o controlador convencional, quanto o controlador adaptativo os experimentos foram iguais, correspondendo à resposta ao degrau do sistema.

Ambos os controladores apresentaram resultados semelhantes nas simulações, porém o controlador adaptativo apresentou um sobressinal ligeiramente maior que o controlador convencional, porém não significativo. O tempo de acomodação do sistema também foi semelhante. Já nos resultados experimentais, observa-se que o sobressinal do controlador adaptativo foi maior pois o sinal de controle saturou durante um intervalo de tempo um pouco mais longo, conforme resultados apresentados na tabela 7. Não houve saturação do sinal de controle na simulação dos dois controladores.

Controlador PI	Simulação		Experimental	
	M_p	T_s	M_p	T_s
Convencional	3,4%	63[s]	6,5%	75[s]
Adaptativo	5,2%	62[s]	10,4%	56[s]

Tabela 7: Valores de máximo sobressinal e tempo de acomodação para os controladores (planta sem distúrbio)

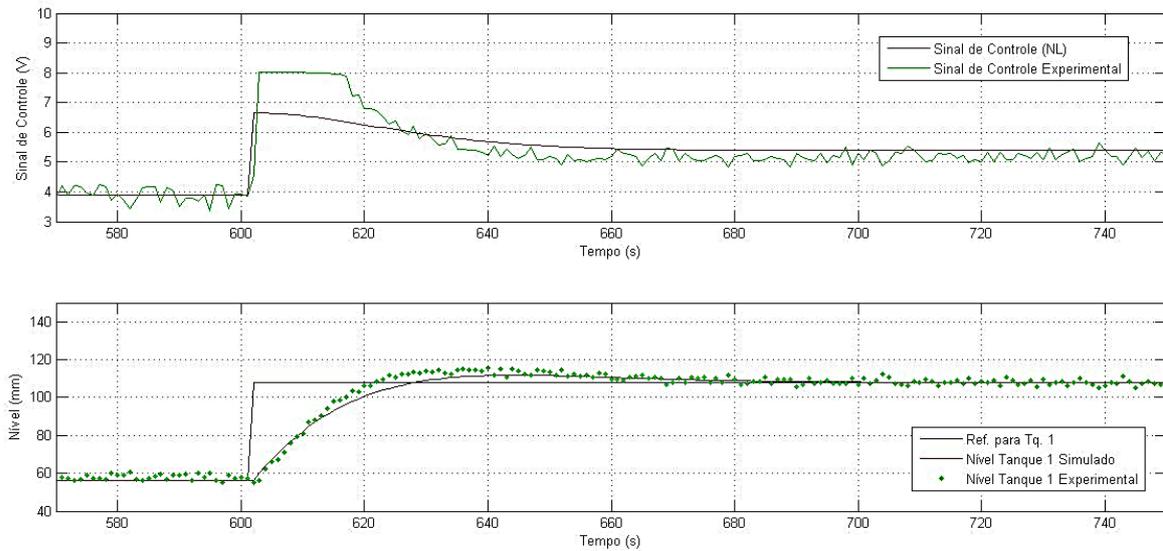


Figura 12: Sinal de Controle e nível sem distúrbio (controlador PI convencional)

Fonte: Autor

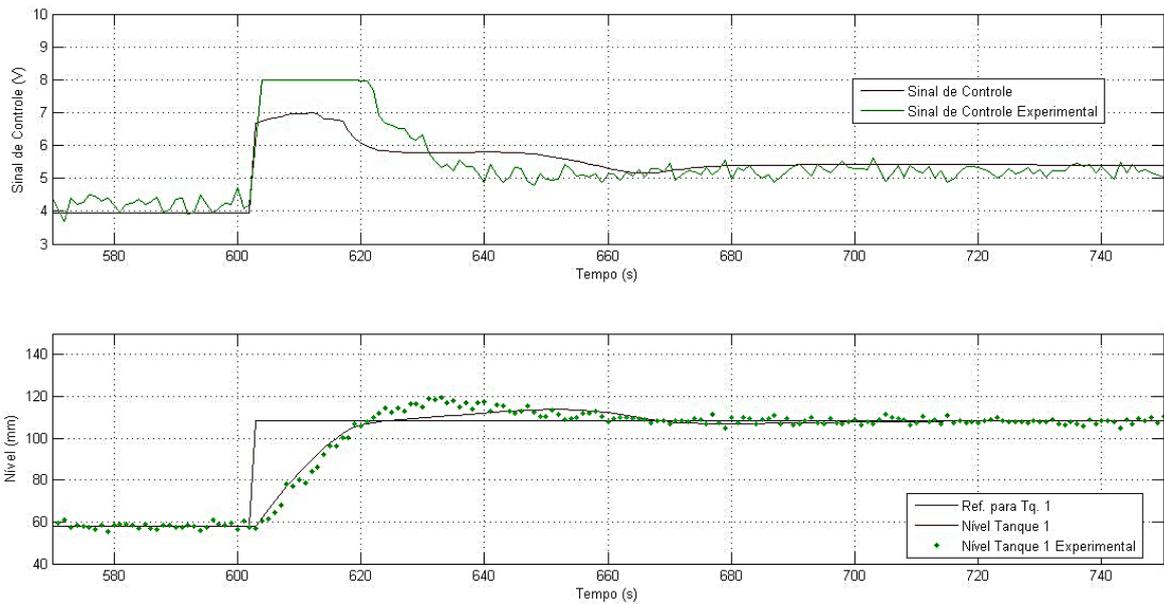


Figura 13: Sinal de Controle e Nível sem distúrbio (controlador PI adaptativo)

Fonte: Autor

Nas figuras 14 e 15 é possível observar os valores calculados dos ganhos pelo controlador adaptativo. No instante do degrau, o controlador adaptativo recalcula os ganhos para o valor mínimo, pois o erro e a variação do erro ainda estão fora da faixa pré-estabelecida. À medida que o sistema alcança o sinal de referência e o erro diminui e entra na faixa de variação determinada, os ganhos são recalculados, o que explica o maior sobressinal. Quando o sistema acomoda, os ganhos permanecem fixos, dessa forma a lógica *Fuzzy* somente atua quando é aplicado um degrau ou uma perturbação no sistema. As oscilações presentes nos valores experimentais dos ganhos devem-se ao fato da variação nas medições do nível do tanque, sendo assim, sempre existe uma pequena variação do erro. É importante ressaltar que o controlador adaptativo projetado atua somente quando o sistema está próximo do sinal de referência, ou seja, quando o erro e a variação do erro estão entre -1V e 1V (medição direta do sensor), o que corresponde aproximadamente à -30mm e 30mm.

