

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

**OTÁVIO VINICIUS BACOVIS**

**COMPARAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO CONTROLADOR *FUZZY* E PID  
APLICADOS EM UM UMA PLANTA DIDÁTICA DE NÍVEL DE  
LÍQUIDO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA  
2016**

**OTÁVIO VINICIUS BACOVIS**

**COMPARAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO CONTROLADOR *FUZZY* E PID  
APLICADOS EM UM UMA PLANTA DIDÁTICA DE NÍVEL DE  
LÍQUIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado(a) como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Fernanda Cristina Corrêa

**PONTA GROSSA**

**2016**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

COMPARAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO CONTROLADOR *FUZZY* E PID APLICADOS  
EM UM UMA PLANTA DIDÁTICA DE NÍVEL DE LÍQUIDO

por

**OTÁVIO VINICIUS BACOVIS**

Este(a) Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado(a) em 18 de novembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica. O(A) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Fernanda Cristina Corrêa  
Orientador(a)

Prof(a). Dr(a). Frederic Conrad Janzen  
Membro Titular

Prof(a). MSc. Julio Cesar Guimarães  
Membro Titular

Prof(a). Dr(a). Josmar Ivanqui  
Responsável pelos TCC

Prof(a). MSc. Jeferson José Gomes  
Coordenador(a) do Curso

Dedico este trabalho à minha família e a todos que de alguma forma colaboraram para realizá-lo.

## RESUMO

BACOVIS, Otávio Vinicius. **Comparação da utilização do controlador *fuzzy* e PID aplicados em um uma planta didática de nível de líquido** . 2016. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

Neste trabalho foi proposto a aplicação das técnicas de controle PID e *fuzzy*, em um sistema de nível de líquido da planta didática Smar PD3 localizada no Laboratório de Sistemas Supervisórios da UTFPR-PG. O projeto dos controladores foram feitos primeiramente via simulação utilizando-se o *Matlab/Simulink* e depois realizou-se o projeto experimental dos controladores utilizando-se a rede industrial de comunicação *Fieldbus* e protocolo OPC. Por meio dos resultados obtidos mostrou-se que os resultados experimentais são bem próximos dos de simulação, e ainda que o controlador *fuzzy* apresenta melhor resultado quando comparado ao PID para esta aplicação.

**Palavras-chave:** Controle. PID. *Fuzzy*. Planta didática. Nível de líquido.

## ABSTRACT

BACOVIS, Otávio Vinicius. **Comparison of the use of *fuzzy* and PID control techniques applied to a didactic plant of liquid level** . 2016. 94 p. Final Coursework (Bachelor's Degree in Electronic Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2016.

In this work was proposed the application of PID and fuzzy controllers applied to a liquid level system from didactic plant PD3 Smar located in the Supervisory System Laboratory of UTFPR-PG. The controllers have been projected by Matlab/Simulink simulation and then by experimental project of the controllers using industrial network communication Fieldbus and OPC protocol. The results obtained have showed that the experimental results are close to simulation results and fuzzy controller presented better results when compared with PID controller for this system.

**Keywords:** Control. PID. *Fuzzy*. Didactic plant. Liquid level.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Controlador PID genérico . . . . .	24
Figura 2 – Função de pertinência triangular . . . . .	26
Figura 3 – Função de pertinência gaussiana . . . . .	27
Figura 4 – Função de pertinência trapezoidal . . . . .	28
Figura 5 – Sistema fuzzy . . . . .	30
Figura 6 – Sistema de nível de líquido . . . . .	31
Figura 7 – Planta didática PD3 Smar . . . . .	35
Figura 8 – Célula Capacitiva . . . . .	38
Figura 9 – Diagrama de blocos do circuito do LD302 . . . . .	39
Figura 10 – Display do transmissor de pressão LD302 . . . . .	40
Figura 11 – Esquema do transdutor pneumático. . . . .	41
Figura 12 – Display do posicionador de válvula FY302 . . . . .	42
Figura 13 – Topologia barramento para o LD302 . . . . .	47
Figura 14 – Topologia barramento para o FY302 . . . . .	48
Figura 15 – Configurações na aba “Detect Device” em “Communication Settings” . . . . .	49
Figura 16 – Configurações na aba “Servers” em “Communication Settings” . . . . .	50
Figura 17 – Relação entre o deslocamento da válvula e o nível do tanque . . . . .	51
Figura 18 – Relação entre altura e corrente de saída do sensor (sensor) . . . . .	51
Figura 19 – Relação entre corrente de entrada e vazão de entrada (atuador) . . . . .	52
Figura 20 – Relação do deslocamento da válvula $u(t)$ com a pressão $p(t)$ . . . . .	53
Figura 21 – Relação da atuação de transmissor de pressão (%) e a pressão ( <i>bar</i> ) . . . . .	55
Figura 22 – Aplicação de um degrau unitário ao sistema de nível de líquido . . . . .	55
Figura 23 – Resultado da aplicação do degrau unitário para o sistema de nível . . . . .	56
Figura 24 – Lugar das raízes da função transferência do sistema de nível de líquido . . . . .	58
Figura 25 – Distribuição das funções pertinência da varável erro . . . . .	62
Figura 26 – Distribuição das funções pertinência da varável derivada do erro . . . . .	62
Figura 27 – Distribuição das funções pertinência da varável altura . . . . .	63
Figura 28 – Controlador PID construído no <i>Matlab/Simulink</i> para aplicação na simulação . . . . .	65
Figura 29 – Aplicação de uma altura de 0,5 e 0,7 metros para o controlador PID simulado . . . . .	66
Figura 30 – Esforço de controle para o controlador PID simulado para uma altura de 0,5 metros . . . . .	66
Figura 31 – Esforço de controle para o controlador PID simulado para uma altura de 0,7 metros . . . . .	67
Figura 32 – Aplicação de uma perturbação para o controlador PID simulado . . . . .	67
Figura 33 – Alterações no <i>Matlab/Simulink</i> para aplicação da perturbação no controlador PID simulado . . . . .	68
Figura 34 – Controlador <i>fuzzy</i> construído no <i>Matlab/Simulink</i> para aplicação na simulação . . . . .	68
Figura 35 – Aplicação de uma altura de 0,5 e 0,7 metros para o controlador <i>fuzzy</i> simulado . . . . .	69
Figura 36 – Esforço de controle para o controlador <i>fuzzy</i> simulado para uma altura de 0,5 metros . . . . .	69

Figura 37 – Esforço de controle para o controlador <i>fuzzy</i> simulado para uma altura de 0,7 metros . . . . .	70
Figura 38 – Aplicação de uma perturbação para o controlador <i>fuzzy</i> simulado . . . . .	70
Figura 39 – Alterações no <i>Matlab/Simulink</i> para aplicação da perturbação no controlador <i>fuzzy</i> simulado . . . . .	71
Figura 40 – Comparação dos controladores PID e <i>fuzzy</i> simulados para a altura de 0,5 metros . . . . .	71
Figura 41 – Comparação dos controladores PID e <i>fuzzy</i> simulados para a altura de 0,7 metros . . . . .	72
Figura 42 – Comparação dos controladores PID e <i>fuzzy</i> simulados com perturbação . . . . .	72
Figura 43 – Controlador PID construído no <i>Matlab/Simulink</i> para aplicação na planta didática PD3 . . . . .	73
Figura 44 – Aplicação das alturas 0,5 e 0,7 metros para o controlador PID da planta didática PD3 . . . . .	74
Figura 45 – Esforço de controle para o controlador PID na planta didática PD3 para uma altura de 0,5 metros . . . . .	74
Figura 46 – Esforço de controle para o controlador PID na planta didática PD3 para uma altura de 0,7 metros . . . . .	75
Figura 47 – Aplicação de uma perturbação para o controlador PID na planta didática PD3 . . . . .	75
Figura 48 – Alterações no <i>Matlab/Simulink</i> para aplicação da perturbação no controlador PID na planta didática PD3 . . . . .	76
Figura 49 – Controlador <i>fuzzy</i> construído no <i>Matlab/Simulink</i> para aplicação na planta didática PD3 . . . . .	77
Figura 50 – Aplicação das alturas de 0,5 e 0,7 metros para o controlador <i>fuzzy</i> da planta didática PD3 . . . . .	77
Figura 51 – Esforço de controle para o controlador <i>fuzzy</i> na planta didática PD3 para uma altura de 0,5 metros . . . . .	78
Figura 52 – Esforço de controle para o controlador <i>fuzzy</i> na planta didática PD3 para uma altura de 0,7 metros . . . . .	79
Figura 53 – Aplicação de uma perturbação para o controlador <i>fuzzy</i> na planta didática PD3 . . . . .	79
Figura 54 – Alterações no <i>Matlab/Simulink</i> para aplicação da perturbação no controlador <i>fuzzy</i> na planta didática PD3 . . . . .	80
Figura 55 – Comparação dos controladores PID e <i>fuzzy</i> aplicados na planta didática PD3 para a altura de 0,5 metros . . . . .	81
Figura 56 – Comparação dos controladores PID e <i>fuzzy</i> aplicados na planta didática PD3 para a altura de 0,7 metros . . . . .	81
Figura 57 – Comparação dos controladores PID e <i>fuzzy</i> aplicados na planta didática PD3 com perturbação . . . . .	82
Figura 58 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma altura de 0,5 metros para o controlador PID . . . . .	82
Figura 59 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma altura de 0,7 metros para o controlador PID . . . . .	83
Figura 60 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma perturbação para o controlador PID . . . . .	83



Figura 61 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma altura de 0,5 metros para o controlador <i>fuzzy</i> . . . . .	84
Figura 62 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma altura de 0,7 metros para o controlador <i>fuzzy</i> . . . . .	84
Figura 63 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma perturbação para o controlador <i>fuzzy</i> . . . . .	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas do DF51 . . . . .	46
Tabela 2 – Relação experimental da abertura, deslocamento e pressão da válvula	53
Tabela 3 – Relação de pressão do transmissor de pressão . . . . .	54
Tabela 4 – Requisitos de projeto para o controlador PID . . . . .	57
Tabela 5 – Valores encontrados para as variáveis . . . . .	60
Tabela 6 – Funções pertinência das variáveis de entrada e saída . . . . .	61
Tabela 7 – Domínio para cada variável . . . . .	62
Tabela 8 – Regras utilizadas para o controlador <i>fuzzy</i> . . . . .	63
Tabela 9 – Resultados para o controlador PID simulado para as alturas de 0,5 e 0,7 metros . . . . .	68
Tabela 10 – Resultados para o controlador <i>fuzzy</i> simulado para as alturas de 0,5 e a,7 metros . . . . .	71
Tabela 11 – Resultados para o controlador PID na planta didática PD3 para as alturas de 0,5 e 0,7 metros . . . . .	76
Tabela 12 – Resultados para o controlador <i>fuzzy</i> na planta didática PD3 para as alturas de 0,5 e 0,7 metros . . . . .	80

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### SIGLAS

CLP	Controlador Lógico Programável
COM	<i>Component Object Model</i> - Modelo de Objeto Componente
CPU	<i>Central Processing Unit</i> - Unidade central de processamento
DLL	<i>Dynamic Link Libraries</i> - Bibliotecas de links dinâmicos
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> - Comissão Eletrotécnica Internacional
IP	<i>Internet Protocol</i> - Protocolo de internet
ISA	<i>International Society of Automation</i> - Sociedade Internacional de Automação
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> - Organização Internacional para Padronização
LAN	<i>Local Area Network</i> - Rede de Área Local
LAS	<i>Link Active Scheduler</i> - Programador ativo de link
LSUP	Laboratório de Sistemas Supervisórios
OLE	<i>Object Linking and Embedding</i> - Vinculação e incorporação de objetos
OPC	OLE para controle de processo
OSI	<i>Open System Interconnection</i> - Interconexão de Sistema Aberto
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

### ACRÔNIMOS

DF302	<i>Fieldbus Universal Bridge</i>
DF51	Módulo controlador da plataforma DFI302
FY302	Posicionador de válvulas Smar
LD302	Transmissor de pressão Smar
LSUP17-PC	Computador utilizado no LSUP
Studio302	Software para configuração e operação dos instrumentos
System302	Sistema de automação de controle distribuído
Toolbox	Coleção das funções que estendem a potencialidade do <i>Matlab/Simulink</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_1$	variável para definição dos ganhos PID	
$a$	ponto da função pertinência	
$A_t$	área de seção transversal do tanque	[m <sup>2</sup> ]
$\alpha$	variável para definição dos ganhos PID	
$b_1$	variável para definição dos ganhos PID	
$b$	ponto da função pertinência	
$\beta$	variável para definição dos ganhos PID	
$c_1$	variável para definição dos ganhos PID	
$C$	capacitância do reservatório	
$c$	ponto da função pertinência	
$CH$	capacitância medida entre a placa fixa do lado $P1$ e o diafragma sensor	
$CL$	capacitância medida entre a placa fixa do lado $P2$ e o diafragma sensor	
$d_1$	variável para definição dos ganhos PID	
$d$	distância entre as placas fixas de $CH$ e $CL$	[mm]
$d$	ponto da função pertinência	
$\delta$	valor de RC	
$\Delta d$	deflexão sofrida pelo diafragma sensor	
$\Delta P$	pressão diferencial	[bar]
$Kd$	constante derivativa	
$g_{assoc}$	ganho associado	
$G_c$	função transferência do controlador PID	
$G_{cd}$	função transferência para o controlador derivativo	
$G_{ci}$	função de transferência para o controlador integral	
$g$	aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$H$	valor de regime permanente do nível de líquido	[m]
$h_{max}$	altura máxima do tanque	[m]
$h_{min}$	altura mínima do tanque	[m]
$h(t)$	altura do tanque em regime permanente	[m]
$Ie(t)$	corrente de entrada do sensor	[mA]
$I_{max}$	corrente máxima	[mA]
$Ki$	constante integral	
$IP$	relação de corrente e pressão	[mA/bar]
$Is(t)$	corrente de saída do sensor	[mA]
$K_0$	valor de R	
$K$	coeficiente	[m <sup>2</sup> /s]
$L(s)$	sistema da planta e controlador	
$m_K$	amplitude do controlador	
$M$	número total de elementos	
$\mu_{o,k}$	pontos que ocorrem os máximos das funções de pertinência de saída	
$m_P$	amplitude da planta	
$\mu_{out}$	união de todas as contribuições de regras	
$NB$	função pertinência negativo baixo	
$NM$	função pertinência negativo médio	
$NS$	função pertinência negativo alto	
$\omega_d$	valor do polo desejado	

$out_d$	saída do controlador derivativo	
$out_i$	saída do controlador integral	
$P1$	pressões aplicadas nas câmaras H e L	[bar]
$P2$	pressões aplicadas nas câmaras H e L	[bar]
$PB$	função pertinência positivo baixo	
$\pi$	pi (constante circular)	[rad]
$PM$	função pertinência positivo médio	
$p_{max}$	pressão máxima	[bar]
$Kp$	constante proporcional	
$P(s)$	sistema da planta	
$PS$	função pertinência positivo alto	
$PSS$	valor de sobre-sinal	[%]
$p(t)$	pressão	[bar]
$qi$	vazão de entrada do tanque	
$qo$	vazão de saída do tanque	
$Q$	valor de regime permanente da vazão de liquido	[m <sup>3</sup> /s]
$\rho$	massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$R_l$	A resistência em regime turbulento	
$R$	variação na diferença de nível necessária para provocar uma variação unitária na vazão	
$r(t)$	resistência elétrica	
$s_d$	polo que corresponde a uma raiz do denominador da função transferência do sistema de malha fechada	
$\sigma_d$	valor do polo desejado	
$\theta_K$	fase do controlador	
$\theta_P$	fase da planta	
$t$	tempo	[s]
$U_{coa}$	método centro-da-área	
$U_{com}$	média ponderada dos máximos	
$U_i$	posição do centróide da função de pertinência individual	
$U_m$	m-ésimo elemento presente no universo de discurso	
$U_{mom}$	média de todos os máximos	
$u(t)$	posição da válvula de entrada	[mm]
$\varepsilon$	constante dielétrica	
$v(t)$	vazão	[m <sup>3</sup> /h]
$Z$	função pertinência zero	
$0$	valor inicial	
$\zeta$	coeficiente de amortecimento	

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	16
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	17
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 Objetivo geral	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 JUSTIFICATIVA	18
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>21</b>
2.1 DESENVOLVIMENTO DE PESQUISAS EM SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDO	21
2.2 CONTROLE PID	22
2.2.1 Ganho Proporcional	22
2.2.2 Ganho Integral	23
2.2.3 Ganho Derivativo	23
2.3 FORMA CONSTRUTIVA DO CONTROLADOR PID	24
2.4 CONTROLE <i>fuzzy</i>	25
2.4.1 Fuzzificação	25
2.4.1.1 Funções de pertinência triangulares	26
2.4.1.2 Funções de pertinência gaussianas	26
2.4.1.3 Funções de pertinência trapezoidais	27
2.4.2 Inferência	28
2.4.3 Defuzzificação	28
2.4.3.1 Defuzzificação por centro de área	29
2.4.3.2 Defuzzificação por centro do máximo	29
2.4.3.3 Defuzzificação por média do máximo	29
2.5 FORMA CONSTRUTIVA DO CONTROLADOR <i>fuzzy</i>	30
2.6 SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDO	31
2.7 PLANTA DIDÁTICA PD3 SMAR	34
2.7.1 Studio302	35
2.7.2 Foundation Fieldbus	36
2.7.3 LD302 - Transmissor de pressão	37
2.7.4 FY302 - Posicionador de válvulas	40
2.7.5 OPC	42
2.7.5.1 OLE	44
2.7.6 DFI302 - <i>Fieldbus Universal Bridge</i>	45
2.7.6.1 Controlador DF51	46
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>47</b>
3.1 COMUNICAÇÃO DA PLANTA DIDÁTICA PD3 SMAR COM O <i>Matlab/Simulink</i>	47
3.2 MODELO INSTRUMENTADO DO SISTEMA DE NÍVEL DO TANQUE	50
3.3 FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA DO SISTEMA DE NÍVEL	55
3.4 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR PID	57
3.5 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	61
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>65</b>
4.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	65
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	73

4.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO E DA APLICAÇÃO NA PLANTA DIDÁTICA PD3 . . . . .	80
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS . . . . .</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>ANEXO A - COMANDOS UTILIZADOS NO MATLAB PARA ENCONTRAR OS VALORES DE <math>K_p</math>, <math>K_i</math> E <math>K_d</math> . . . . .</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Para entender o que é um sistema de controle precisam ser definidos dois conceitos importantes, o significado de controle e sistema. Controle significa dominar, administrar algo. Sistema pode ser visto como uma caixa preta com uma entrada e uma saída, já que não se sabe em que consiste o interior dessa caixa, mas somente a relação entre a saída e a entrada. Um sistema pode ser chamado de sistema de controle quando sua saída é controlada para assumir um valor particular ou seguir uma determinada entrada (BOLTON, 1995).

A área de controle, automação e otimização tem sido de grande importância para a indústria, contribuindo com diversas tecnologias utilizadas na maioria dos processos industriais. O uso destas tecnologias está associado a alta competitividade do mercado que exige uma linha de produção rápida, com bons resultados e sem desperdícios de recursos (ÅSTRÖM K. J.; HÄGGLUND, 2001).

O controle de nível de líquido é utilizado em grande escala no setor industrial, residencial e agropecuário. Em ambientes industriais, muitos processos necessitam que os níveis de líquidos sejam mantidos nos patamares desejados para o sucesso da produção. Além disso, este processo é relevante também para o arrefecimento de equipamentos e máquinas, e para isso um controle automático é muito útil, permitindo a renovação por um líquido em menor temperatura, mantendo o resfriamento desejado (SCHMIDT, 2008). Para observar a importância do sistema o nível de água é um dos principais parâmetros para o funcionamento correto de uma caldeira, o nível incorreto de água dentro de uma caldeira cria condições de ruptura das paredes metálicas do tanque, comprometendo a segurança da unidade. O controle de nível de líquido afeta a lucratividade e a velocidade de produção em uma indústria, sabendo da importância que o controle de nível de líquido tem, o desenvolvimento de controladores para um sistema de nível de líquido pode ajudar no aumento do lucro e na velocidade de produção dentro de uma indústria. Assim, o controle de nível de líquido é muito importante para o controle do processo industrial (ÅSTRÖM K. J.; HÄGGLUND, 2001).

As técnicas convencionais de controle, como o controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID), são largamente usadas na indústria visto que são simples, robustos e familiares para o operador de campo. As tecnologias desenvolvidas produ-



zem vários benefícios como: aumento do nível de qualidade dos produtos, minimização da necessidade de reprocessamento de produtos, aumento da confiabilidade dos sistemas e liberação do operador para outras atividades (FONSECA, 2012).

Outra técnica de controle que tem sido amplamente estudada, mas ainda não muito aplicada no ambiente industrial, é o controle *fuzzy* que procura incorporar a forma humana de pensar em sistemas de controle.

O controlador PID é uma técnica que necessita do modelo matemático da planta a ser controlada, enquanto o controlador *fuzzy* não necessita de um modelo matemático. Sistemas de controle *fuzzy* consistem basicamente em regras que o sistema de controle necessita para funcionar adequadamente. Caso o modelo matemático for muito complexo o controle PID torna-se inviável de ser implementado, e o controlador *fuzzy* é o mais indicado.

O controle PID é utilizado em sistemas dinâmicos, onde é responsável por manter o valor de saída igual ao valor ajustado pelo usuário. Ele pode ser aplicado em sistemas de controle de velocidade, temperatura, nível, entre outros. O controle é realizado através dos parâmetros proporcional, integral e derivativo. (GUIMARÃES F. M; NASCIMENTO, 2013). A técnica de controle *fuzzy* é diferente do controle PID, o controle *fuzzy* tem como base a utilização de regras nebulosas (regras *fuzzy* e variáveis linguísticas) e confere ao sistema de controle várias vantagens, incluindo: simplificação do modelo do processo, melhor tratamento das imprecisões inerentes aos sensores utilizados, facilidade na especificação das regras de controle, satisfação de múltiplos objetivos de controle, e facilidade de incorporação do conhecimento de especialistas humanos (FERNANDES F. G; LOPES, 2005).

## 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A delimitação do presente tema de estudo trata-se da análise comparativa entre as técnicas de controle PID e *fuzzy* aplicadas a planta didática PD3 de nível de líquido da Smar. A análise comparativa será realizada por meio de simulação computacional e implementação experimental das técnicas de controle abordadas.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISAS

Atualmente diferentes técnicas de controle são propostas na literatura, porém na indústria o controlador mais utilizado ainda é o controlador PID, fato decorrente da facilidade de implementação e simplicidade deste. Para o projeto do controlador, devem ser analisadas as vantagens que cada técnica possui afim de economizar tempo e custos na aplicação do controlador.

Para o controle de nível do tanque abordado neste trabalho serão usadas as técnicas de controle PID e *fuzzy*. Desta forma, o questionamento a ser feito é: aplicando as duas técnicas de controle, PID e *fuzzy*, qual técnica de controle proverá maior facilidade para aplicação e quais os resultados para uma aplicação na planta didática PD3?

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo a comparação entre o controlador PID e o controlador fuzzy para uma planta didática de nível com instrumentação industrial.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos serão realizados:

- Desenvolver a modelagem matemática de um tanque de nível de líquido;
- Estudar o controlador PID;
- Estudar um método analítico para obtenção dos ganhos proporcional, integral e derivativo para o controlador PID;
- Desenvolver o controlador PID de um tanque de nível;
- Simular, por meio do *Matlab/Simulink*, o controlador PID aplicado a um tanque de nível;
- Estudar o controlador *fuzzy*;

- Desenvolver o controlador *fuzzy* de um tanque de nível;
- Simular, por meio do Matlab/Simulink, o controlador *fuzzy* aplicado a um tanque de nível;
- Observar os resultados obtidos para o controlador PID e o controlador *fuzzy* nas simulações;
- Implementar as duas técnicas de controle, PID e *fuzzy*, em uma planta didática de nível através da rede *Fieldbus*;
- Comparar as duas técnicas de controle (simulações e prática) aplicadas em uma planta de nível de líquido.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Plantas didáticas são plataformas tecnológicas e constituem alternativas práticas no ensino de controle de processos. Desta forma, a partir da utilização destas é possível a criação de ambientes e situações controladas, permitindo, em conjunto com a fundamentação teórica apresentada em sala de aula, o desenvolvimento de soluções para problemas reais existentes no setor industrial.

Neste contexto, este trabalho apresenta experimentos em uma planta didática de controle de nível da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Ponta Grossa localizada no Laboratório de Sistemas Supervisórios (LSUP), abordando a modelagem matemática de seus componentes, a simulação, identificação e controle do sistema, promovendo o encontro entre a teoria e a prática de controle de processos.

#### 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico utilizado para elaboração do trabalho, este capítulo contém a utilização do sistema de nível de líquido no meio acadêmico e industrial, os controladores PID e *fuzzy*, o sistema de nível de líquido com um tanque e a planta didática com os instrumentos e dispositivos utilizados para comunicação da planta didática PD3 com o *Matlab/Simulink*.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento da comunicação da planta didática PD3 com o *Matlab/Simulink*, o modelo instrumentado da planta, como foi definida a função transferência do sistema de nível de líquido através do método experimental e o desenvolvimento dos controladores PID e *fuzzy*, como foram feitos os cálculos dos parâmetros PID e como foram feitas as escolhas das regras *fuzzy* para chegar em resultados satisfatórios.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos controladores PID e *fuzzy* em simulação e aplicados na planta didática PD3, foram aplicadas duas alturas diferentes, 0,5 e 0,7 metros, e uma perturbação, além de mostrar a construção dos controladores no *Matlab/Simulink* e os esforços de controle das técnicas PID e *fuzzy*.

O Capítulo 5 mostra as conclusões e perspectivas em relação a aplicação dos controladores PID e *fuzzy* para o sistema de nível de líquido.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 DESENVOLVIMENTO DE PESQUISAS EM SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDO

Diversas pesquisas e trabalhos de sistemas de nível de líquido são encontrados no meio acadêmico, o sistema pode ter um tanque, dois tanques ou diversos tanques de nível, e os controladores são variados, como: PID, lógico, robusto, *fuzzy*, adaptativo e assim por diante. A quantidade de tanques em um sistema de nível de líquido é diretamente proporcional a complexidade do projeto do controlador para este sistema.

Em ambientes industriais, muitos processos necessitam que os níveis de líquidos sejam mantidos nos patamares desejados para o sucesso da produção. Pode ser importante também para o arrefecimento de equipamentos e máquinas, e para isso um controle automático é muito útil, permitindo a renovação por um líquido em menor temperatura, mantendo o resfriamento desejado (SCHMIDT, 2008).

As pesquisas que desenvolvem controladores para sistemas de nível de líquido vêm aumentando com o passar do tempo devido a demanda industrial que utilizam em larga escala sistemas de nível de líquido.

Sistemas de nível de líquidos têm destaque em diversos ramos da atividade industrial, dentre eles o da petroquímica, nuclear e de celulose. Neste contexto, um dos controles com maior importância nas unidades industriais é o dos níveis. Estes controles são responsáveis pelos “balanços de massa” das plantas. Isto é, para manter um nível de um tanque ou vaso constante é necessário que a vazão mássica de entrada seja igual à de saída.(RAMOS A. P; WENSE, 2008).

A busca em aumentar a segurança nas operações, melhorar o processo e o produto final fazem com que os estudos em controladores de sistemas de nível sejam de grande importância no meio acadêmico e industrial.

Os estudos em sistemas de nível de líquido são feitos em plantas didáticas e em sistemas projetados com as características desejadas, geralmente são utilizados os controladores mais conhecidos nas indústrias e no meio acadêmico, como o controlador PID, as pesquisas envolvendo o controlador *fuzzy* em sistemas de nível de líquido vem aumentando devido as vantagens em comparação com outros controladores.

Pesquisas encontradas no meio acadêmico mostram que o controlador *fuzzy* apresenta resultados satisfatórios em sistemas de nível de líquido. A técnica de inteligência artificial mostra-se bastante útil para controle de plantas comprovadamente não-lineares (FILHO F. M. L; GOSMANN, 2002).

O controlador *fuzzy* apresenta maior simplicidade de utilização e implementação se comparado com as técnicas de controle adaptativo e preditivo. A seleção das regras e das funções de pertinência são essenciais para melhorar a performance do controlador (LUIZ C. C; SILVA, 1997).

No meio acadêmico os trabalhos com sistemas de nível de líquido vem alcançando resultados interessantes para diversos controladores, observando que cada controlador tem suas vantagens e desvantagens na aplicação em processos industriais.

## 2.2 CONTROLE PID

O controle PID utiliza os ganhos proporcional, integral e derivativo para agir em diversos sistemas e cada um destes ganhos tem uma função específica.

### 2.2.1 Ganho Proporcional

O controle proporcional faz com que a saída do controlador seja diretamente proporcional a sua entrada. A saída deste controlador depende da amplitude do erro no instante de tempo (BOLTON, 1995). A função transferência para o controlador pode ser observada na equação (1).

$$G_{cp}(s) = Kp \quad (1)$$

A constante  $Kp$  é o ganho proporcional, este ganho tende a aparecer para uma determinada faixa de erros, chamada banda proporcional. No controlador proporcional como a saída é proporcional à entrada, se a entrada do controlador é um erro em rampa, então a saída também é uma rampa, da mesma forma que a entrada (BOLTON, 1995).

### 2.2.2 Ganho Integral

O controle integral faz com que a saída do controlador seja proporcional à integral do sinal de erro com o tempo. A equação (2) mostra a saída do controlador integral.

$$out_i = Ki \int_0^t e dt \quad (2)$$

$Ki$  é o ganho integral. A integral no intervalo entre os valores  $t$  e 0 é a área sob a curva do erro entre os valores  $t$  e 0. Quando aparece o sinal de erro, a área sob a curva aumenta proporcionalmente a saída do controlador (BOLTON, 1995). Aplicando a transformada de Laplace na equação (2) tem uma função de transferência para o controlador integral que pode ser observada na equação (3).

$$G_{ci}(s) = \frac{Ki}{s} \quad (3)$$

### 2.2.3 Ganho Derivativo

O controle derivativo faz com que a saída do controlador seja proporcional à taxa de variação do erro com o tempo. A equação (4) mostra a saída do controlador derivativo.

$$out_d = Kd \frac{de}{dt} \quad (4)$$

A constante  $Kd$  é chamada de ganho derivativo. Com o controle derivativo, assim que o sinal de erro apareça, a saída do controlador pode ser grande, já que a saída é proporcional a taxa de variação do sinal de erro e não do erro. Esta ação fornece uma grande ação corretiva antes que um grande sinal de erro ocorra. O controle derivativo não tem ação para sinais de erro constantes ou de variação lenta, em consequência não pode ser usado sozinho, mas combinado com outras formas de controle, como o PID ou PD (BOLTON, 1995). Utilizando a transformada de Laplace na equação (4) para o controle derivativo obtem-se função transferência da equação (5).

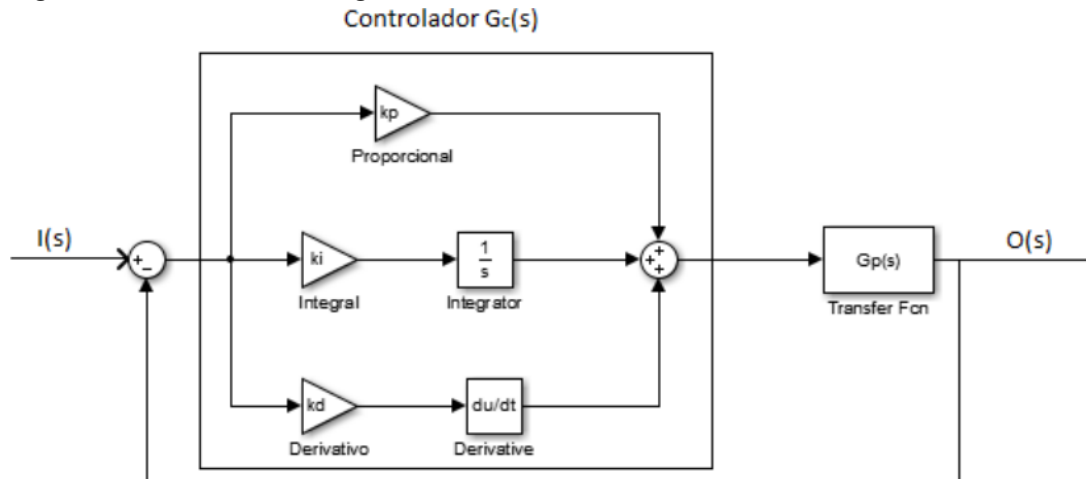
$$G_{cd}(s) = Kds \quad (5)$$



## 2.3 FORMA CONSTRUTIVA DO CONTROLADOR PID

A Figura 1 mostra o controlador PID feito no *Matlab/Simulink* para ser aplicado a um sistema qualquer.

**Figura 1 – Controlador PID genérico**



Fonte: Autoria própria

A equação (6) representa a função transferência do controlador PID.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (6)$$

O controlador PID tem uma aplicabilidade geral na maioria dos sistemas de controle, o controle PID pode ser encontrado no setor industrial, eletrônica de sistema, pilotos automáticos de aviões e mísseis, navios e robôs industriais, esta aplicabilidade mostra a importância do controle PID para vários processos de diferentes áreas (ABDALLAH, 2005).

Na prática os controladores PID são sintonizados por tentativa e erro, isso ocorre muitas vezes, mas não é o modo correto de se usar um controlador PID, isto faz com que o ajuste do sistema a ser controlado seja difícil ou ineficiente. Os métodos convencionais de sintonia de controladores PID são suficientes em vários sistemas de controle industrial. O crescimento da concorrência mundial fez com que os sistemas se tornassem mais complexos para serem controlados e com os requisitos de desempenho mais rigorosos, onde métodos de sintonia mais eficientes são necessários, com isso fica mais difícil o procedimento para projetos de sistema de controle (ABDALLAH, 2005).

Ganhos fixos em sistemas de controle vêm se tornando inadequados, isso faz com que o desenvolvimento do controle adaptativo se torne cada vez mais comum, este método de controle é capaz de resolver problemas de incertezas e variação paramétrica, incerteza de modelagem, perturbações. Um controle adaptativo pode ser composto pelas técnicas de controle PID e *fuzzy* (ABDALLAH, 2005).

## 2.4 CONTROLE FUZZY

O controlador *fuzzy* vem sendo muito utilizado nos últimos anos por possuir uma implementação fácil e rápida. No mercado esta tecnologia de controladores proporciona maior confiabilidade aos sistemas.

O controlador *fuzzy* trata de uma relação entre entradas e saídas de forma linguística, o que faz com que o mesmo seja capaz de proporcionar um desempenho eficaz e satisfatório aos sistemas, proporcionando um controle que não requer cálculos ou equações complexas como aqueles utilizados no controle PID (SOUZA A. L.; FRANCISCO, 2010).