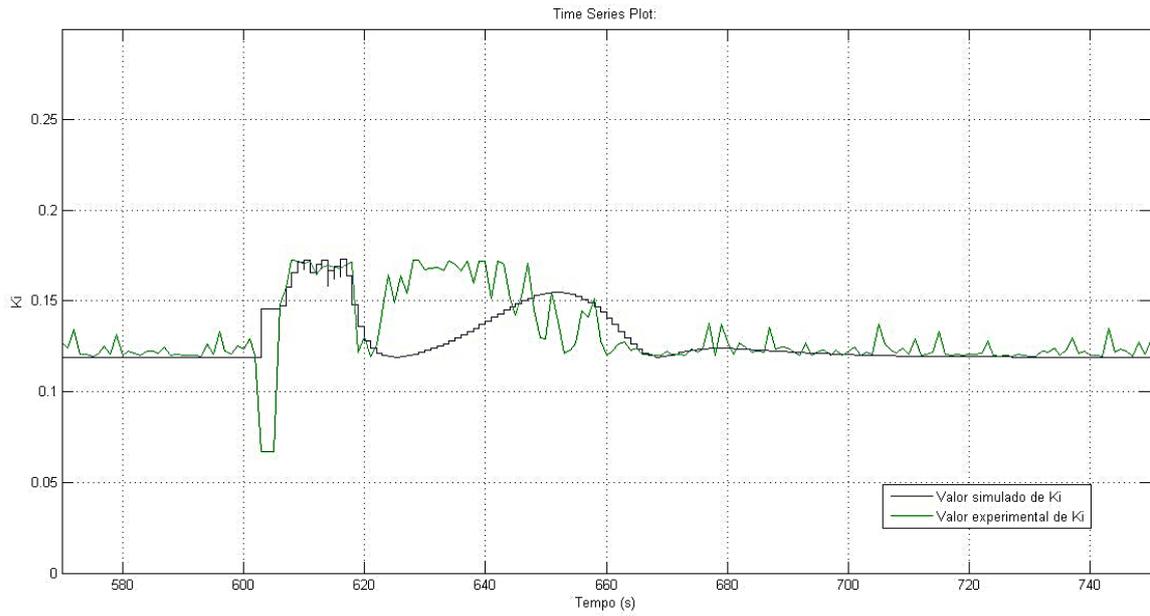


Figura 14: Valores de K_i sem distúrbio

Fonte: Autor

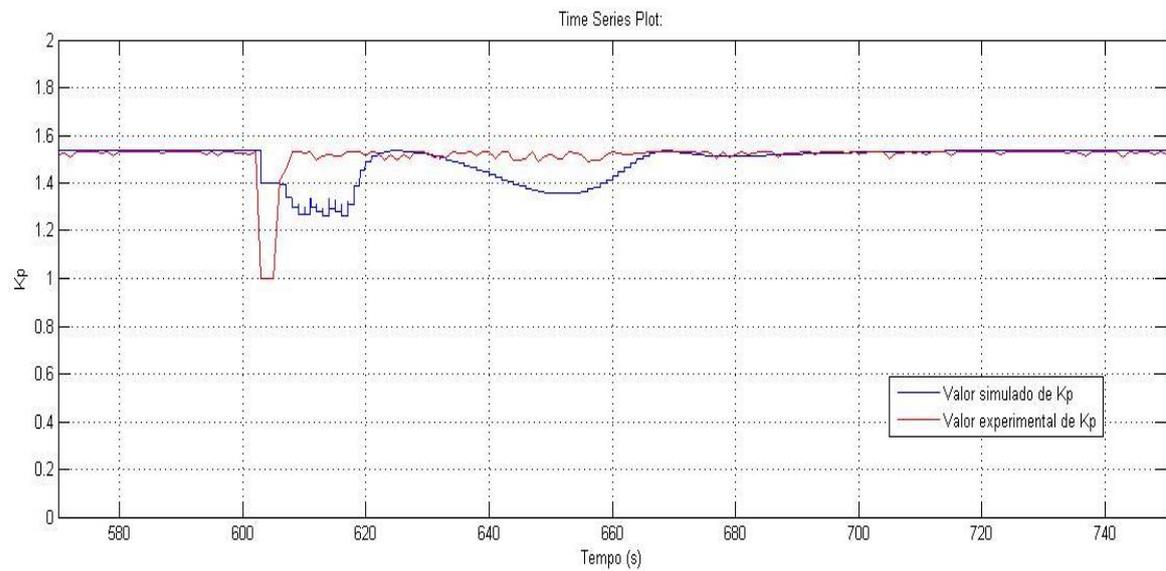


Figura 15: Valores de K_p sem distúrbio

Fonte: Autor

5.1.2 Com Distúrbio

Nas figuras 16 e 17 é possível observar os resultados para a simulação e os experimentos realizados. Tanto para o controlador convencional, quanto o controlador adaptativo os experimentos foram praticamente os mesmos, correspondendo à resposta ao degrau do sistema.