O controlador *fuzzy* é derivado de uma técnica de inteligência artificial que é utilizada em aplicações em controle de processos, o controlador busca simular o raciocínio lógico humano para resolver problemas. Para aplicar o controlador *fuzzy* é necessário ter um conhecimento amplo do sistema para modelar o funcionamento do sistema de controle, com a utilização de regras, relacionando as variáveis de entrada e saída do sistema.

Em comparação com outras técnicas de controle o controlador *fuzzy* é simples de ser projetado. O controlador PID necessita de cálculos para poder encontrar as constantes proporcional, integral e derivativa, diferente do controlador *fuzzy* que é projetado a partir do conhecimento do sistema utilizando regras para atingir uma resposta satisfatória ao sistema de controle, isso faz com que o controlador *fuzzy* não necessite de cálculos para ser projetado.

### 2.4.1 Fuzzificação

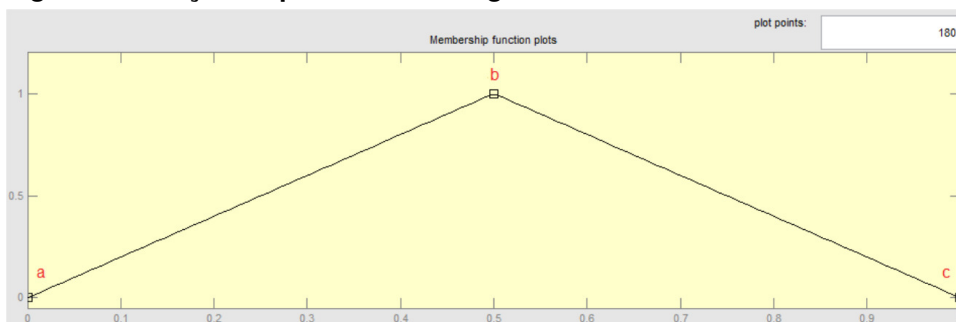
Para Shaw e Simões (1999), "fuzzificação" é uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes do sinal de entrada, reduzindo grandemente

o número de valores a serem processados. Nesta etapa são consideradas todas as informações referentes à imprecisão e incerteza, então os especialistas na área de controladores *fuzzy* devem ser consultados para saber os valores relacionados ao grau de pertinência para as variáveis que estão sendo estudadas, pois isso faz com que os resultados sejam mais precisos.

#### 2.4.1.1 Funções de pertinência triangulares

As funções de pertinência triangulares são caracterizadas por um triângulo  $(a, b, c)$ , onde  $a$  e  $c$  determinam o intervalo no qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e  $b$  é o ponto onde a função de pertinência atinge o valor máximo (AMENDOLA M; SOUZA, 2005). A Figura 2 mostra uma função de pertinência triangular onde podem ser observados  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

**Figura 2 – Função de pertinência triangular**



Fonte: Autoria própria

A função acionada para a função de pertinência triangular é definida pela equação (7).

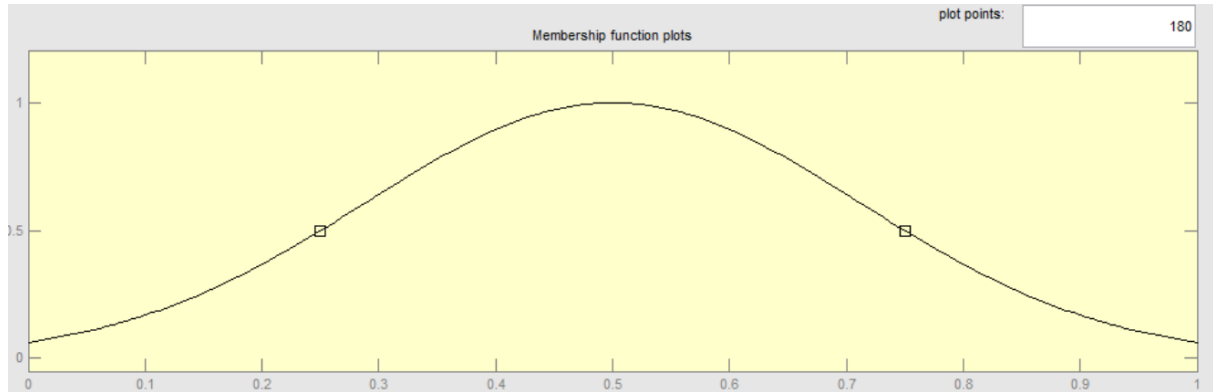
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x \leq c \\ 0 & \text{se } x > c \end{cases} \quad (7)$$

#### 2.4.1.2 Funções de pertinência gaussianas

As funções de pertinência gaussianas são caracterizadas pela média ( $m$ ) e desvio padrão ( $s$ ) da curva. A função de pertinência gaussiana decai suavemente e

tem valores diferentes de zero para toda variável analisada (AMENDOLA M; SOUZA, 2005). A Figura 3 mostra uma função de pertinência gaussiana. Podem ser observados no eixo vertical os valores da função de pertinência e no eixo horizontal os valores da variável desejada.

**Figura 3 – Função de pertinência gaussiana**



**Fonte: Autoria própria**

A função acionada para a função de pertinência gaussiana é definida pela equação (8).

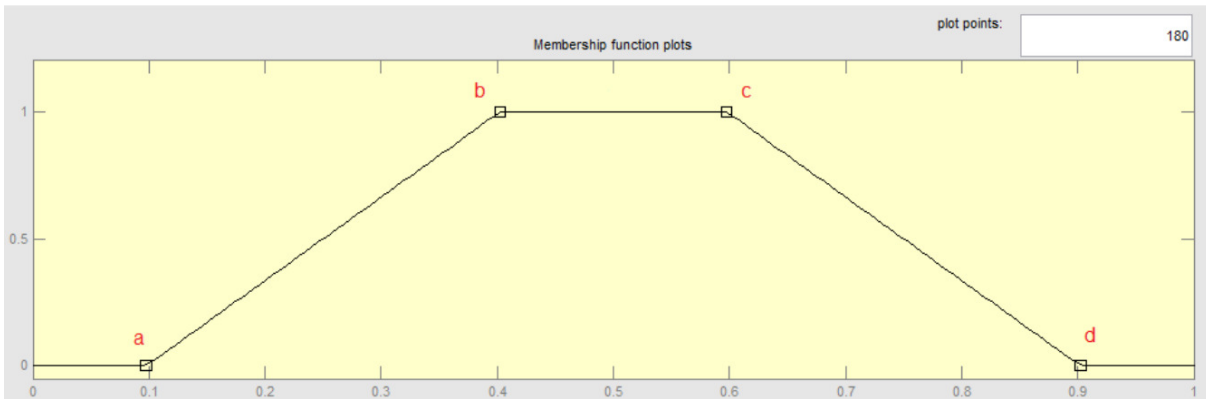
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \text{ esta fora do dominio} \\ \frac{e^{-(x-\nu)^2}}{2\sigma^2} & \text{se } x \text{ esta dentro do dominio} \end{cases} \quad (8)$$

#### 2.4.1.3 Funções de pertinência trapezoidais

As funções de pertinência trapezoidais são caracterizadas por um conjunto composto de quatro valores ( $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ ), onde  $a$  e  $d$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero,  $b$  e  $c$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência é máxima e igual a 1 (AMENDOLA M; SOUZA, 2005). A Figura 4 mostra uma função de pertinência trapezoidal onde podem ser observados os pontos  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ . Pode ser observado no eixo vertical os valores da função de pertinência e no eixo horizontal os valores da variável que se quer estudar.

A função acionada para a função de pertinência trapezoidal é definida pela

**Figura 4 – Função de pertinência trapezoidal**



Fonte: Autoria própria

equação (9).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ 1 & \text{se } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases} \quad (9)$$

#### 2.4.2 Inferência

Na inferência ocorre a validação das regras estabelecidas para o controle e une, através de um cálculo arbitral, média ou máxima, os valores correspondentes aos resultados da regra aplicada. A regra é um formato de decisão (SHAW, 2010).

As regras contém conectivos lógicos para os antecedentes e os consequentes. (SILVA, 2014).

#### 2.4.3 Defuzzificação

Na "defuzzificação" é realizada a conversão dos resultados das aplicações das regras em valor de saída para um dispositivo de controle específico. Este valor é calculado através de técnicas matemáticas para se determinar o melhor valor a ser utilizado.

### 2.4.3.1 Defuzzificação por centro de área

O método centro-de-área ou método do centro-de-gravidade faz o cálculo do centróide da área composta que representa o termo de saída nebuloso  $\mu_{out}$  que é composto pela união de todas as contribuições de regras (SILVA, 2014). A equação (10) mostra o cálculo do método centro-da-área.

$$u_{coa} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_{out}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{out}(u_i)} \quad (10)$$

Para Silva (2004), sendo  $\mu_{out}(u_i)$  a área de uma função de pertinência modificada pelo resultado da inferência nebuloso,  $u_i$  posição do centróide da função de pertinência individual.

### 2.4.3.2 Defuzzificação por centro do máximo

A "defuzzificação" por centro do máximo é bem definida por Silva.

Neste método, os picos das funções de pertinência representados no universo de discurso, são usados ignorando-se as áreas das funções de pertinência, os valores diferentes de zero do vetor de possibilidade de saída são posicionados nos picos correspondentes, o valor de saída é determinado achando o ponto de apoio onde os pesos ficam equilibrados, assim, as áreas das funções de pertinência não são utilizadas, apenas os máximos (SILVA, 2014).

A equação (11) mostra a média ponderada dos máximos.

$$u_{com} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \sum_{k=1}^n \mu_{o,k}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{out}(u_i)} \quad (11)$$

O  $\mu_{o,k}(u_i)$  mostra os pontos que ocorrem os máximos das funções de pertinência de saída. Este método também pode ser chamado de "defuzzificação" pelas alturas. No universo de discurso  $u_i$  os valores são amostrados em  $N$  pontos para todas as  $n$  regras são somados e  $\mu_{o,k}(u_i)$  é considerado o valor da pertinência para um dado valor de controle  $u_i$  (SILVA, 2014).

### 2.4.3.3 Defuzzificação por média do máximo

Para Silva (2004), a "defuzzificação" por média-do-máximo (m-o-m) utiliza a saída cujo valor tenha o maior valor de pertinência  $\mu_{out}(u_i)$ , mas em casos em que a

função de pertinência tenha mais de um máximo, esta idéia não serve. A equação (12) mostra a média de todos os máximos.

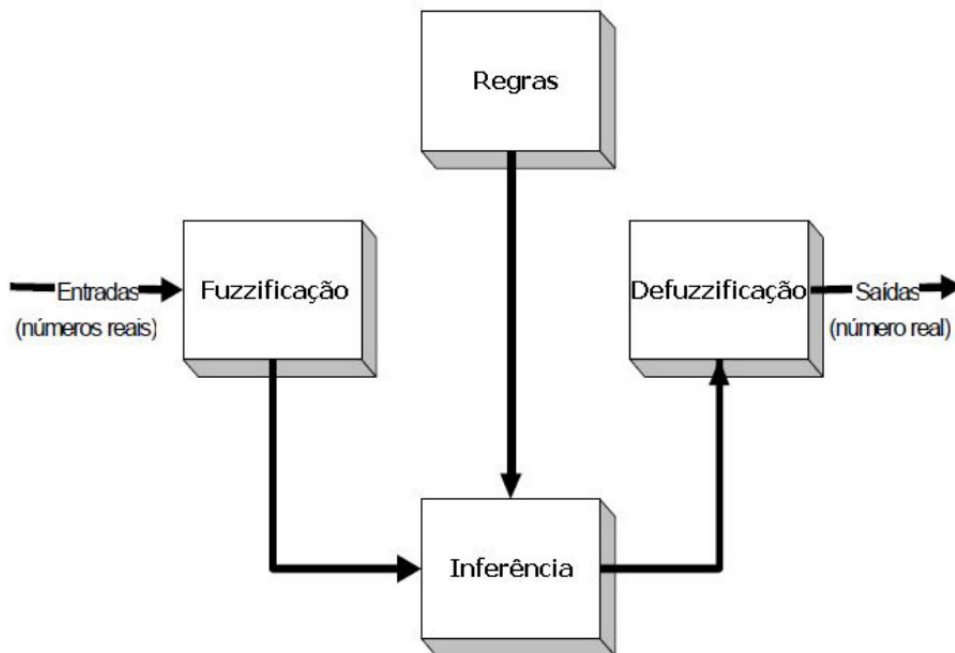
$$u_{mom} = \sum_{m=1}^M \frac{u_m}{M} \quad (12)$$

O  $u_m$  é o m-ésimo elemento presente no universo de discurso, isso faz com que a função  $\mu_{out}(u_i)$  tenha um máximo e  $M$  é o número total desses elementos (SILVA, 2014).

## 2.5 FORMA CONSTRUTIVA DO CONTROLADOR FUZZY

A Figura 5 mostra o funcionamento do sistema *fuzzy*.

**Figura 5 – Sistema fuzzy**



Fonte: (SOUZA A. L; FRANCISCO, 2010)

Os controladores *fuzzy* estão sendo utilizados nas indústrias e processos, chamando a atenção de empresas e pesquisadores por suas características. A supervisão e controle de processo remotamente, através de uma rede industrial, possibilitam a intervenção imediata, não sendo necessário refazer um determinado *hardware* ou modelar novamente um processo específico, economizando tempo e retrabalho, resultando em uma melhor adequação do sistema em uma planta industrial. A utilização de sistemas baseados em OPC (OLE para controle de processo (OPC)) consegue trazer uma versatilidade na disponibilização e manipulação de variáveis do processo

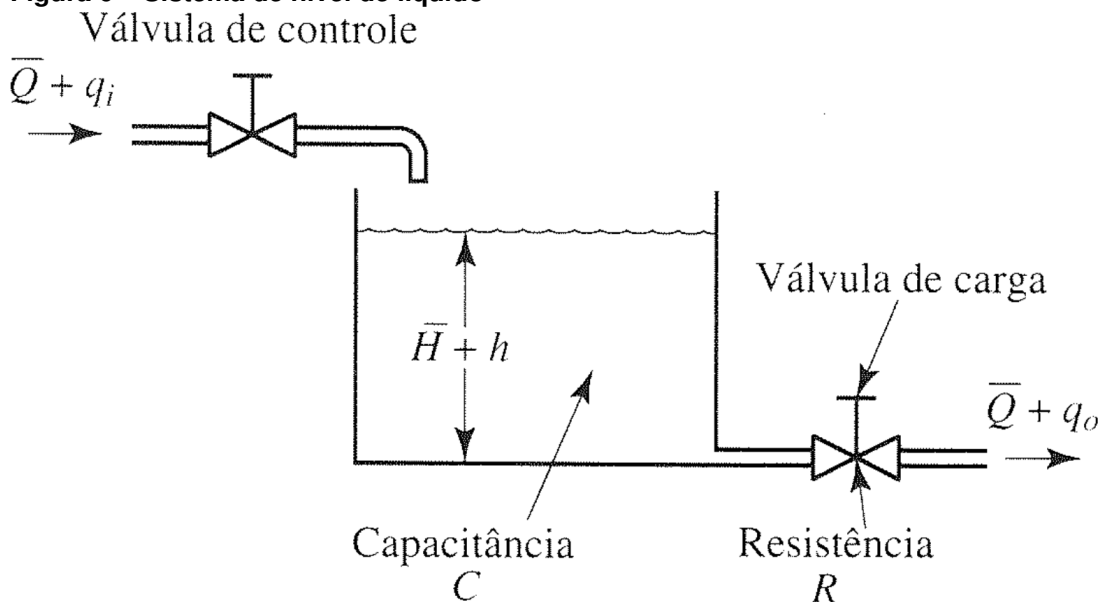
controlado, permitindo ao projetista não se preocupar com a validade dos dados em uma rede industrial (BITTENCOURT J. R; OSÓRIO, 2002).

## 2.6 SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDO

Sistemas de tanques de líquido desempenham importantes funções em sistemas da indústria como: processo de alimentos, tratamento de efluentes, indústria farmacêutica e indústria petroquímica (GALDINO, 2011).

Sistemas que envolvem fluxo de fluídos devem ser analisados os regimes de escoamento laminar e turbulento, observando o número de Reynolds. Se o número de Reynolds for maior do que aproximadamente 3000-4000, então o fluxo é turbulento. O fluxo é laminar se o número de Reynolds for menor do que aproximadamente 2000. No caso laminar, o fluxo se dá segundo linhas de escoamento, sem turbulência. Sistemas envolvendo escoamento turbulento, na maioria das vezes, têm de ser representados por equações diferenciais não-lineares, enquanto sistemas envolvendo escoamento laminar podem ser representados por equações diferenciais lineares (OGATA, 2011).

**Figura 6 – Sistema de nível de líquido**



Fonte: (OGATA, 2011)

Considerando o fluxo em uma pequena tubulação saindo de um reservatório, a resistência  $R$  é a variação na diferença de nível necessária para provocar uma



variação unitária na vazão como pode ser observado na equação (13).

$$R = \frac{\text{Variação na diferença de nível (m)}}{\text{Variação na vazão (m}^3/\text{s)}} \quad (13)$$

Como pode ser observado na Figura 6 o líquido flui através da válvula de carga. Caso o escoamento seja considerado laminar, a relação entre o valor de regime permanente da vazão e o valor de regime permanente da altura de líquido no reservatório, em relação a restrição é dada pela equação (14).

$$Q = KH \quad (14)$$

onde:

- $Q$ =valor de regime permanente da vazão de líquido ( $m^3/s$ );
- $K$ =coeficiente ( $m^2/s$ );
- $H$ =valor de regime permanente do nível de líquido ( $m$ ).

Para o escoamento laminar a resistência é obtida a partir da equação (15).

$$R_l = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q} \quad (15)$$

No escoamento laminar a resistência é constante e é semelhante a resistência elétrica.

Para o escoamento turbulento, a vazão em estado estacionário é dado pela equação (16).

$$Q = K\sqrt{H} \quad (16)$$

onde:

- $Q$ =valor de regime permanente da vazão de líquido ( $m^3/s$ );
- $K$ =coeficiente ( $m^{2,5}/s$ );
- $H$ =valor de regime permanente do nível de líquido ( $m$ ).

Para o escoamento turbulento a resistência  $R_l$  é obtida pela equação (17).

$$R_l = \frac{dH}{dQ} = \frac{2H}{Q} \quad (17)$$

A resistência  $R_l$  em regime turbulento depende da vazão e da altura do nível de líquido. Caso as variações na altura do nível e na vazão forem pequenas o valor da resistência pode ser considerado constante. Para o escoamento turbulento a relação entre  $Q$  e  $H$  é dada pela equação (18).

$$Q = \frac{2H}{R_l} \quad (18)$$

Para essa linearização ser válida as variações na altura do nível e na vazão em relação aos seus respectivos valores em estado estacionário devem ser pequenas.

Para Ogata (2000), a capacitância  $C$  de um reservatório é definida como sendo a variação na quantidade de líquido armazenado necessária para causar uma variação unitária no potencial (altura do nível de líquido). A capacitância é dada pela equação (19).

$$C = \frac{\text{variação no volume de líquido armazenado}(m^3)}{\text{variação no potencial}(m)} \quad (19)$$

A capacitância é igual a área da sua seção reta, caso a área seja um valor constante a capacitância também será um valor constante para qualquer altura do nível.

Caso o fluxo seja laminar o sistema pode ser considerado linear. Pode haver a linearização caso o fluxo seja turbulento, para que isso ocorra as variações nas variáveis devem ser mantidas pequenas. Para um sistema linear ou linearizado uma vez que a vazão de entrada  $q_i$  menos a vazão de saída  $q_o$ , durante um pequeno intervalo de tempo  $dt$ , a equação (20) mostra a relação entre  $C$ , vazão de entrada  $q_i$  e vazão de saída  $q_o$ .

$$Cdh = (q_i - q_o)dt \quad (20)$$

Sabendo a definição de resistência, a relação entre  $q_o$  e  $h$  é dada pela equação (21).

$$q_o = \frac{h}{R} \quad (21)$$

A equação diferencial para este sistema considerando  $R$  um valor constante é mostrado na equação (22).

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad (22)$$

Como pode ser observado  $RC$  é a constante de tempo do sistema. Aplicando-se a transformada de Laplace na equação (10) é obtida a equação (23).

$$(RCs + 1)H(s) = RQ_i(s) \quad (23)$$

Para  $q_i$  como grandeza de entrada e  $h$  como grandeza de saída, a função de transferência do sistema é definido pela equação (24).

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (24)$$

Caso seja escolhida a vazão  $q_o$  como grandeza de saída, a função de transferência é definida pela equação (25).

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (25)$$

## 2.7 PLANTA DIDÁTICA PD3 SMAR

A planta didática PD3 Smar é disponível em modernas tecnologias, como: *Hart*, *Foundation Fieldbus* e *Profibus*.

A Smar oferece alta tecnologia para atender instituições e empresas, a planta didática é uma boa ferramenta para os alunos adquirirem conhecimento em controle, automação e instrumentação com as mesmas características encontradas na indústria (SMAR-PD3-P, 2012). O operador tem contato com transmissores de pressão e temperatura e posicionadores de válvulas, além de outros instrumentos como pode ser observado na Figura 7.

A planta didática Smar utiliza o Studio302 (Software para configuração e operação dos instrumentos (Studio302)) para configuração e operação dos instrumentos, modificando valores dos transmissores e posicionadores e alterando o modo de operar das malhas de controle. O Studio302 efetua a aquisição de dados dos equipamentos e apresenta informações das malhas de controle em telas gráficas e animações.

**Figura 7 – Planta didática PD3 Smar**



Fonte: (SMAR-PD3-P, 2012)

### 2.7.1 Studio302

O manual do Studio302 é bem claro quanto a função do programa para que a planta funcione adequadamente.

O Studio302 é uma ferramenta amigável e fácil de usar, que integra todos os aplicativos que compõem o sistema de automação industrial System302 da Smar. O Studio302 não incorpora as funcionalidades dos aplicativos, ele apenas inicializa o aplicativo selecionado, e cada aplicativo é executado separadamente. Uma das características do Studio302 é gerenciar a informação de diferentes configurações de projetos que são importadas em uma única base de dados, o que possibilita a integração de todas as ferramentas de controle, operação e manutenção instaladas em diversas estações de trabalho (SMAR-STUDIO302, 2013).

O Studio302 permite que sejam criados grupos específicos pelo sistema operacional em uma estação de trabalho. Assim de modo automático os grupos são adicionados ao sistema de cadastro do Studio302, isso faz com que o fluxo contínuo de troca de informações e arquivos seja mais rápido e eficiente.

Com o Studio302, a manutenção dos instrumentos na planta é mais eficiente. O usuário tem condições de realizar a manutenção e substituir um instrumento de forma eficaz, reduzindo o tempo em que a planta não estiver em funcionamento. O Studio302 opera em sistemas como: *Windows XP, Windows Server 2003, Windows 7*

ou *Windows Server 2008 da Microsoft (SMAR-STUDIO302, 2013)*.

### 2.7.2 Foundation Fieldbus

A tecnologia utilizada neste trabalho será a *Foundation Fieldbus* que é uma Arquitetura de Controle de Sistema completa, através desta ferramenta são permitidas as funções de controle para os equipamentos de campo. A configuração correta dos equipamentos é essencial, nesta etapa devem ser realizadas a calibração e construção de uma estratégia de controle do instrumento.

Com estrutura semelhante às camadas de redes do modelo ISO/OSI (*International Organization for Standardization - Organização Internacional para Padronização (ISO)* e *Open System Interconnection - Interconexão de Sistema Aberto (OSI)*), o protocolo *Fieldbus* utiliza apenas três camadas: a física, de enlace e de aplicação, e ao contemplar a norma IEC 61158, eliminou serviços como: os correios eletrônicos, mapeamento de servidores, roteamento de mensagens e outros, por não lhe serem úteis; essa eliminação agiliza o processo de comunicação, deixando-o mais rápido (CICILLINI, 2007).

A tecnologia *Fieldbus* faz com que as plantas mantenham as exigências de segurança que estão cada vez mais restritas, além de fornecer operadores com notificações e avisos antecipados de circunstâncias perigosas pendentes e atuais, o *Fieldbus* permite ações corretivas antes de uma parada que não foi planejada. A planta possui potencialidades de diagnóstico ampliadas que reduzem o acesso de pessoas até áreas de campo perigosas, isso faz com que o pessoal de campo esteja mais seguro (MAIA, 2003). Pode ser encontrado exemplos de utilização da tecnologia *Fieldbus* em controles de temperatura, vazão e pressão de uma coluna de fracionamento.

Há diferenças entre *Fieldbus Foundation* e *Foundation Fieldbus*. *Fieldbus Foundation* é uma fundação formada por empresas de automação de controle de processos e manufatura para desenvolver um *Fieldbus* simples, aberto, internacional e interoperável. É baseado nas normas IEC/ISA (*International Electrotechnical Commission - Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC)/International Society of Automation - Sociedade Internacional de Automação (ISA)*), já *Foundation Fieldbus* é LAN (*Local Area Network - Rede de Área Local (LAN)*) para instrumentos, usada em automação de processos e manufatura, com capacidade para distribuir as aplicações de controle através da rede (MAIA, 2003).

É muito importante ter conhecimento na linguagem de programação do diagrama de blocos funcionais focado na tecnologia *Foundation Fieldbus* para poder fazer as configurações necessárias nos instrumentos. Os equipamentos utilizados serão o LD302 e o FY302.

### 2.7.3 LD302 - Transmissor de pressão

O manual do Transmissor de pressão Smar (LD302) mostra como o instrumento funciona na planta de nível, o instrumento deve ser configurado corretamente através do Studio302.

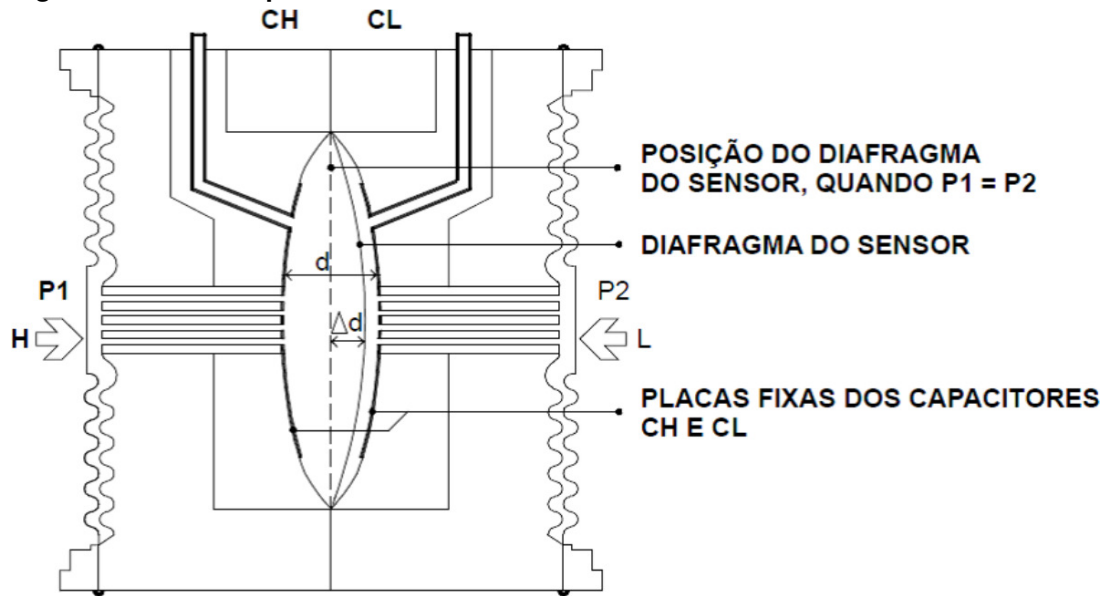
O LD302 faz parte da primeira geração de equipamentos *Fieldbus*. Ele é um transmissor para medida de pressão diferencial, absoluta e manométrica, de nível e de vazão. O transmissor possui um sensor capacitivo que proporciona uma operação segura e um excelente desempenho em campo. A tecnologia digital usada no LD302 permite a escolha de vários tipos de funções de transferência, um interfaceamento fácil entre o campo e a sala de controle e algumas características que reduzem consideravelmente a instalação, operação e os custos de manutenção. O LD302 é similar aos demais equipamentos da família 302, oferecendo vários blocos de funções embutidos que eliminam o uso de um equipamento de controle a parte. Assim a necessidade de comunicação entre equipamentos é consideravelmente reduzida e, portanto, otimiza-se o tempo e um controle mais “rígido” pode ser alcançado, sem mencionar a redução de custo. O desenvolvimento dos dispositivos da série 302 levou em conta a necessidade de implementação do *Fieldbus* tanto em pequenos como em grandes sistemas. Estes dispositivos têm como características a capacidade de se comportarem como um mestre na rede. Também podem ser configurados localmente usando uma chave magnética, eliminando a necessidade de um configurador, em muitas aplicações básicas (SMAR-LD302, 2014).

O sensor de pressão utilizado para o LD302 é do tipo capacitivo (célula capacitiva) como pode ser observado na Figura 8.

Onde:

- $P_1$  e  $P_2$  são as pressões aplicadas nas câmaras H e L;
- $CH$  é a capacitância medida entre a placa fixa do lado  $P_1$  e o diafragma sensor;

Figura 8 – Célula Capacitiva



Fonte: (SMAR-LD302, 2014)

- $CL$  é a capacitância medida entre a placa fixa do lado  $P2$  e o diafragma sensor;
- $d$  é a distância entre as placas fixas de  $CH$  e  $CL$ .
- $\Delta d$  é a deflexão sofrida pelo diafragma sensor devido à aplicação da pressão diferencial  $\Delta P = P1 - P2$ .

Em função da área das placas planas com mesma área e da distância que separa as placas pode ser calculada a capacitância de um capacitor como pode ser observado na equação (26).

$$C \approx \frac{\epsilon A}{d} \quad (26)$$

Sabemos que  $\epsilon$  é a constante dielétrica do meio existente entre as placas do capacitor. Considerando  $CH$  e  $CL$  capacitâncias de placas planas com mesma área e paralelas, quando  $P1 > P2$  temos as equação (27) e equação (28) para  $CH$  e  $CL$ , respectivamente.

$$CH \approx \frac{\epsilon A}{\frac{d}{2} + \Delta d} \quad (27)$$

$$CL \approx \frac{\epsilon A}{\frac{d}{2} - \Delta d} \quad (28)$$

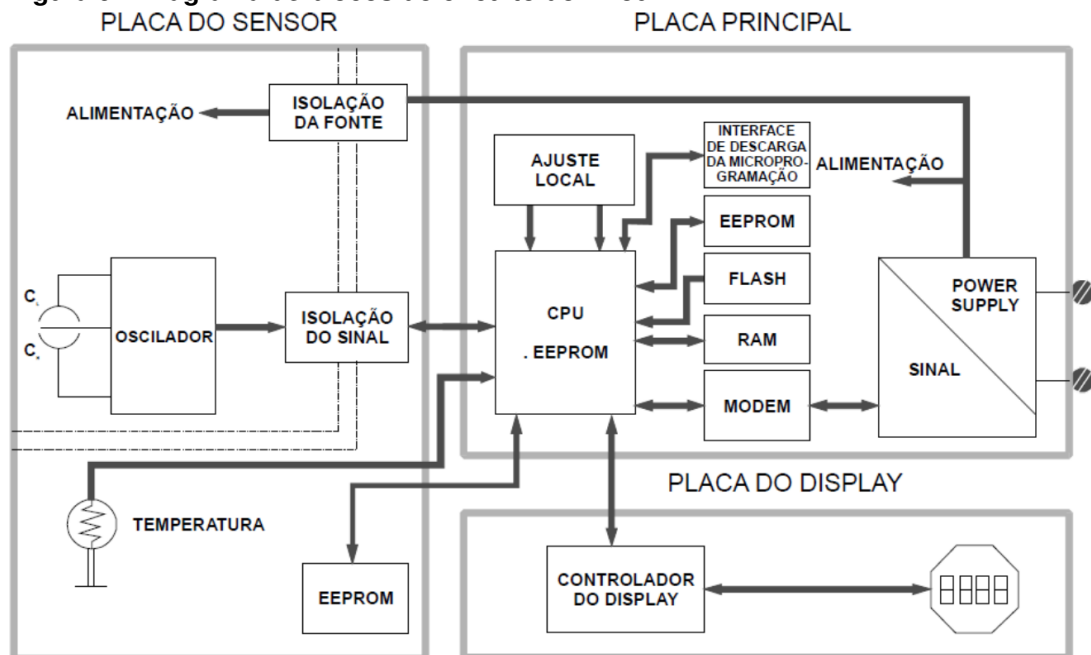
Se a pressão diferencial ( $P$ ) aplicada à célula capacitiva, não defletir o diafragma sensor além de  $d/4$ , colocá-se que  $P$  é proporcional a  $d$ . Se for desenvolvida a equação  $(CL - CH)/(CL + CH)$  a equação (29) é obtida.

$$\frac{CL - CH}{CL + CH} = \frac{2\Delta d}{d} \quad (29)$$

A equação (29) é proporcional a  $d$  e à pressão diferencial que se deseja medir. A célula capacitiva é considerada um sensor de pressão composto por dois capacitores de capacitâncias variáveis, conforme a pressão diferencial aplicada (SMAR-LD302, 2014).

A Figura 9 mostra a descrição funcional do circuito. Há a divisão da placa do sensor, placa principal e placa do display.

**Figura 9 – Diagrama de blocos do circuito do LD302**

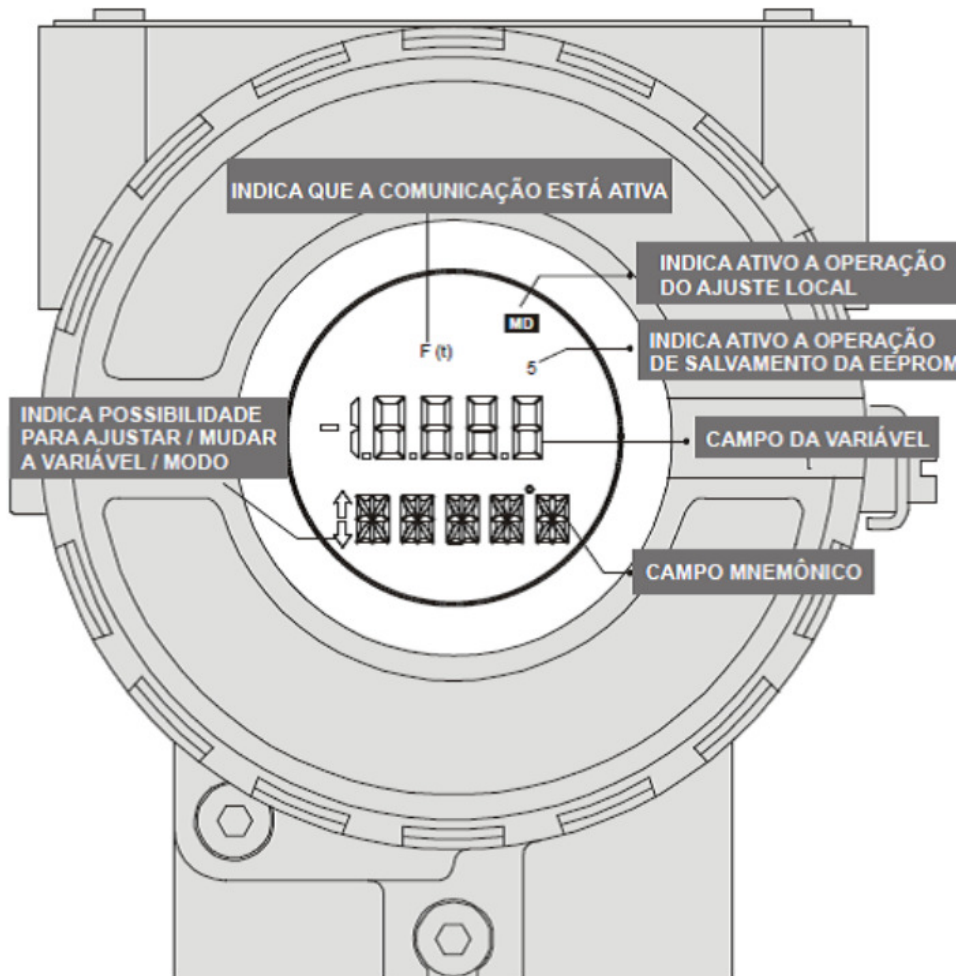


Fonte: (SMAR-LD302, 2014)

O display do LD302 pode mostrar uma ou duas variáveis selecionadas pelo usuário. Se duas variáveis forem escolhidas, o display mostrará de forma alternada as duas variáveis com um intervalo de 3 segundos (SMAR-LD302, 2014). A Figura 10 mostra o display do LD302.