Os controladores novamente tiveram resultados semelhantes nas simulações e experimentos na planta. Os resultados são apresentados na tabela 8, é possível observar que o controlador adaptativo teve um tempo de acomodação menor. A porcentagem de sobressinal nos dois controladores ficaram próximas.

Controlador PI	Simulação		Experimental	
	M_p	T_s	M_p	T_s
Convencional	5,3%	47[s]	15,2%	56[s]
Adaptativo	6,8%	45[s]	14,5%	45[s]

Tabela 8: Valores de máximo sobressinal e do tempo de acomodação para os controladores (planta com distúrbio)

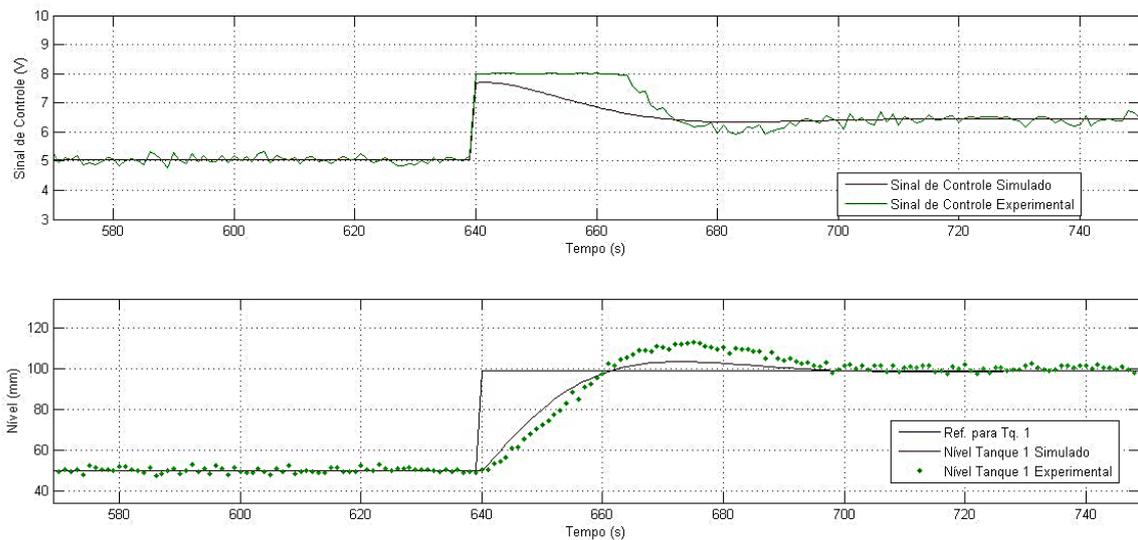


Figura 16: Sinal de Controle e nível com distúrbio (controlador PI convencional)

Fonte: Autor

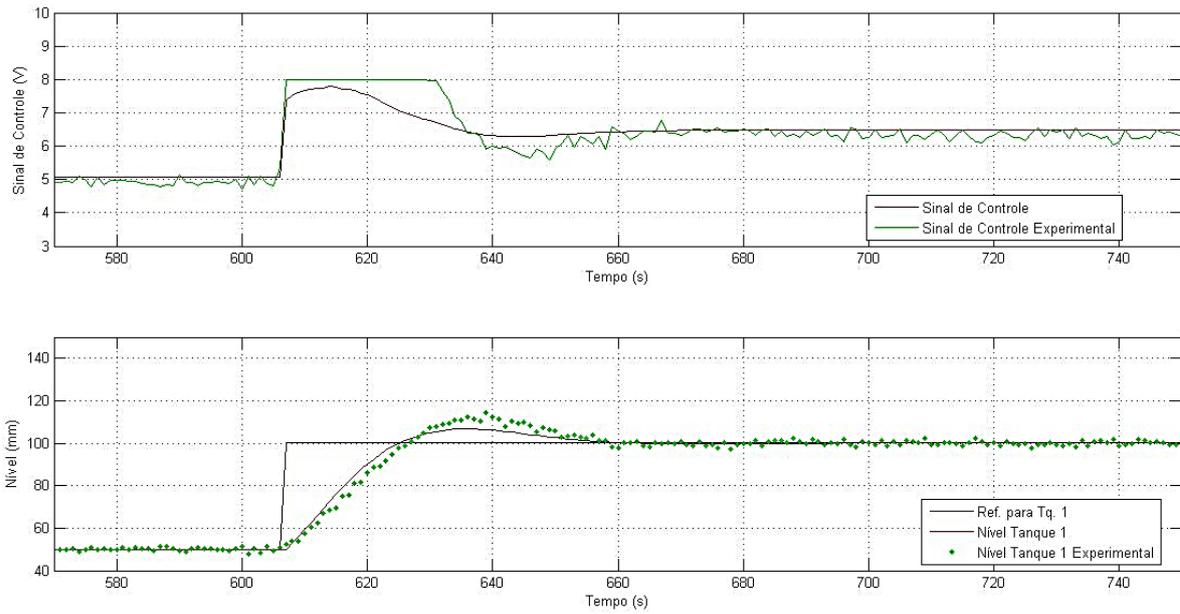
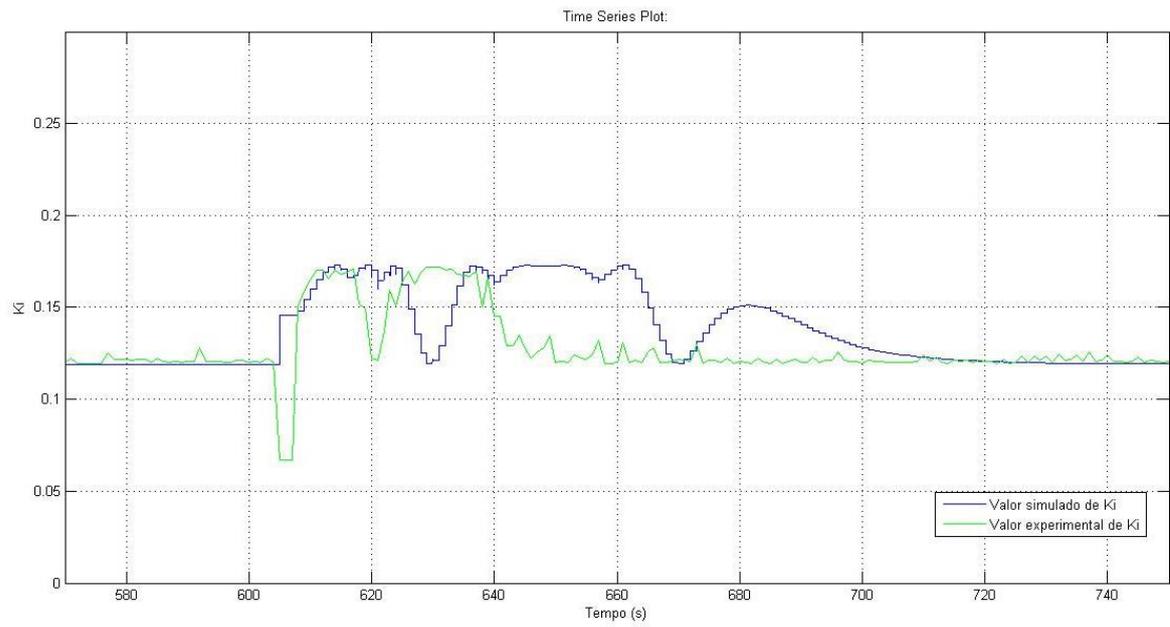