Figura 10 – Display do transmissor de pressão LD302



Fonte: (SMAR-LD302, 2014)

#### 2.7.4 FY302 - Posicionador de válvulas

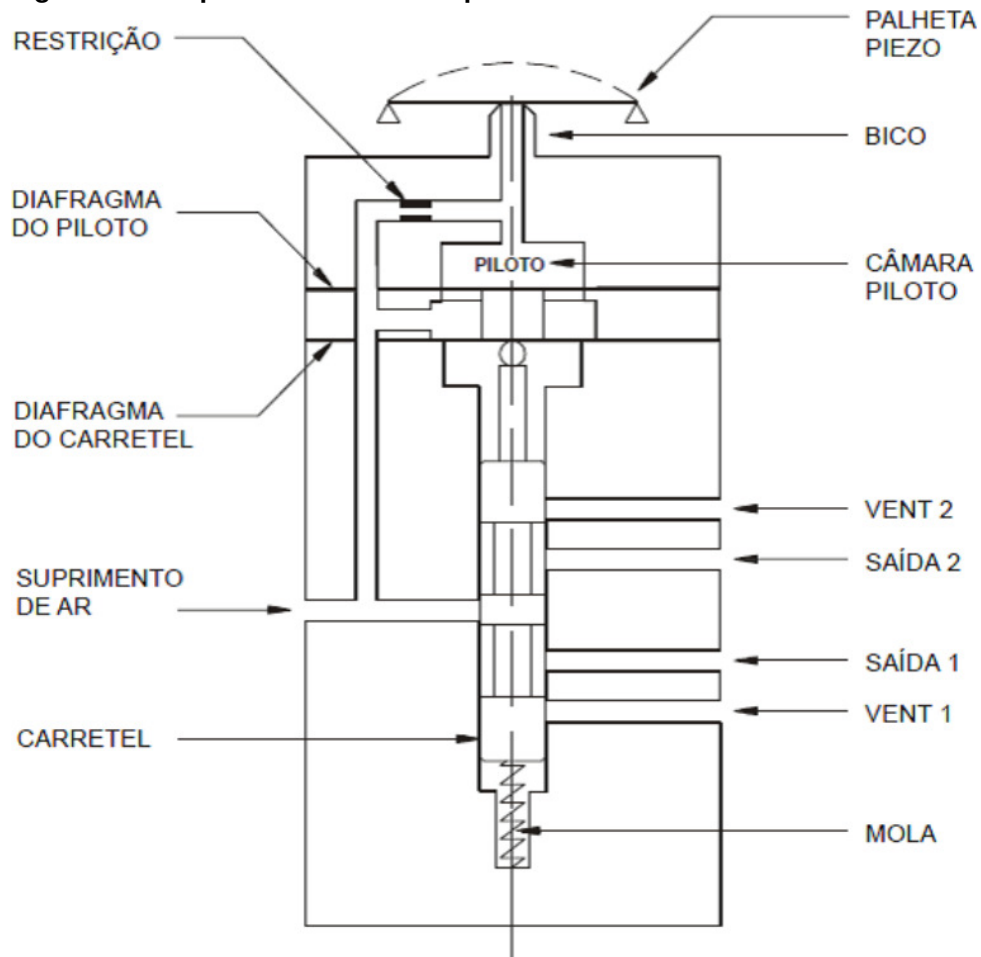
O manual do Posicionador de válvulas Smar (FY302) mostra como o instrumento funciona na planta de nível, o instrumento deve ser configurado corretamente através do Studio302, assim como o LD302.

O FY302 é um posicionador *Fieldbus* para válvulas de controle linear, ação simples (retorno por mola) ou ação dupla. O FY302 é baseado no bico-palheta, consagrado pelo uso no campo e no sensor de posição por efeito *Hall*, sem contato físico, que fornece alto desempenho e operação segura. A tecnologia digital usada no FY302 permite a escolha de vários tipos de característica de vazão, uma interface simples entre o campo e a sala de controle e muitas características interessantes que reduzem consideravelmente o custo de instalação, operação e manutenção. O FY302 assim como os outros membros da família 302 têm vários blocos funcionais internos como, por exemplo, controlador PID, seletor de entrada e seletor de saída *splitter*, eliminando

a necessidade de equipamentos separados. Essas características reduzem a comunicação, resultando num menor tempo morto e melhor controle, sem mencionar a redução nos custos (SMAR-FY302, 2015).

As principais partes do módulo do posicionador de válvula são: piloto, servo, sensor de efeito Hall e circuito de controle de saída. O circuito de controle recebe um sinal de *setpoint* digital da CPU (*Central Processing Unit* - Unidade central de processamento (CPU)), é a parte inteligente do posicionador, responsável pelo gerenciamento, operação, controle, auto-diagnóstico e a comunicação, e um sinal de realimentação proveniente do sensor de efeito *Hall*. A parte pneumática é baseada numa tecnologia que pode ser observada na Figura 11.

**Figura 11 – Esquema do transdutor pneumático.**



Fonte: (SMAR-FY302, 2015)

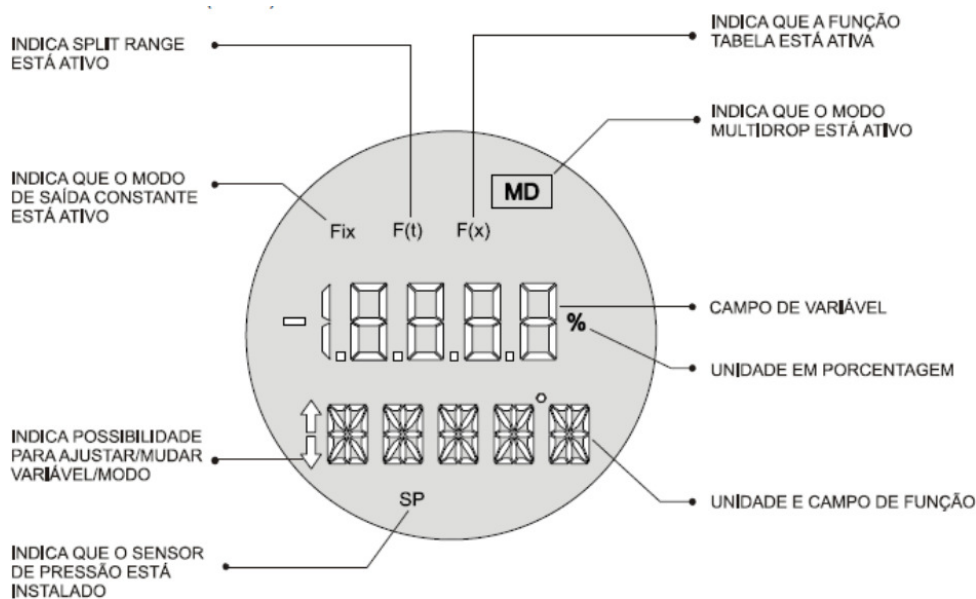
O funcionamento do transdutor pneumático é composto por partes pneumáticas e elétricas.

Um disco piezoelétrico é usado como palheta no estágio piloto. A palheta é defletida quando nela é aplicada uma tensão pelo circuito de

controle. O pequeno fluxo de ar que circula pelo bico é obstruído, causando uma alteração na pressão da câmara piloto, que é chamada pressão piloto. A pressão piloto é muito baixa e não tem força necessária para movimentar a válvula carretel e, por isso, deve ser amplificada na seção servo. A seção servo tem um diafragma na câmara piloto, e outro diafragma menor na câmara do carretel. A pressão piloto aplica uma força no diafragma da câmara piloto, que no estado de equilíbrio será igual à força que a válvula carretel aplica no diafragma menor na câmara do carretel. Assim sendo, quando tem-se uma alteração de posição via posicionador, a pressão piloto aumenta ou diminui como explicado no estágio piloto. Essa mudança na pressão piloto força a válvula para cima ou para baixo, alterando a pressão da saída 1 e da saída 2, até um novo equilíbrio ser alcançado, o que resulta numa nova posição da válvula (SMAR-FY302, 2015).

O display digital do FY302 é necessário para sinalização e para operação no ajuste local. Durante a operação normal, o FY302 permanece monitorando e o display indica a posição da válvula em porcentagem. A Figura 12 mostra as possíveis operações de configuração e monitoração do display do FY302.

**Figura 12 – Display do posicionador de válvula FY302**



Fonte: (SMAR-FY302, 2015)

### 2.7.5 OPC

O OPC é uma ferramenta que serve para comunicação dos instrumentos de campo com o *Matlab/Simulink* ou o *Studio302* para que a planta possa ser controlada pelo computador.

Os controles de processos industriais têm se tornando cada vez mais complexos devido à exigência de qualidade dos produtos, rapidez na

entrega e concorrência de mercado. Tal complexidade produz grandes quantidades de dados a serem gerenciados pelos três níveis de controle de processos: dispositivos de campo, sistemas de controle e *softwares* para gerenciamento e negócios. A integração desses níveis utilizando efetivamente a informação disponível em cada um deles é de fundamental importância para a indústria. Na busca de uma solução para esse problema, foi desenvolvida a tecnologia OPC, que é uma tecnologia para conectar aplicações *Windows* e equipamentos de controle de processos. O OPC é um protocolo de comunicação aberto que permite um método consistente de acesso aos dados de inúmeros equipamentos dos mais diversos fabricantes. O método é o mesmo, independente da origem dos dados, o que vem oferecer ao usuário final uma maior liberdade na escolha dos equipamentos independentemente da disponibilidade de drivers de comunicação proprietários. O OPC é construído usando tecnologia *Microsoft OLE/COM (Component Object Model - Modelo de Objeto Componente (COM))*, mas a especificação OPC foi desenvolvida por uma fundação aberta, a *OPC Foundation*, para atender as necessidades gerais da indústria e não as necessidades específicas de alguns fabricantes de *hardware* e *software* (*OPC Foundation, 1988*). A especificação ainda prevê a evolução das funcionalidades ao longo do tempo e por isso, os componentes OPC podem se manter no topo das necessidades emergentes da indústria (*CARVALHO A. S; SILVA, 2008*).

Os componentes do OPC são: os Clientes OPC e os Servidores OPC. O Cliente OPC é um usuário de dados da interface de Operação ou de um Sistema Supervisório. Um Servidor OPC é uma fonte de dados que a partir de um processo coleta ou gera dados, assim ele pode disponibilizar aos Clientes OPC. O Servidor OPC e o Cliente OPC interagem entre si em uma interface bem definida, onde ambos podem se comunicar independente do tipo e do fabricante do dispositivo.

A arquitetura OPC possui objetos básicos: servidor, grupo e item. Para o cliente, um servidor tem a função de armazenagem para grupos que tem como função básica o armazenamento de itens. Esses itens são conexões a pontos de entrada ou saída. O OPC é um meio de acesso a um valor e não um valor, com isso apenas uma variável de entrada ou saída pode ser representado por itens diferentes, com propriedades distintas e compartilhada por um cliente ou mais. Os grupos tem a tarefa de reunir o conjunto de itens que interessam a um cliente, assumindo o papel principal na interação do cliente-servidor (*CARVALHO A. S; SILVA, 2008*).

Os grupos tem a função de satisfazer pedidos de leitura, escrita e enviar atualizações para seus clientes. Os grupos em um servidor OPC são definidos pelo cliente na maioria das situações, e apenas o cliente criador do grupo pode acessar seus dados, há a possibilidade de que o servidor ofereça grupos com capacidade de serem compartilhados por outros clientes, esta é a funcionalidade dos grupos públicos. A

função do servidor é prover infraestrutura adequada de suporte aos grupos, também tem a função de gerenciar aspectos relacionados à conexão com uma fonte de dados, como os parâmetros de comunicação ou taxa máxima de amostragem e implementar uma estrutura de endereço capaz de associar itens com variáveis reais.

Existem três propriedades associadas ao item. A primeira propriedade, “*value*”, é o último valor armazenado pelo servidor no cachê de memória do item, esta informação é atualizada sempre que o servidor faz uma leitura no dispositivo. A segunda propriedade, “*quality*”, é a informação de estado que define a qualidade do dado que pode ser, esta qualidade é dividida em “*good*”, “*bad*” ou “*uncertain*”. “*Good*” quer dizer que o dado é válido, “*bad*” quer dizer que houve a perda do link de comunicação com o dispositivo de campo, “*uncertain*” ocorre no caso de existir o link e o dispositivo de campo estiver fora de comunicação. A terceira propriedade, “*time stamp*”, que quer dizer o tempo de amostragem.

O OPC Toolbox (*Coleção das funções que estendem a potencialidade do Matlab/Simulink (Toolbox)*) é uma coleção das funções que estendem a potencialidade do *Matlab/Simulink*. Usando funções do *Toolbox*, você cria um objeto cliente para acesso aos dados (objeto cliente do *Opcda*) que represente a conexão entre o *Matlab/Simulink* e um usuário OPC. Usando propriedades do objeto cliente você pode controlar vários aspectos da comunicação, tais como períodos de tempo, status da conexão, e armazenamento dos eventos associados a este cliente. Usando o *OPC Toolbox*, pode registrar os dados (uma lista dos dados que mudaram, e seus valores novos) de um usuário no disco rígido ou numa memória, para mais tarde processar. A tarefa de registro dos dados é controlada pelo objeto do *datagroup*. Para trabalhar com os dados que você adquire, deve trazê-los para o espaço do *Matlab/Simulink*. O *Toolbox* fornece diversas maneiras para trazer um ou mais registros dos dados para o espaço de trabalho onde você pode analisar ou visualizar esses dados. O *Toolbox* definiu determinadas ocorrências do *OPC Toolbox*, tais como o começo de uma tarefa de aquisição, assim como ocorrências iniciadas de um usuário, tais como a notificação de que o estado de uma variável mudou, como eventos. Pode associar a execução de uma função particular a um evento particular (CARVALHO A. S; SILVA, 2008).

#### 2.7.5.1 OLE

OPC significa *OLE for Process Control*, a tecnologia *OLE (Object Linking and Embedding - Vinculação e incorporação de objetos (OLE))* foi criada pela *Microsoft* com o objetivo de suprir a necessidade de se integrar aplicações da plataforma *Windows*, assim podem ser solucionados problemas de confiabilidade e desempenho que eram utilizados pelo padrão *DDE* (CARVALHO A. S; SILVA, 2008).

Dois conceitos foram colocados, o *Linking* e o *Embedding*. *Linking* tem a função de criar vínculos ou referências aos objetos, armazenados no documento principal apenas os dados realmente necessários para exibir. *Embedding* incorpora os dados dos objetos ao documento principal. A partir deste conceito surgiram os objetos vinculados e objetos incorporados. Objeto vinculado são informações criadas em um arquivo e inseridas em outro arquivo. Objeto incorporado são informações inseridas em um arquivo de destino, o objeto se torna parte do arquivo ao ser incorporado (CARVALHO A. S; SILVA, 2008).

A tecnologia OLE tem os conceitos de cliente e servidor muito importantes que são utilizados na tecnologia OPC, o cliente é a aplicação que solicita os dados e o servidor é a aplicação que disponibiliza os dados. A tecnologia OLE é montada sobre a tecnologia COM (*Component Object Model*) que define um modo padronizado para um módulo-cliente e um módulo-servidor se comunicarem por meio de uma interface específica. Módulo indica um aplicativo ou uma biblioteca (uma *Dynamic Link Libraries* - Bibliotecas de links dinâmicos (DLL)). Os dois módulos podem ser executados no mesmo computador ou em máquinas diferentes conectadas através de uma rede. Muitas interfaces são possíveis, dependendo do papel do cliente e do servidor, e podem-se incluir novas interfaces para propósitos específicos (CARVALHO A. S; SILVA, 2008).

#### 2.7.6 DFI302 - *Fieldbus Universal Bridge*

O DFI302 é uma ferramenta importante integrada ao Sistema de automação de controle distribuído (System302), em relação a *hardware* e *software* o *Fieldbus Universal Bridge* (DF302) tem uma tecnologia avançada e atualizada para monitorar, gerenciar, manter, controlar e operar uma planta industrial. O DF302 utiliza padrões abertos como *Foundation Fieldbus* e OPC, fazendo a operação de diferentes instrumentos de diferentes fabricantes. O DF302 tem grande capacidade de comunicação com acesso aos módulos E/S e controle avançado para aplicações discretas e contínuas. Este equipamento pode ser montado em um trilho DIN, onde contém a Fonte Principal (DF50), Fonte *Fieldbus* (DF52), Controladores (DF51, DF62, DF73, dentre outros) e Impedância de Linha (DF53). O principal componente utilizado no presente trabalho será o Módulo controlador da plataforma DFI302 (DF51) (SMAR-DFI302, 2014).

### 2.7.6.1 Controlador DF51

O DF51 é utilizado geralmente para criação de estratégias de controle e sistemas redundantes para comunicação do OPC com os instrumentos de campo. Este controlador tem a função de conectar equipamentos *Fieldbus* no barramento H1, podendo executar a função de LAS (*Link Active Scheduler* - Programador ativo de link (LAS)) da rede. Utilizando o DF51 para sistemas supervisórios podem ser utilizadas 400 tags ao mesmo tempo com 16 Servidores conectados (SMAR-DFI302, 2014).

As especificações técnicas do DF51 podem ser observadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Especificações técnicas do DF51**

<b>DF51</b>	
Tipo	32 – bitRISC
Desempenho sustentado	50MIPS
Memória para código	2 MB, Memória <i>flash</i> de 32-bit ( <i>firmware</i> atualizável)
Memória para dados	2 MB, NVRAM de 32-bit (Retenção de dados e, configuração)
Interface para Fieldbus	Número de Portas: 4, independentes com DMA <i>Physical Layer Standard</i> : ISA-S50.02-1992 Baud <i>Rate</i> : 31,25 Kbps (H1) Tipo de MAU: Passivo (barramento não energizado) Segurança intrínseca: Não compatível, Isolação: 500 Vac (cada canal)
Operação Tensão/Corrente	+5 V +- 5%/0,95 A (típico)
Conector Ethernet	RJ – 45
Conector EIA-232	RJ/12
Blocos funcionais <i>Foundation</i>	100( <i>mximo</i> )

Fonte: (SMAR-PD3-P, 2012)



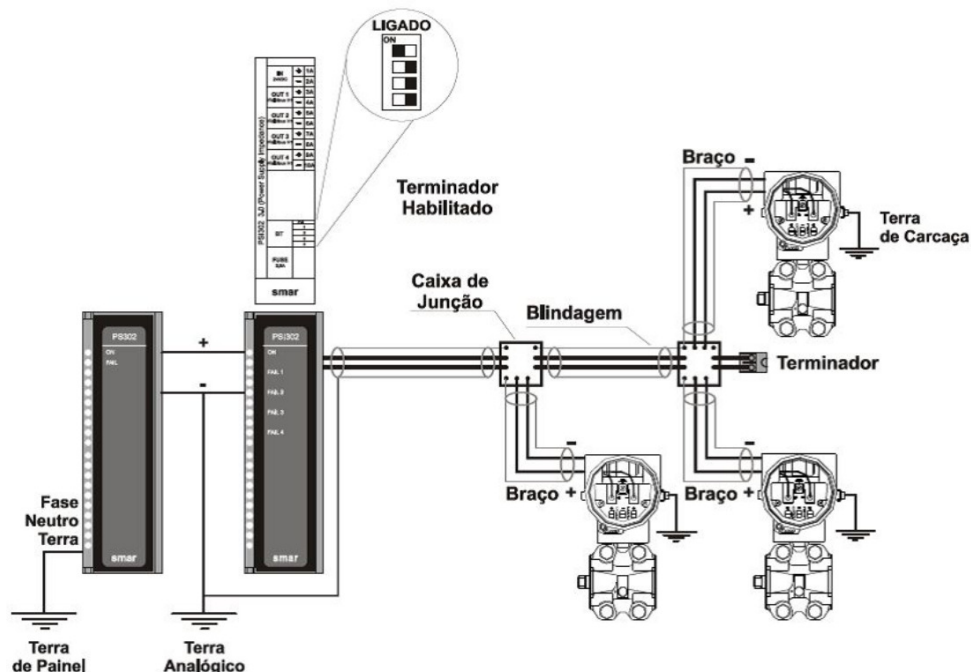
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente capítulo aborda o desenvolvimento dos controladores PID e *fuzzy* aplicados ao sistema de nível de líquido da planta didática PD3. Serão descritos o estabelecimento da comunicação da planta didática PD3 com o *Matlab/Simulink*, o modelo instrumentado do sistema de nível de líquido, os cálculos das variáveis para o controlador PID e a definição das regras, funções pertinência e variáveis para o controlador *fuzzy*.

#### 3.1 COMUNICAÇÃO DA PLANTA DIDÁTICA PD3 SMAR COM O MATLAB/SIMULINK

Os instrumentos LD302 e o FY302 são interligados com o controlador DF51 por barramento. As Figura 13 e Figura 14 mostram como devem ser as conexões do LD302 e do FY302, respectivamente, na topologia barramento.

Figura 13 – Topologia barramento para o LD302

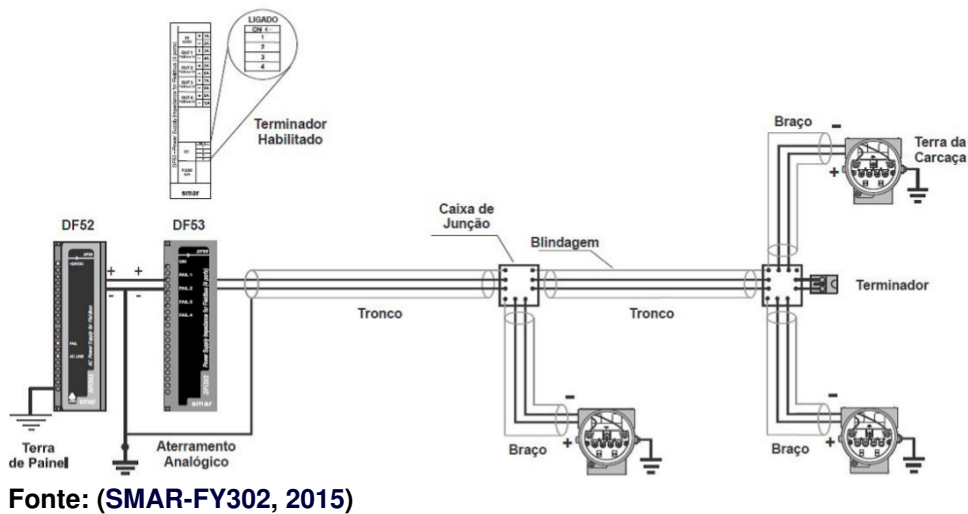


Fonte: (SMAR-LD302, 2014)

O FY302 e LD302 são conectados com o controlador DF51 que tem a função de enviar ao computador as informações presentes nos instrumentos, estas informações são enviadas através de um cabo par trançado que vai conectado direto ao com-



Figura 14 – Topologia barramento para o FY302



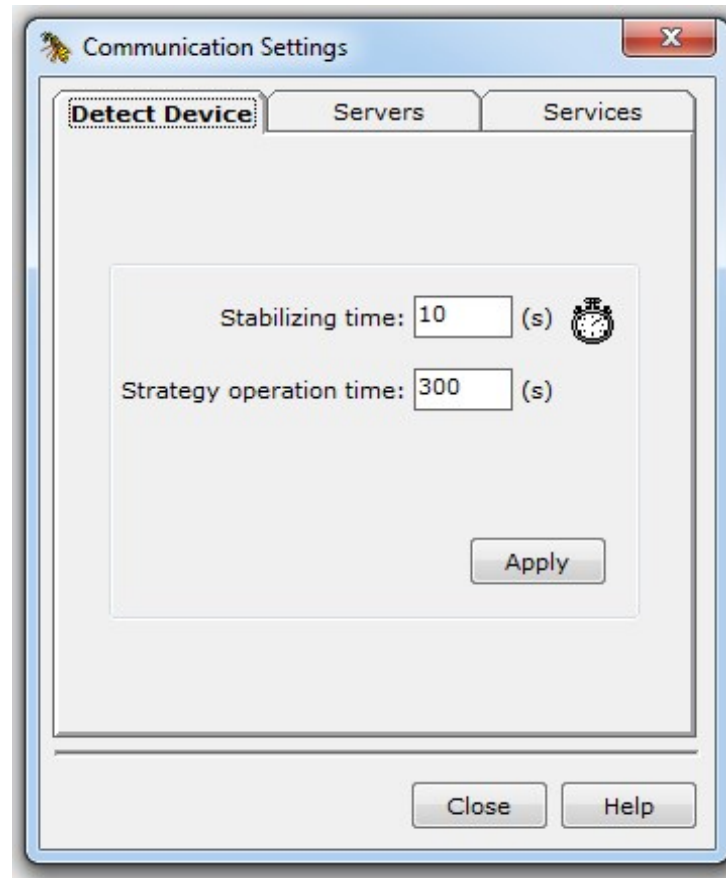
putador. Para que as informações cheguem de forma satisfatória foram necessárias algumas configurações que serão mostradas a seguir. A primeira etapa foi definir o Protocolo “TCP/IP Versão 4 (TCP/IPv4)” para um IP (*Internet Protocol - Protocolo de internet (IP)*) padrão utilizado no Laboratório de Sistemas Supervisórios (LSUP), o IP utilizado foi 192.168.164.51, com máscara de sub-rede 255.255.255.0 com este IP e máscara de sub-rede podem ser feitas as configurações no *software* Studio302.

Com o Studio302 aberto deve ser aberta a janela “*Communication Settings*” localizada na barra superior “*Settings*”, devem ser mantidas as configurações padrões na aba “*Detect Device*” como pode ser observado na Figura 15, na aba “*Servers*” deve ser escolhida a opção “*Local*”, onde aparecerá o computador que está sendo utilizado para comunicação com a planta didática PD3, (Computador utilizado no LSUP (LSUP17-PC)), em seguida foi adicionado este computador à lista clicando na caixa “*Add to list*”, o nome do computador deve aparecer na janela “*Configured Servers*” como pode ser observado na Figura 16.

Na aba “*Services*” deve ser clicado na caixa “*Start*”, em seguida será observado que na opção “*Detect Device*” aparecerá o texto “*Running*”. Isso mostra que a comunicação do Studio302 com a planta didática PD3 foi feita de forma correta.

Com esta etapa concluída deve-se clicar na caixa “*FBTools – Firmware download*”. Na janela aberta deve procurar em *Controllers/DFI302* o DF51, clicando nele com o botão direito devem ser selecionada a opção “*DFi Download Classic*”. Deve estar selecionada a opção “*Local*” e em seguida deve ser clicado na caixa “*Connect*”, na parte “*Download Options*” aparecerá as informações do DF51 da planta didática PD3.

**Figura 15 – Configurações na aba “Detect Device” em “Communication Settings”**



**Fonte: Autoria Própria**

O próximo passo é abrir o *Matlab/Simulink*. Com a função “*opctool*” aparecerá uma nova janela denominada “*OPC Data Access Explorer*”, na coluna “*Hosts and OPC Servers*” deve ser clicado com o botão direito no texto “*OPC Network*” e escolher a opção “*Add Host*”, será aberta uma janela “*Host Name*”, no campo “*Enter host name or IP adress*” será digitado o mesmo IP definido anteriormente para comunicação (192.168.164.51), clicando na caixa “*OK*” aparecerá uma série de opções na coluna *OPC Network*, deve ser clicado com o botão direito na opção “*Smar.DfiOleServer.0*” e escolher a opção “*Create Client*”, na coluna da direita aparecerá uma opção chamada “*192.168.164.51/Smar.DfiOleServer.0*”.

Nesta opção “*192.168.164.51/Smar.DfiOleServer.0*” deve ser adicionado um grupo e dentro deste grupo devem ser adicionados os item para leitura e escrita dos valores na aplicação dos controladores, foram usados os item LIT-31\_A11.PV e FY-31\_AO1.OUT.

O LIT-31\_A11.PV vai fazer a leitura do valor da planta para posteriormente ser

**Figura 16 – Configurações na aba “Servers” em “Communication Settings”**



Fonte: Autoria Própria

transformado em um valor de altura e o FY-31\_AO1.OUT será usado para ler o valor de saída do controlador e mandar o sinal para atuação da válvula para que a altura do tanque possa ser controlada.

### 3.2 MODELO INSTRUMENTADO DO SISTEMA DE NÍVEL DO TANQUE

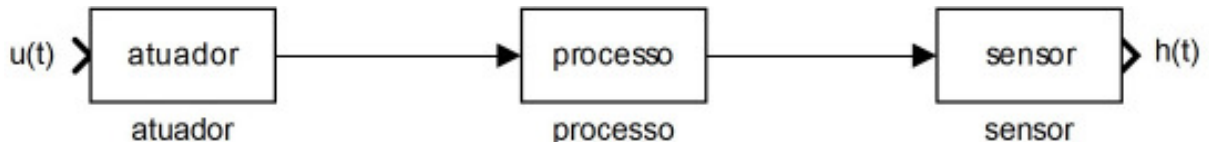
O modelo instrumentado do sistema do tanque foi feito para que pudesse ser observada a altura real do tanque através do *Matlab/Simulink*.

O sistema de nível tem todos os instrumentos necessários para a aplicação do controle PID e do controle *fuzzy*. Para fazer a modelagem instrumentada do tanque foram obtidos alguns dados numéricos, como:

- Área de seção transversal do tanque:  $A_t = 0,0336 \text{ m}^2$ ;
- Curso máximo da válvula:  $l = 20 \text{ mm}$ ;
- Máxima altura do tanque:  $h = 1 \text{ m}$ .

Considerando que  $u(t)$  é a posição da válvula de entrada que determina a vazão de entrada  $q_i(t)$ , deseja-se controlar o nível do tanque através da vazão de entrada. A posição da válvula define a vazão de entrada do tanque que altera o nível de líquido, desta maneira pode ser feita uma relação entre posição da válvula  $u(t)$  e a altura  $h(t)$ , esta relação pode ser observada na Figura 17.

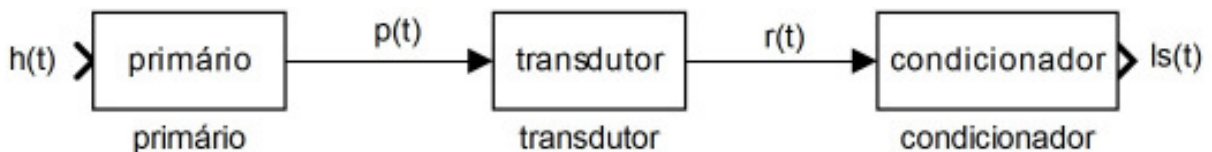
Figura 17 – Relação entre o deslocamento da válvula e o nível do tanque



Fonte: Autoria Própria

Com uma altura  $h(t)$  é obtida uma pressão  $p(t)$ , que é relacionado a um valor da resistência elétrica  $r(t)$ , que se relaciona com a corrente de saída do sensor  $I_s(t)$ , esta relação entra altura  $h(t)$  e  $I_s(t)$  pode ser observada na Figura 18.

Figura 18 – Relação entre altura e corrente de saída do sensor (sensor)



Fonte: Autoria Própria

Pela Lei de Stevin a pressão  $p(t)$  pode ser relacionada com a altura  $h(t)$ , a equação (30) mostra esta relação.

$$p(t) = \rho gh(t) \quad (30)$$

Onde:

- Massa específica do líquido:  $\rho = 1.000\text{kg}/\text{m}^3$ ;
- Aceleração da gravidade:  $g = 9,806\text{m}/\text{s}^2$ .

Substituindo os valores obtidos inicialmente na equação (30) é obtida a equação (31).

$$p(t) = 0,0981 h(t)[\text{bar}] \quad (31)$$

Sabendo que a altura máxima do tanque é 1 metro, a pressão máxima que o sistema pode ter é 0,0981 bar. O sensor trabalha em uma faixa de corrente de 4 a

20mA, com esta informação pode ser calculado o ganho associado  $g_{assoc}$  como pode ser observado na equação (32).

$$g_{assoc} = \frac{I_{max}}{p_{max}} = 203,8736 \quad (32)$$

Com o valor do ganho associado pode ser feita a relação da corrente de saída do sensor  $I_s(t)$  e a pressão  $p(t)$  na equação (33).

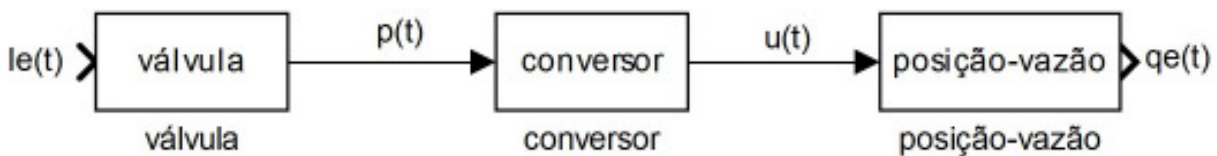
$$I_s(t) = g_{assoc}p(t) = 203,8736p(t) \quad (33)$$

Com a equação (33) definida pode ser feita a relação entre a corrente de saída do sensor  $I_s(t)$  com a altura  $h(t)$  do tanque através da equação (34).

$$I_s(t) = 203,8736 \cdot 0,0981 h(t) = 20h(t) \quad (34)$$

A Figura 19 mostra a estrutura do atuador do sistema de nível.