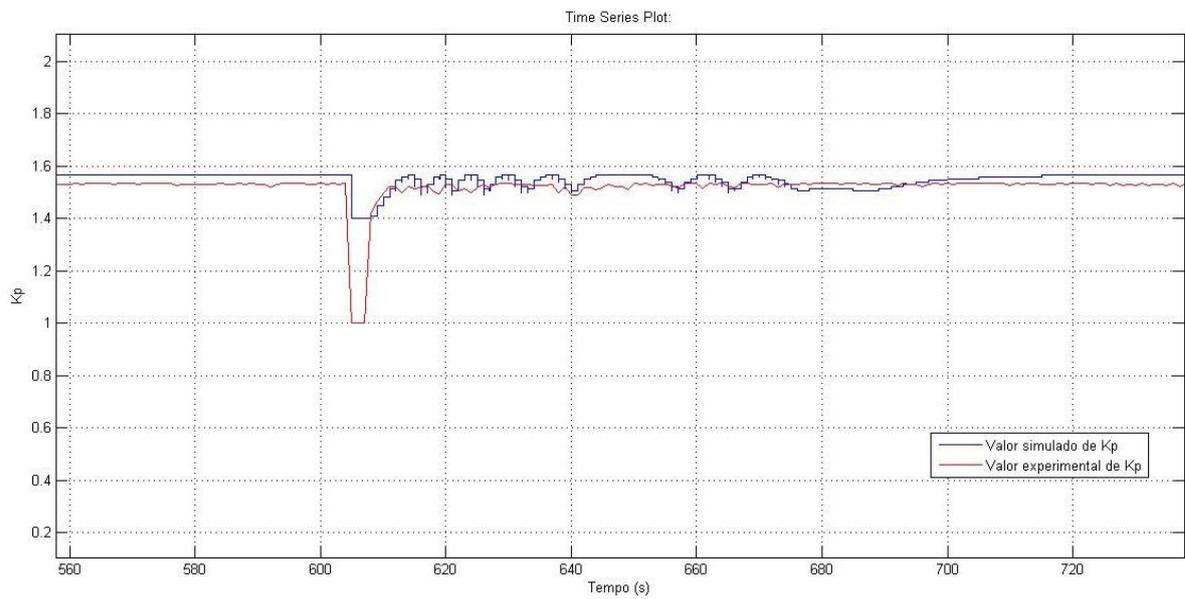
Figura 17: Sinal de controle e nível com distúrbio (controlador PI adaptativo)

Fonte: Autor

Nas figuras 18 e 19 é possível observar os valores calculados dos ganhos pelo controlador adaptativo. Assim como acontece nas simulações e nos experimentos sem distúrbio, o controlador adaptativo age no sistema quando este está próximo ao sinal de referência, de modo que o sistema reaja para alcançá-lo mais rápido e manter-se próximo do sinal de referência sem muitas variações.

Figura 18: Valores de K_i com distúrbio

Fonte: Autor

Figura 19: Valores de K_p com distúrbio

Fonte: Autor

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo o estudo, comparação e a implementação em uma planta real de dois controladores PI: um convencional e outro adaptativo.

Ao analisar os resultados, foi possível observar que o controlador adaptativo não obteve um desempenho superior ao controlador convencional para esta aplicação, tanto na simulação quando nos experimentos na planta real os resultados de ambos os controladores foram bem semelhantes, não existindo uma diferença significativa. Uma das razões é que a dinâmica do sistema descrito é muito lenta, e normalmente um controlador adaptativo é aplicado à sistemas não-lineares que tem uma dinâmica mais rápida.

Uma sugestão para trabalhos futuros é a utilização de todo o conhecimento apresentado neste trabalho na sintonia de um controlador adaptativo PI com escalonamento de ganhos por lógica *Fuzzy*, empregando-o em uma planta onde um controlador PI convencional apresenta dificuldade no controle.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRITO, T. S. P de; **Desenvolvimento de um Controlador PID-Fuzzy para o Controle de Nível de Água de um Pressurizador de um Reator Nuclear.** 2015. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015

COCOTA, J. A. N. J.; MONTEIRO, P. M. B.; SANCHEZ, M. S.; CRUZ E. B.; D'ANGELO T.; BRITO R. P.; IRENO, T. **Análise de Diferentes Controladores para o Processo de Dois Tanques Acoplados.** COBENGE. 2014:1-12.

FERNANDES Júnior, F.G.; LOPES, J. S. B.; MAITELLI, A. L.; ARAÚJO, F. M. U.; OLIVEIRA, L. A. H. G.. **Implementação de Controladores PID Utilizando Lógica Fuzzy e Instrumentação Industrial.** VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São Luís, set 2005.

GOMES, Y. C; ARAÚJO, T. V. G. P; LIMA, A. M. N. **Abordagem Didática com Controle Adaptativo.** COBENGE. 2006: 1864 – 1876.

LUIZ, C. C. et al. **Controle Adaptativo Versus Controle Fuzzy:** Um Estudo de Caso em um Processo de Nível. SBA Controle & Automação, vol. 6, no. 2, 1997.

MAGALHAES Junior, G. **Estudo Analítico de Controladores PID e PID Supervisório Fuzzy em Sistemas Não-Lineares.** 2009. 75f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.

MELIANI, B; MEROULFEL, A; KHOUIDMI, H. **Fuzzy Gain Scheduling of PI Controller for Dual Star Induction Machine fed by a Matrix Converter.** Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering, vol 5, p. 77-82, 2012

NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW: PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual.** Austin, Texas, USA. 2009

NISE, N, S. **Control Systems Engineering**. 6^a Ed. California State Polytechnic University, Pomona. John Wiley & Sons, Inc, 2011.

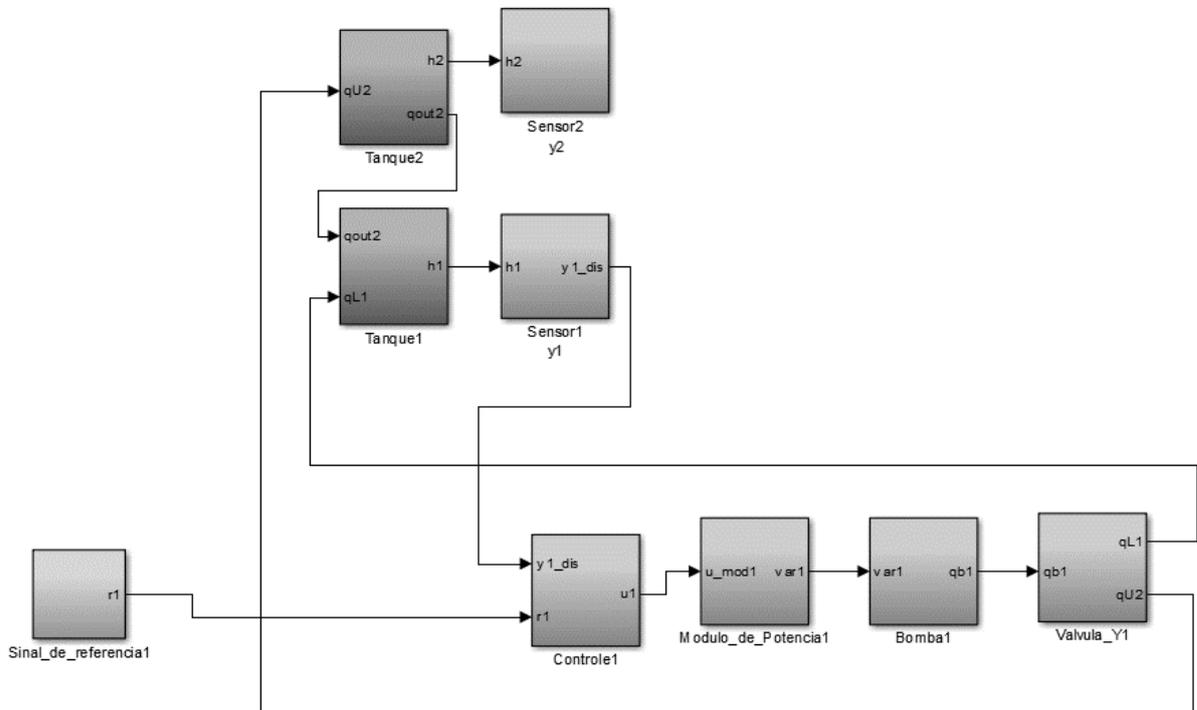
OGATA, K. **Modern Control Engineering**. 5^a Ed. Pearson, 2009

SILVA Junior, F. C. **Uma proposta de um Controlador Adaptativo por Posicionamento de Pólos e Estrutura Variável**. 2005. 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

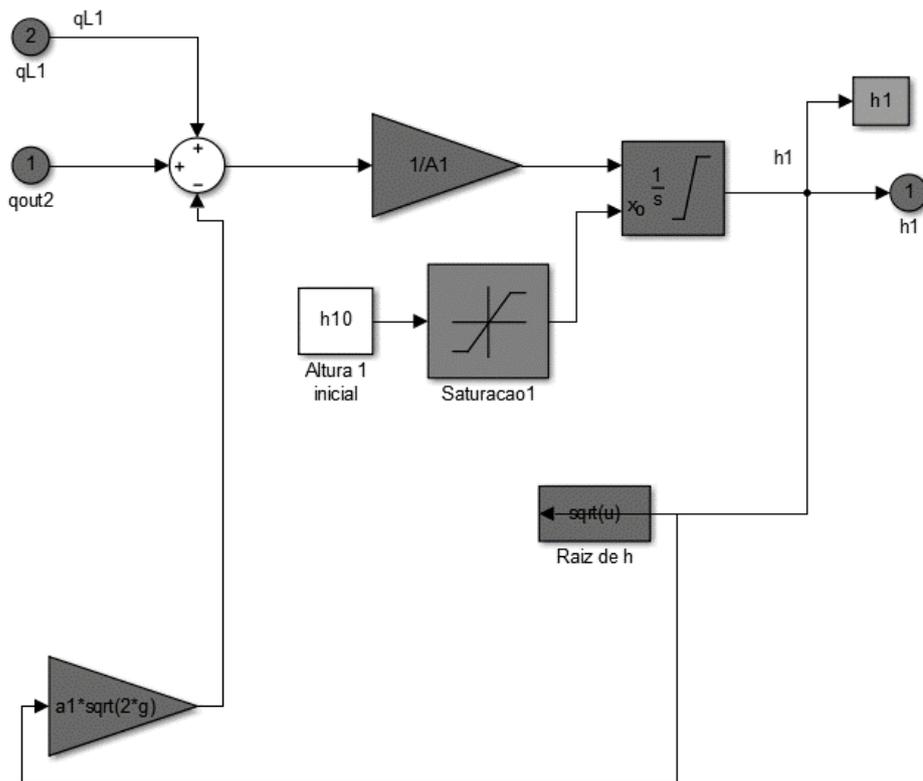
ZHAO, Z.; TOMIZUKA, M.; ISAKA, S. **Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers**. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, vol. 23, no. 5, 1993.