**Figura 19 – Relação entre corrente de entrada e vazão de entrada (atuador)**



Fonte: Autoria Própria

A válvula eletro-pneumática transforma corrente em pressão para atuar na abertura e fechamento da válvula. O manual da Smar mostra que a corrente de operação da válvula eletro-pneumatica é de 4 a 20 mA com uma saída de 0 a 2 bar. A relação de corrente e pressão  $IP_r$  pode ser observada na equação (35).

$$IP_r = \frac{2bar}{20mA} = 0,1 \left[ \frac{bar}{mA} \right] \quad (35)$$

Com a relação  $IP_r$  definida pode ser feita a relação entre pressão e corrente de entrada como pode ser observado na equação (36).

$$p(t) = 0,1I_e(t) \quad (36)$$

A relação do deslocamento da válvula eletro-pneumatica em  $mm$  (milímetros) e a pressão em  $bar$  foi feito experimentalmente. Foi considerado a válvula aberta em 100 % com uma pressão de 2 bar e a válvula fechada com 0 % a pressão indicada

é 0 *bar*. Sabendo que o deslocamento da válvula é 20 *mm* e que ele é diretamente proporcional a abertura da válvula foram feitas algumas observações experimentais como mostra a Tabela 2.

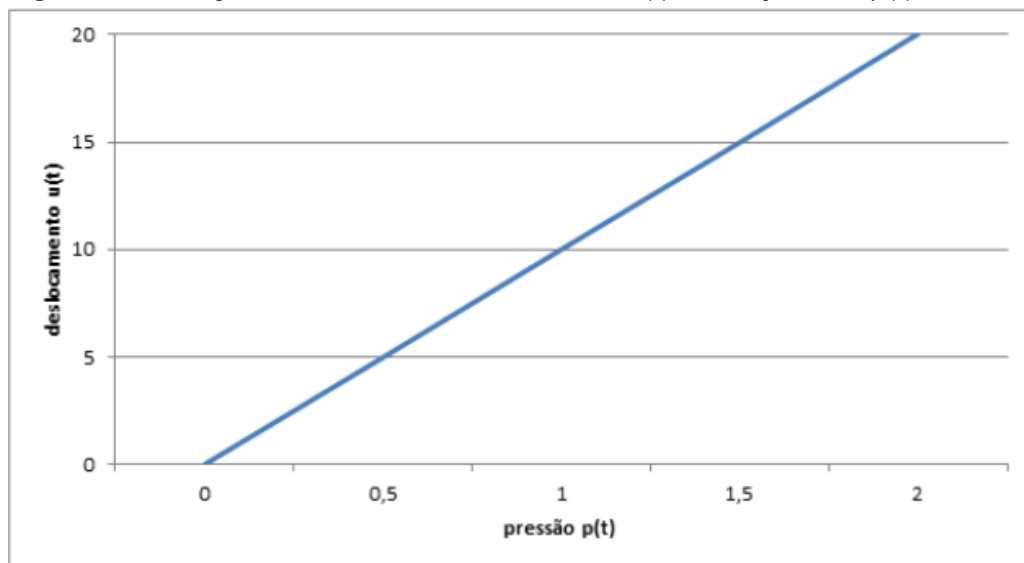
**Tabela 2 – Relação experimental da abertura, deslocamento e pressão da válvula**

Abertura da válvula (%)	Deslocamento da válvula ( <i>mm</i> )	Pressão ( <i>bar</i> )
0	0	0
25	5	0,5
50	10	1
75	15	1,5
100	20	2

Fonte: Autoria própria

Com as informações da Tabela 2 foi feito um gráfico para observar como se comporta a relação do deslocamento da válvula  $u(t)$  com a pressão  $p(t)$ .

**Figura 20 – Relação do deslocamento da válvula  $u(t)$  com a pressão  $p(t)$**



Fonte: Autoria Própria

Como pode ser observado na Figura 20 o gráfico é linear, então pela equação da reta a relação do deslocamento da válvula  $u(t)$  com a pressão  $p(t)$  pode ser definida pela equação (37).

$$u(t) = 10p(t) \quad (37)$$

Com a bomba da planta didática ligada e o líquido passando pelo sistema de nível foi observada pelo transmissor de vazão a vazão com que o líquido entrava no tanque, deste modo foi obtida a vazão do sistema de nível, a vazão  $v(t)$  teve um valor constante de aproximadamente  $0,49\text{m}^3/h$ .

Com a vazão  $v(t)$  definida pode ser feita a relação da vazão de entrada com o deslocamento da válvula que pode ser observada na equação (38).

$$q_i(t) = \frac{0,49 \left[ \frac{m^3}{h} \right]}{20[mm]} = 0,0245u(t) \quad (38)$$

Com a equação (38) definida pode ser feita a relação da vazão de entrada com a corrente de entrada, substituindo a equação (37) na equação (38) obteve-se a equação (39) que relaciona a vazão de entrada com a pressão.

$$q_i(t) = 0,245p(t) \quad (39)$$

Substituindo a equação (36) na equação (39) chega a relação da vazão de entrada com a corrente de saída que pode ser observada na equação (40).

$$q_i(t) = 0,0245I_o(t) \quad (40)$$

O transmissor de pressão tem em seu corpo as características de pressão em *inH2O@20C* para a faixa de 0 a 100 %. A Tabela 3 mostra a relação da atuação do transmissor de pressão com a pressão observada em seu corpo.

**Tabela 3 – Relação de pressão do transmissor de pressão**

Transmissor de pressão (%)	Pressão observada na etiqueta do instrumento ( <i>inH2O@20C</i> )	Pressão Convertida (bar)
0	5	0,0124544
100	200	0,4916693

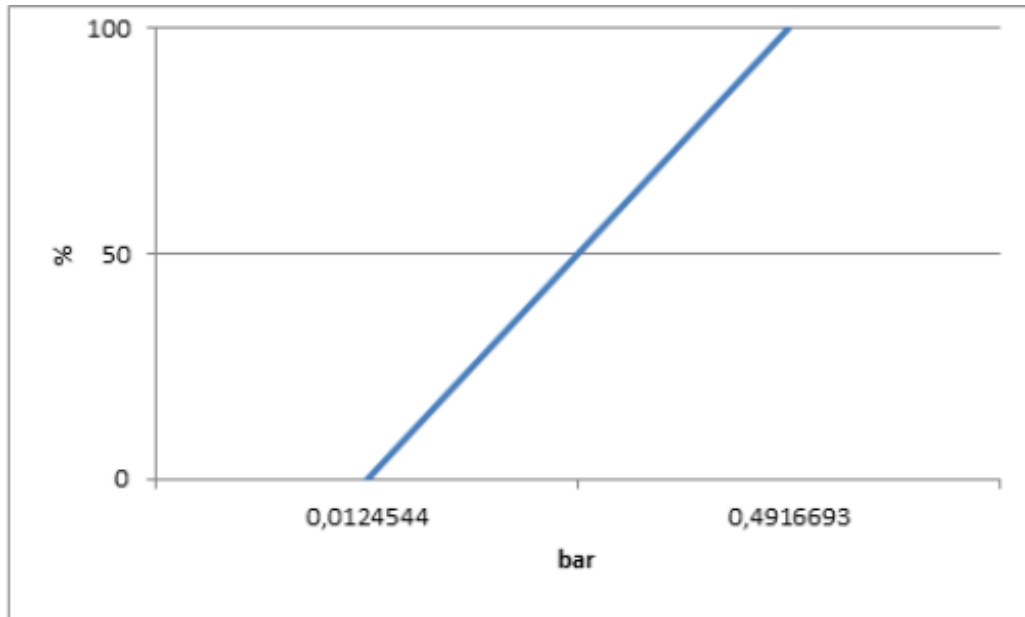
**Fonte: Autoria própria**

Considerando que esta relação é linear pode ser observado na Figura 21 o comportamento do transmissor de pressão.

A partir do gráfico foi obtida a equação (41) que relaciona a leitura do transmissor de pressão  $I(t)$  com a altura do tanque  $h(t)$ , a altura no tanque da planta didática PD3 era 5 vezes maior que o resultado observado no *Matlab/Simulink* para a altura do tanque, então foi multiplicada a equação por uma constante com valor 5 para ver se os valores no tanque e no *Matlab/Simulink* se igualavam, foi observado que os valores se igualavam desde o valor 0 metros de altura até o valor 1 metro de altura.

$$h(t) = \left( \frac{0,004792149I(t) - 0,078596431}{0,0981} \right) 5 \quad (41)$$

**Figura 21 – Relação da atuação de transmissor de pressão (%) e a pressão (bar)**

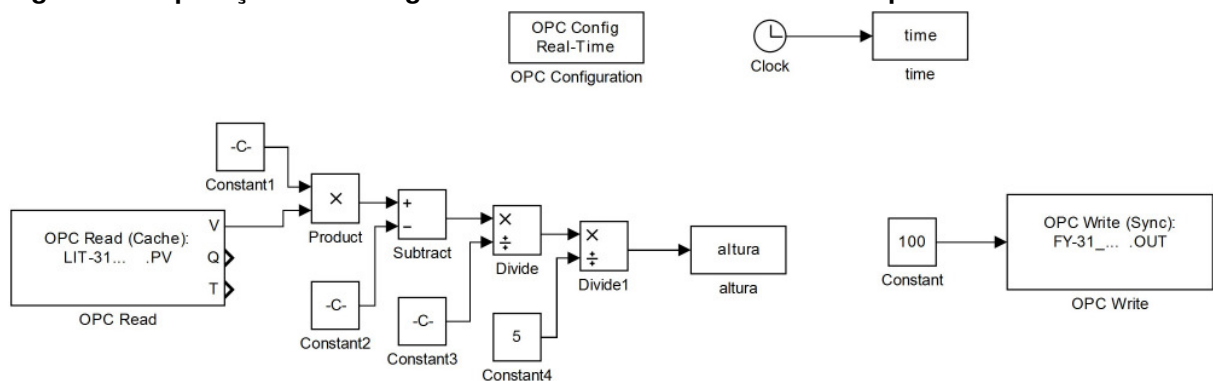


Fonte: Autoria Própria

### 3.3 FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA DO SISTEMA DE NÍVEL

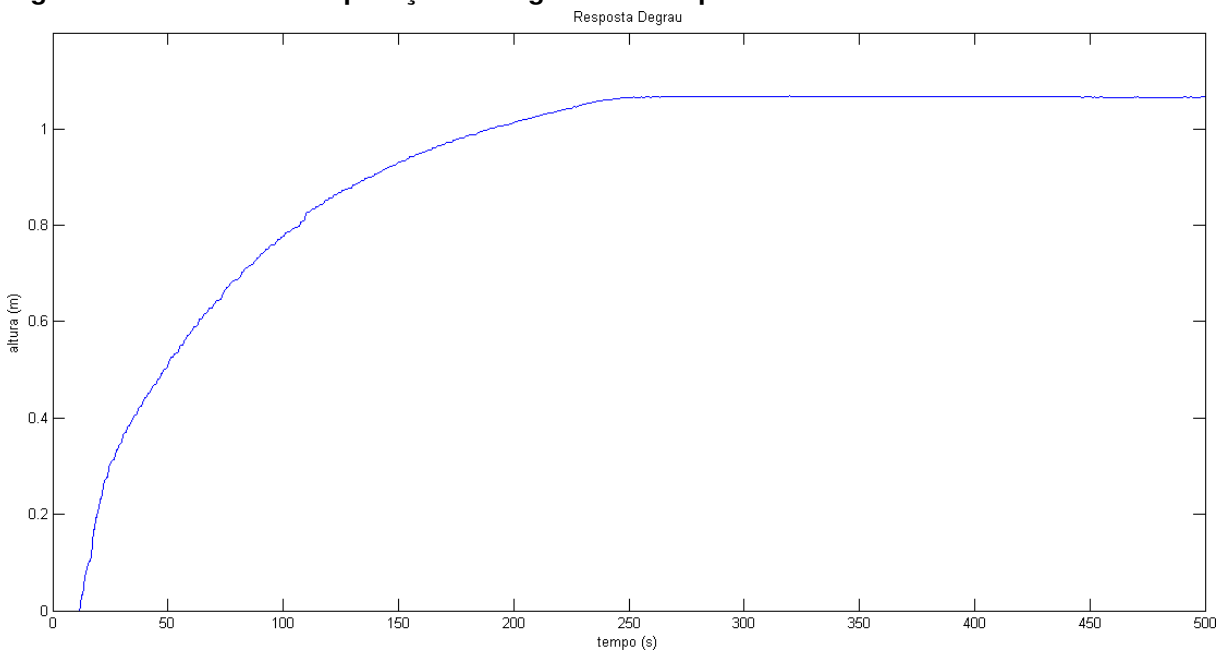
Com a comunicação entre a planta didática e o *Matlab/Simulink* funcionando adequadamente, o próximo passo consiste em obter o modelo matemático do sistema a ser controlado. Desta forma, tem-se que estimar uma função transferência do sistema de nível, e para isso foi aplicado um degrau unitário à planta de nível. Sendo que para aplicar um degrau unitário é equivalente a abrir 100% da válvula da tubulação de entrada, e então verificar a dinâmica resultante do sistema. A Figura 22 mostra o diagrama de blocos da comunicação estabelecida e a entrada do sistema sendo um degrau com amplitude igual a 100. A figura Figura 23 mostra a resposta ao degrau do sistema de nível de líquido obtida no *Matlab/Simulink*.

**Figura 22 – Aplicação de um degrau unitário ao sistema de nível de líquido**



Fonte: Autoria Própria



**Figura 23 – Resultado da aplicação do degrau unitário para o sistema de nível**

**Fonte: Autoria Própria**

Como um sistema de nível de líquido é um sistema de primeira ordem tem-se que  $R$  é  $K_0$  e  $RC$  é  $\delta$ , o que permite com que as constantes da função transferência de primeira ordem possam ser calculadas. Pela análise da resposta transitória do sistema de primeira ordem ao degrau unitário pode ser encontrada a equação (42).

$$H(s) = \frac{K_0}{\delta s + 1} \quad (42)$$

A resposta ao degrau unitário é definida pela equação (43).

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + 1/T} \quad (43)$$

A transformada inversa de Laplace para a equação (43) pode ser definida pela equação (44).

$$c(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta}}\right), \text{ para } t \geq 0 \quad (44)$$

A equação (44) mostra que a saída  $c(t)$  é nula e se torna unitária, no instante  $t=T$  o valor de  $c(t)$  é 0,63212. Observando a Figura 23 pode ser definido que o valor de  $K_0$  é 1,15, este valor foi observado considerando a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo da altura mostrada na Figura 23. A altura  $h_{min}$  é igual a -0,1016 metros

e a altura máxima  $h_{max}$  é igual a 1,059 metros. O valor de  $K_0$  é definido pela equação (45).

$$K_0 = h_{max} - h_{min} \quad (45)$$

Substituindo os valores de  $h_{max}$  e  $h_{min}$  pode ser observado que o valor de  $K_0$  é 1,1606.

Para encontrar o valor de  $y(t)$  inicialmente deve ser multiplicado o valor de  $K_0$  pela constante  $c(t)$  como pode ser observado na equação (46). A constante  $c(t)$  vem da resposta transitória para sistemas de primeira ordem, uma característica importante para a curva de resposta exponencial  $c(t)$  é que no instante  $t = T$  o valor de  $c(t)$  é 0,632 (OGATA, 2011).

$$y(t) = K_0 c(t) \quad (46)$$

O valor encontrado para  $y(t)$  é 0,7336, para encontrar o valor de  $\delta$  deve ser observado na Figura 23 onde se encontra o valor de  $y(t)$  no eixo  $y$ , o valor de  $\delta$  será o valor de correspondente no eixo  $x$ , este valor correspondente é 86, ou seja, o valor de  $\delta$  é 86. Substituindo os valores de  $K_0$  e  $\delta$  na equação (24) pode ser observada a função transferência do sistema na equação (47).

$$H(s) = \frac{1,1606}{86s + 1} \quad (47)$$

### 3.4 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR PID

Para definir as constantes proporcional ( $Kp$ ), integral ( $Ki$ ) e derivativa ( $Kd$ ) foi utilizado o método analítico lugar das raízes, com seu desempenho determinado pela posição dos polos e zeros do sistema de malha fechada.

O primeiro passo foi definir os requisitos de desempenho para o controlador PID, estes podem ser observados na Tabela 4.

**Tabela 4 – Requisitos de projeto para o controlador PID**

<i>Tempo de estabilização (<math>T_e</math>)</i>	156segundos
<i>Coefficiente de amortecimento (<math>\zeta</math>)</i>	0,6

Fonte: Autoria própria

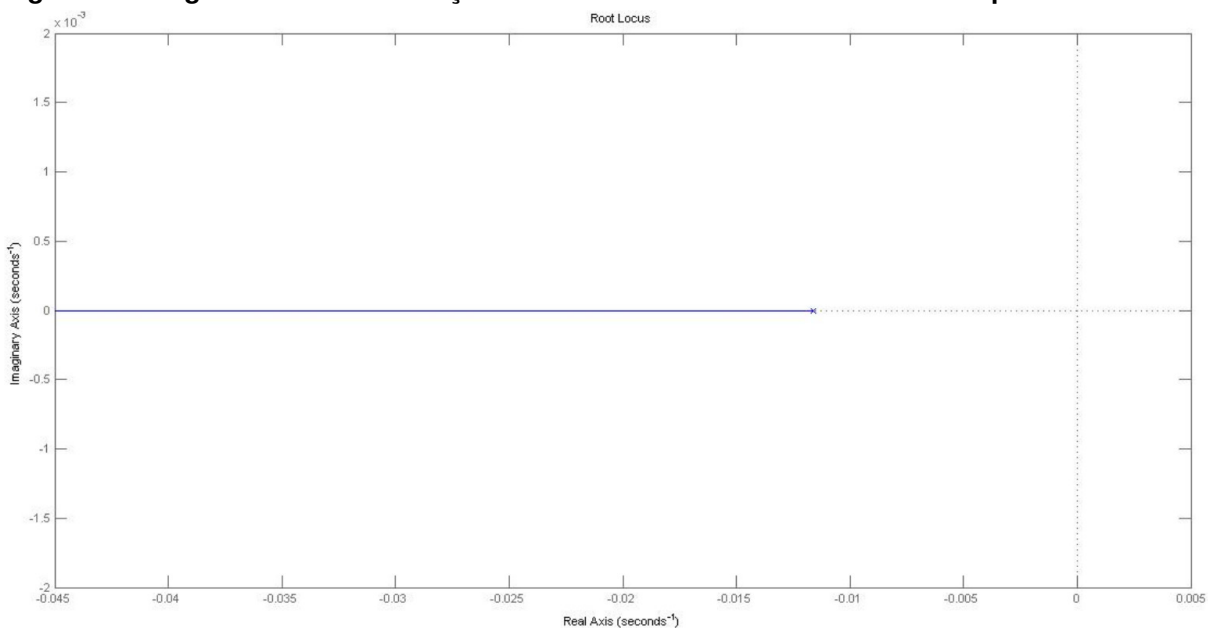
O valor do tempo de estabilização foi escolhido para que o sistema fosse estabilizado aproximadamente na metade do tempo em que a resposta natural foi estabilizada. O valor de zeta ( $\zeta$ ) foi escolhido para que a resposta em malha fechada fosse a de um sistema sub-amortecido. Assim, escolheu-se um valor de  $\zeta$  igual a 0,6 para que o sistema fosse sub-amortecido garantindo uma boa relação entre percentual de sobressinal e tempo de estabilização .