APÊNDICES

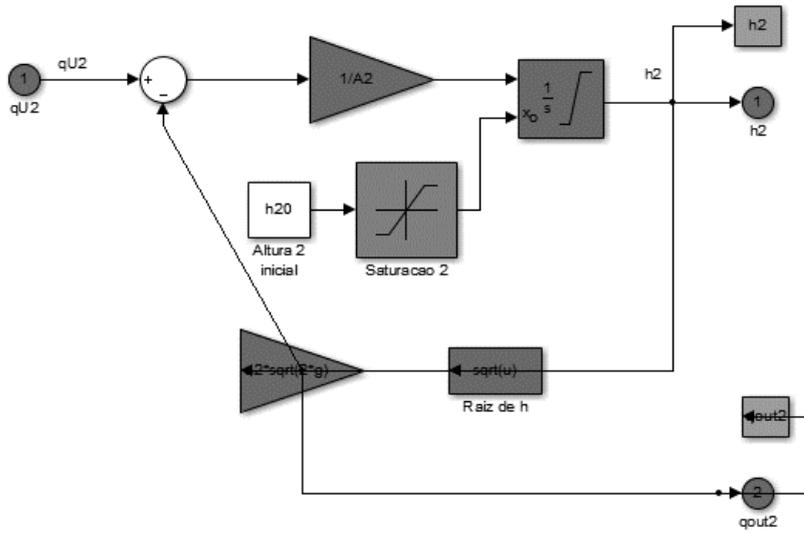
APÊNCIDE A – Modelo não-linear da planta no SIMULINK



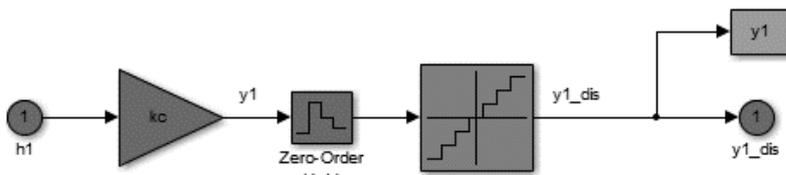
Bloco Tanque 1:



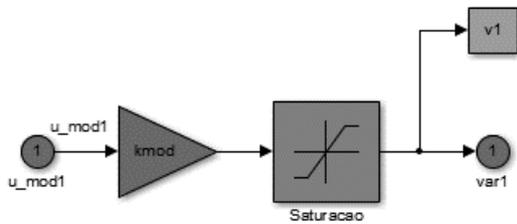
Bloco Tanque 2:



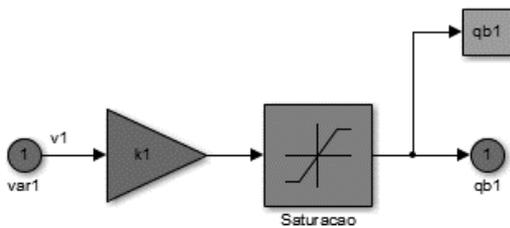
Bloco de Sensores:



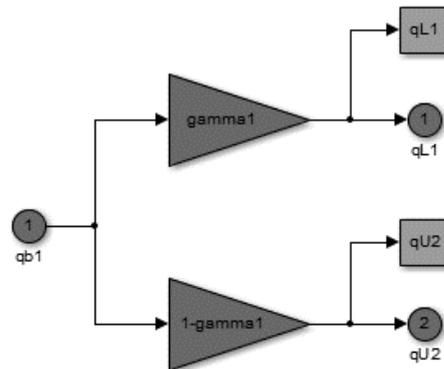
Bloco Módulo de Potência:



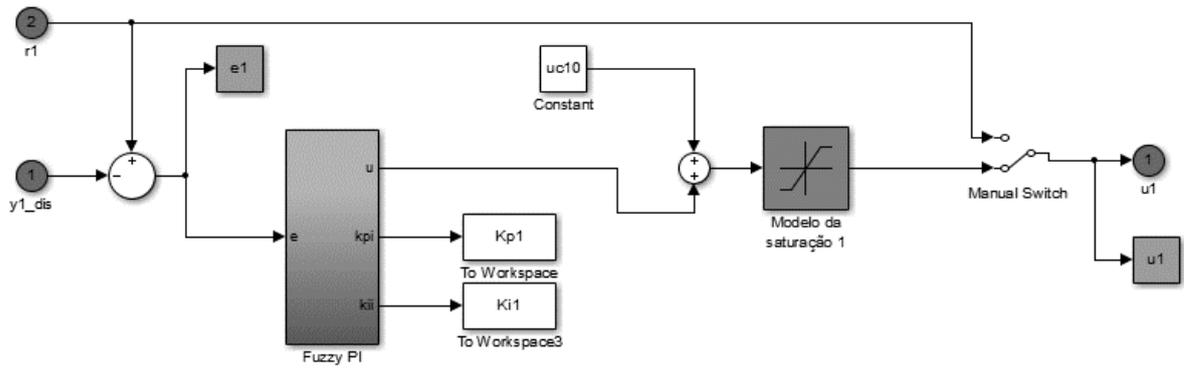
Bloco Bomba:



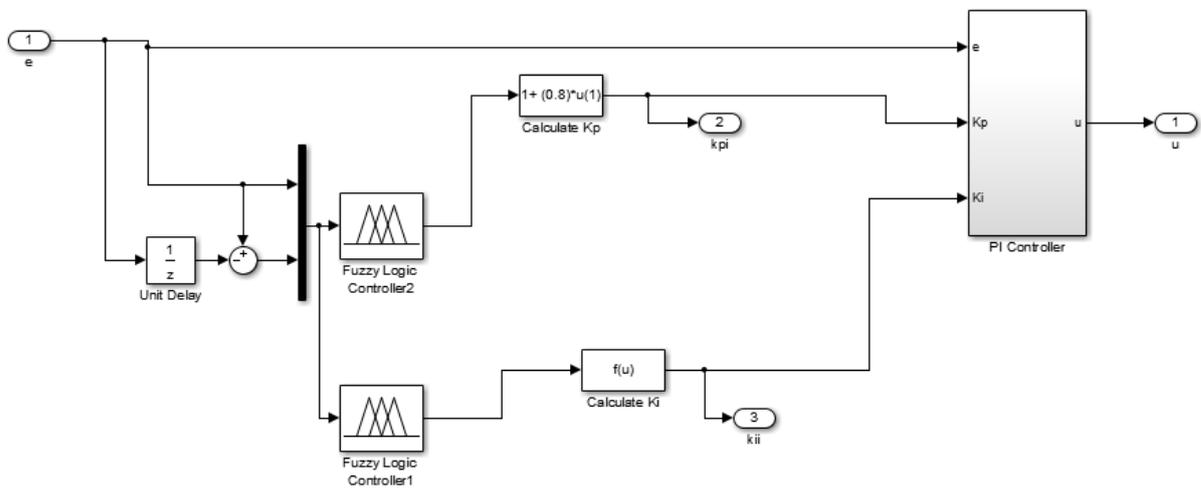
Bloco Válvula:



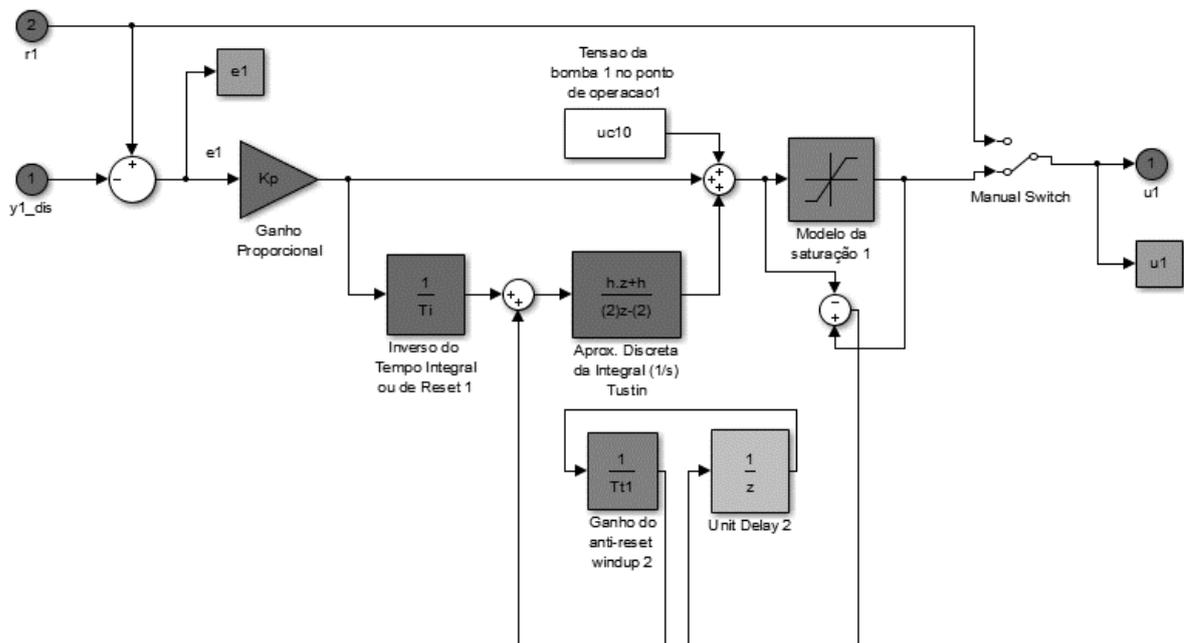
Bloco de Controle com lógica fuzzy:



Bloco Fuzzy PI:



Bloco de Controle PI Convencional



APÊNCIDE B – Constantes do Modelo não-linear da planta no MATLAB

```
h10 = 50;          % Altura h2 inicial (pto de operação)
h20 = 15;          % Altura h4 inicial (pto de operação)

tfinal = 1211;
tempo = (0:1:tfinal)';

%% ----- Parâmetros do modulo -----
uc10 = 5.15;          % entrada 2 do modulo [0-10v]
kmod = 1;            % ganho do modulo
vartheta10 = kmod*uc10; % tensao na bomba 2 [0-12v]

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

%% ----- Parâmetros do tanque 2 e 4-----
raio_cilindro = 21.9;

A1 = pi*(raio_cilindro^2); % Área do tanque 4 [mm^2]
A2 = A1;                    % Área do tanque 2 [mm^2]

rd1 = ((11/64)*25.4)/2;    % raio do dreno 2 [mm]
rd2 = ((5/32)*25.4)/2;    % raio do dreno 4 [mm]

k11 = 0.75;                % cte de perda de carga pelo dreno para o tq 2
k12 = 0.79;                % cte de perda de carga pelo dreno para o tq 4

a1 = k11*pi*(rd1^2);      % Área do orifício de saída do tanque 2 [mm^2]
a2 = k12*pi*(rd2^2);      % Área do orifício de saída do tanque 4 [mm^2]

%% ----- GAMMA -----
gamma1 = 0.656;

%% ----- Ganho da bomba -----
k1 = 2.1995e+03

%% ----- Parametro do sensor-----
kc = 1/25.88;              % Ganho do sensor - faixa de 0 a 30 cm

T1 = (A1/a1)*sqrt((2*h10)/g);
T2 = (A2/a2)*sqrt((2*h20)/g);

c1 = (k1*kc*T1)/A1;
n1 = gamma1*((T1*kc*k1)/A1);
n2 = (1-gamma1)*((T1*kc*k1)/A1);

dt = 1;                    % Intervalo de amostragem para o workspace
```

```

%----- Sinal de referência 1----- TANK 1 e TANK 4
v10_ref = h10*kc;          % tensão de entrada do modulo 1 inicial [V]
v1_ref = v10_ref + 1.95;   % tensão de entrada do modulo 1 [V] Degrau de 2%
t1_ref = 607;              % Instante do degrau

r_min = 0;                 % Tensão mínima da saída A do PLC
r_max = 8;                 % Tensão máxima da saída A do PLC [V] 12

h_min = 0;                 % Nível mínimo
h_max = 24*10;             % Nível máximo [mm]

%Niveis iniciais dos tanques

h1i = h10;                 % Altura h1 inicial
h2i = h20;                 % Altura h2 inicial

%----- Parâmetros do modulo -----
v_min = 0;                 % tensão mínima de saída
v_max = 8;                 % tensão máxima de saída

%% ----- Parâmetros da bomba -----
q1_min = 0;                % Vazão mínima
q1_max = k1*v_max;         % Vazão máxima (cm^3/s)

%% ----- Parâmetros do sensor -----
ymax = 10;                 % Tensão máxima da saída do sensor de pressão [V]
ymin = 0;                  % Tensão mínima da saída do sensor de pressão [V]

```

APÊNCIDE C – Código MATLAB

```
simula_MLx_MNL;
%load('Kp_Ti.mat');
logVal=importdata('pi_fuzzy_disturbio_2607.txt');
h=1; %intervalo de amostragem [s]
Q1 = 10/(2^15); %resolução do sensor
Tt1 = Ti/2; %tempo de windup
sim('Controle_L_NL3.mdl',tfinal)

atraso= 0;           % variavel que desconta o atraso ao dar o degrau no experimento
desconto= 0;        % variavel que desconta o tempo que o sistema demora pra entrar
                    % em regime permanente
ajuste= 1 ;        % variavel que ajusta a diferença de tensao dada pelo CLP

aNl=y1/kc;         % altura em [mm] na saída do modelo não linear
rr=r1/kc;         % sinal de referência

t_aj=[desconto:1211-(atraso)];    %escala de tempo para plotar os dados experimentais
                                    ajustados

%ajuste dos dados descontando os primeiros segundos especificados pela variável desconto

for i=1:length(t1)-(desconto)
    t1_aj2(i)=t1(i+(desconto));    %escala de tempo ajustada para plotar os dados da simulação
    aNL_aj(i)=aNl(i+(desconto)); %altura do gerada pelo modelo não linear ajustada
    rr_aj(i)=rr(i+(desconto));    %sinal de referência ajustado
    u1_aj(i)=u1(i+(desconto));    %tensao de entrada no modelo não linear ajustada
end

%ajuste dos dados descontando os primeiros segundos especificados pela variável desconto e
o atraso experimental ao degrau especificado pela variavel atraso

for i=1:length(logVal(:,5))-(atraso+desconto)
    altura(i)=logVal(i+(atraso+desconto),5); %altura obtida no modelo experimental já ajustada
    sCtr(i)=logVal(i+(atraso+desconto),3);  %sinal de controle experimental já ajustado
    Kp_ex(i)=logVal(i+(atraso+desconto),1);
    Ki_ex(i)=logVal(i+(atraso+desconto),2);
    stpt(i)=logVal(i+(atraso+desconto),4);
end

figure(1)
subplot(2,1,1);
plot(t1_aj2,u1_aj,'r-',t_aj,sCtr,'g-');
legend('Sinal de Controle Simulado','Sinal de Controle Experimental','Location','Best')
ylabel('Sinal de Controle (V)');
xlabel('Tempo (s)');
axis([570,750,3,10]);
```

```
grid on;  
drawnow;
```

```
subplot(2,1,2);  
plot(t1_aj2,rr_aj,'b-',t1_aj2,aNL_aj,'r-');  
hold on  
plot(t_aj,altura,'g.','MarkerSize',5)  
legend('Ref. para Tq. 1','Nível Tanque 1 Simulado','Nível Tanque 1  
Experimental','Location','Best')  
ylabel('Nível (mm)');  
xlabel('Tempo (s)');  
axis([570,750,40,150]);  
grid on;  
drawnow;
```

```
figure(2)  
plot(Kp1);  
hold on  
plot(t_aj,Kp_ex,'r-')  
ylabel('Kp');  
xlabel('Tempo (s)');  
axis([570,750,0,2]);  
drawnow;
```

```
figure(3)  
plot(Ki1);  
hold on  
plot(t_aj,Ki_ex,'g-')  
ylabel('Ki');  
xlabel('Tempo (s)');  
axis([570,750,0,0.3]);  
grid on;  
drawnow;
```

APÊNCIDE D – Diagrama de conexão