A primeira variável calculada é o valor do *PSS*, o valor do *PSS* encontrado foi de 9,48 % aplicando  $\zeta$  com valor igual a 0,6, ou seja, a resposta deve ter um valor de pico de aproximadamente 9,48 % do degrau aplicado. A equação (48) mostra a relação entre coeficiente de amortecimento ( $\zeta$ ) e *PSS*.

$$\zeta = \frac{\ln\left(\frac{100}{PSS}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{100}{PSS}\right)}} \quad (48)$$

A Figura 24 mostra o gráfico do lugar das raízes encontrado através da planta de nível de líquido, que permite verificar que para qualquer valor de ganho proporcional inserido no ramo direto, o sistema em malha fechada sempre será estável. E ainda, à medida com que o valor do ganho proporcional aumenta o polo se desloca mais à esquerda, o que faz com que a frequência natural aumente e assim o sistema torna-se mais rápido.

**Figura 24 – Lugar das raízes da função transferência do sistema de nível de líquido**



**Fonte: Autoria Própria**

A Figura 24 mostra que há um polo com valor -0,0116 no eixo real. O denomi-

nador da função transferência é uma razão de polinômios em  $s$  e deve ser desmembrado com a intenção de se igualarem os ângulos e os módulos dos dois membros da equação. A equação (49) mostra um polo  $s_d$  qualquer que corresponde a uma raiz do denominador da função transferência do sistema de malha fechada.

$$1 + L(s_D) = 1 \mid 180^\circ \quad (49)$$

O método do lugar das raízes mostra que o ganho de malha, com o controlador e a planta é dado pela equação (50).

$$L(s) = P(s) \left( K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \right) \quad (50)$$

Para o polo  $s_d$  ( $s_d = \sigma_d + j\omega_d$ ) no plano  $s$  pode ser escrito para a planta a equação (51).

$$P(s_D) = m_P e^{j\theta_P} \quad (51)$$

Para o polo  $s_d$  pode ser escrito para o controlador a equação (52).

$$K(s_D) = m_K e^{j\theta_K} \quad (52)$$

Se o polo desejado for o ponto  $s_d$  então podem ser definidas a amplitude e fase do controlador através das equação (53) e equação (54), respectivamente.

$$m_P m_K = 1 \quad (53)$$

$$\theta_P \theta_K = -\pi \quad (54)$$

Com as equações da amplitude e fase definidas para que  $s_d$  corresponda ao polo deve escrever a equação (55) e a equação (56), respectivamente.

$$K_d (\sigma_d^2 + j\omega_d^2) + K_p \sigma_d + K_i = \sigma_d m_K \cos \theta_K - \omega_d m_K \sin \theta_K \quad (55)$$

$$2K_d \sigma_d \omega_d + K_p \omega_d = \omega_d m_K \cos \theta_K - \sigma_d m_K \sin \theta_K \quad (56)$$

Com a equação (55) e a equação (56) simplificadas podem ser encontradas as variáveis  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $d_1$ ,  $\alpha$  e  $\beta$ , estas variáveis estão definidas nas equação (57),

equação (58), equação (59), equação (60), equação (61) e equação (62), respectivamente.

$$a_1 = \sigma_d^2 - j\omega_d^2 \quad (57)$$

$$b_1 = \sigma_d \quad (58)$$

$$c_1 = 2\sigma_d\omega_d \quad (59)$$

$$d_1 = \omega_d \quad (60)$$

$$\alpha = \sigma_d m_K \cos\theta_K + \omega_d m_K \sin\theta_K \quad (61)$$

$$\alpha = \omega_d m_K \cos\theta_K + \sigma_d m_K \sin\theta_K \quad (62)$$

Os valores encontrados para as variáveis podem ser observados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Valores encontrados para as variáveis**

$a_1$	-0,00051157
$b_1$	-0.0256
$c_1$	-0.0018
$d_1$	0.0342
$\alpha$	0.0600
$\beta$	0.1005

**Fonte: Autoria própria**

Deve ser admitido um valor para  $K_i$ , este valor está relacionado com o valor de erro estacionário de malha fechada, sabendo que o ganho integral é proporcional a integral do erro em função do tempo, com o valor de  $K_i$  podem ser encontrados os valores de  $K_p$  e  $K_d$  pelas equação (63) e equação (64), respectivamente.

$$K_p = \frac{a_1\beta + c_1\alpha + cK_i}{ad - bc} \quad (63)$$

$$K_d = \frac{b_1\beta + d_1\alpha + dK_i}{ad - bc} \quad (64)$$

Para encontrar os valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  adequados foram feitos testes com o valor de  $K_i$  até que fosse encontrada uma resposta satisfatória. Os valores encontrados para  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , foram 2.9596, 0.1361 e 0.4149, respectivamente. Os valores das constantes proporcional, integral e derivativa foram encontradas através dos comandos no *Matlab/Simulink*. Os comandos utilizados podem ser observados no Anexo A.

### 3.5 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR FUZZY

Para o controlador *fuzzy* o método de "defuzzificação" escolhido foi o centróide para que a resposta calculasse o ponto centróide de cada saída ativada na inferência. As funções pertinência utilizadas foram a triangular e a trapezoidal, a função triangular é a mais usada em projetos de controle *fuzzy* e foi escolhida por proporcionar a possibilidade de ocorrência num único pico maior do que os outros, a função trapezoidal foi escolhida devido a necessidade de que algumas funções de pertinência necessitem repetir seus valores durante um intervalo maior no domínio da variável. O controlador *fuzzy* tem duas variáveis de entrada, erro e derivada do erro, e uma variável de saída, altura. Para a variável erro foram definidas 5 funções pertinência, para a variável derivada do erro foram definidas 5 funções pertinência e para a variável altura foram definidas 7 funções pertinência, o número de funções pertinência para cada variável foram escolhidas para obter um resultado satisfatório, com um número menor de funções pertinência o resultado teria menor exatidão, prejudicando a análise dos resultados. A Tabela 6 mostra os nomes das variáveis de entrada e saída.

**Tabela 6 – Funções pertinência das variáveis de entrada e saída**

<b>Função pertinência da variável "erro"</b>	<b>Função pertinência da variável "derro"</b>	<b>Funções pertinência da variável "altura"</b>
NB	NB	NB
NS	NS	NM
Z	Z	NS
PS	PS	Z
PB	PB	PS
		PM
		PB

**Fonte: Autoria própria**

O domínio de cada variável escolhida foi adequado de acordo com os testes

feitos em simulação observando o erro e a derivada do erro máxima, o domínio de cada variável pode ser observado na Tabela 7.

**Tabela 7 – Domínio para cada variável**

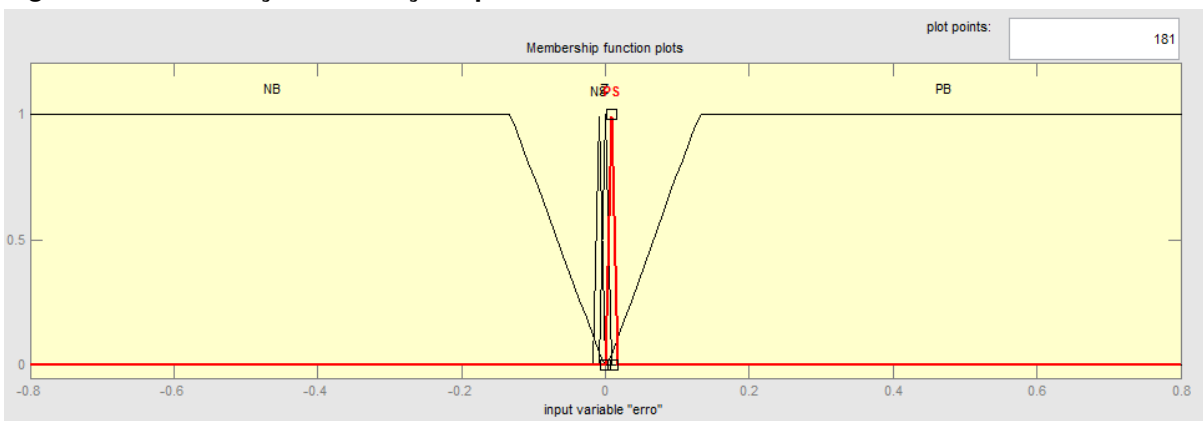
erro	[-0,8 0,8]
derro	[-0.0111 0.0111]
altura	[0 1]

**Fonte: Autoria própria**

A distribuição das funções de pertinência foram adequadas de acordo com a resposta observada na simulação, conforme a resposta obtida foram mudadas a forma da função pertinência e seus pontos no domínio.

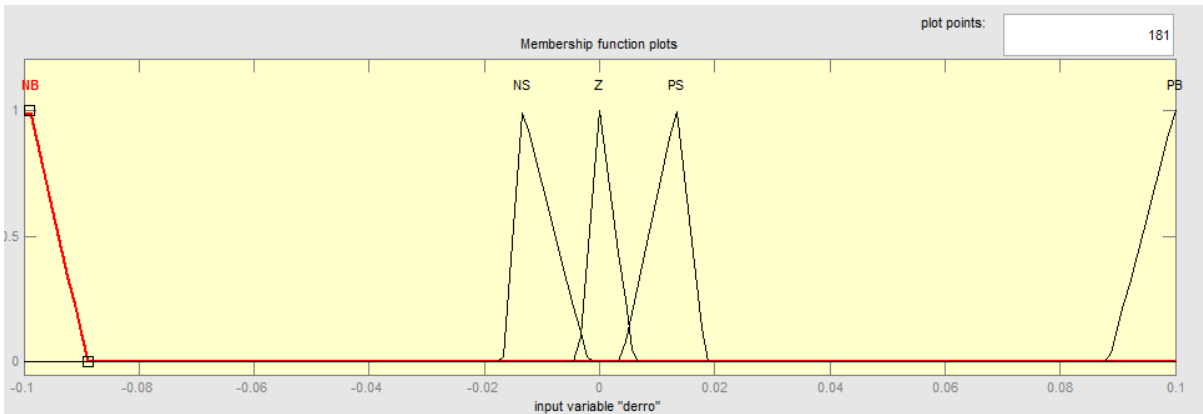
As Figura 25, Figura 26 e Figura 27 mostram as variáveis erro, derivada do erro e altura, respectivamente, com a distribuição de suas funções pertinência.

**Figura 25 – Distribuição das funções pertinência da varável erro**



**Fonte: Autoria Própria**

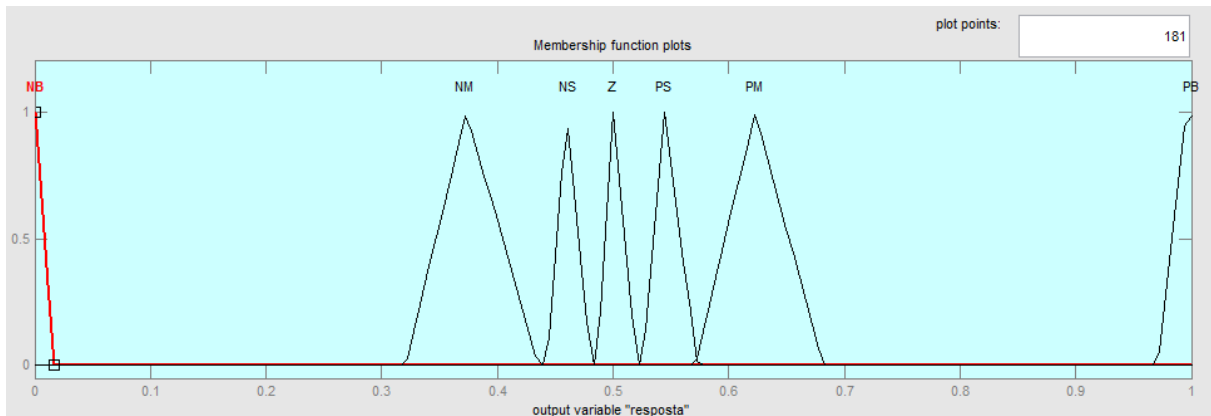
**Figura 26 – Distribuição das funções pertinência da varável derivada do erro**



**Fonte: Autoria Própria**

As regras para o controlador fuzzy podem ser observadas na Tabela 8.

Figura 27 – Distribuição das funções pertinência da varável altura



Fonte: Autoria Própria

Tabela 8 – Regras utilizadas para o controlador *fuzzy*

IF erro = NB	-	ENTÃO altura = NB
IF erro = NS	-	ENTÃO altura = NM
IF erro = Z	AND derro = NB	ENTÃO altura = NM
IF erro = Z	AND derro = NS	ENTÃO altura = NS
IF erro = Z	AND derro = Z	ENTÃO altura = Z
IF erro = Z	AND derro = PS	ENTÃO altura = PS
IF erro = Z	AND derro = PB	ENTÃO altura = PM
IF erro = PS	-	ENTÃO altura = PM
IF erro = PB	-	ENTÃO altura = PB

Fonte: Autoria própria

As regras foram montadas de acordo com o conhecimento do sistema. Quando o erro e a derivada do erro estiverem perto de zero significa que a altura está próxima da desejada, então a válvula deve manter-se de uma forma em que a vazão de entrada seja igual a vazão de saída para manter a altura definida inicialmente.





## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram aplicados dois métodos de controle para o sistema de nível, o controlador PID e o controlador *fuzzy*, que foram projetados em simulação e posteriormente aplicados na planta didática PD3 localizada no LSUP. Utilizando-se o *Matlab/Simulink* foi possível observar os resultados obtidos e efetuar sua análise de comportamento.

### 4.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

No *Matlab/Simulink* foi aplicado o controlador PID projetado via lugar das raízes, a Figura 28 mostra como o controlador foi construído no *Matlab/Simulink*.

Aplicando-se os valores das constantes  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  podem ser observadas as respostas para as altura desejadas. A Figura 29 mostra a resposta para as alturas de 0,5 e 0,7 metros.

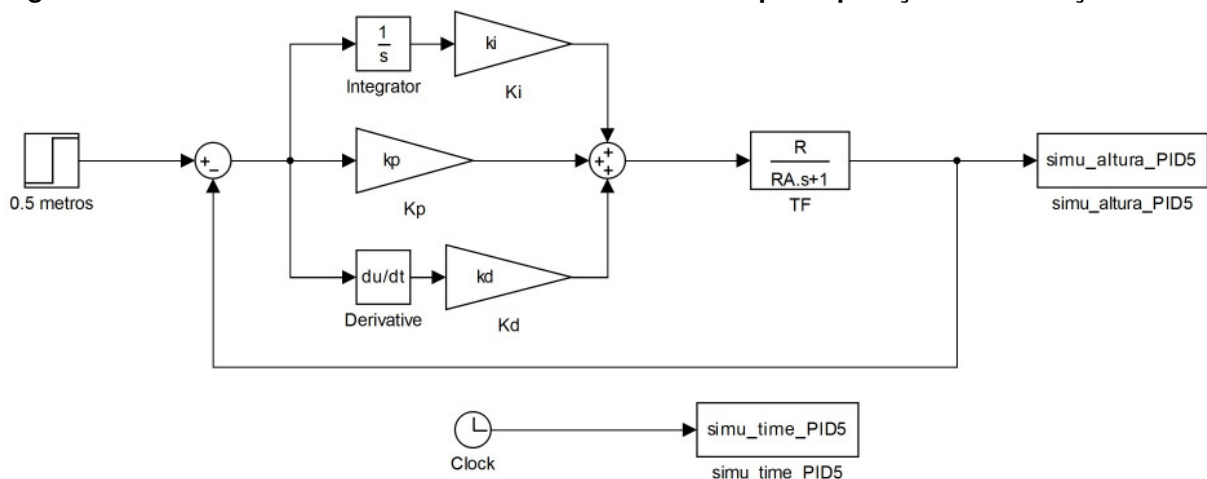
A Figura 29 mostra a similaridade dos resultados do controlador PID simulado para as alturas 0,5 e 0,7 metros.

Os esforços de controle para as alturas de 0,5 e 0,7 metros foram adquiridos para observar qual o esforço que o controlador PID faz para estabilizar na altura desejada. A Figura 30 mostra o esforço de controle para a altura de 0,5 metros.

A Figura 31 mostra o esforço de controle para a altura de 0,7 metros.

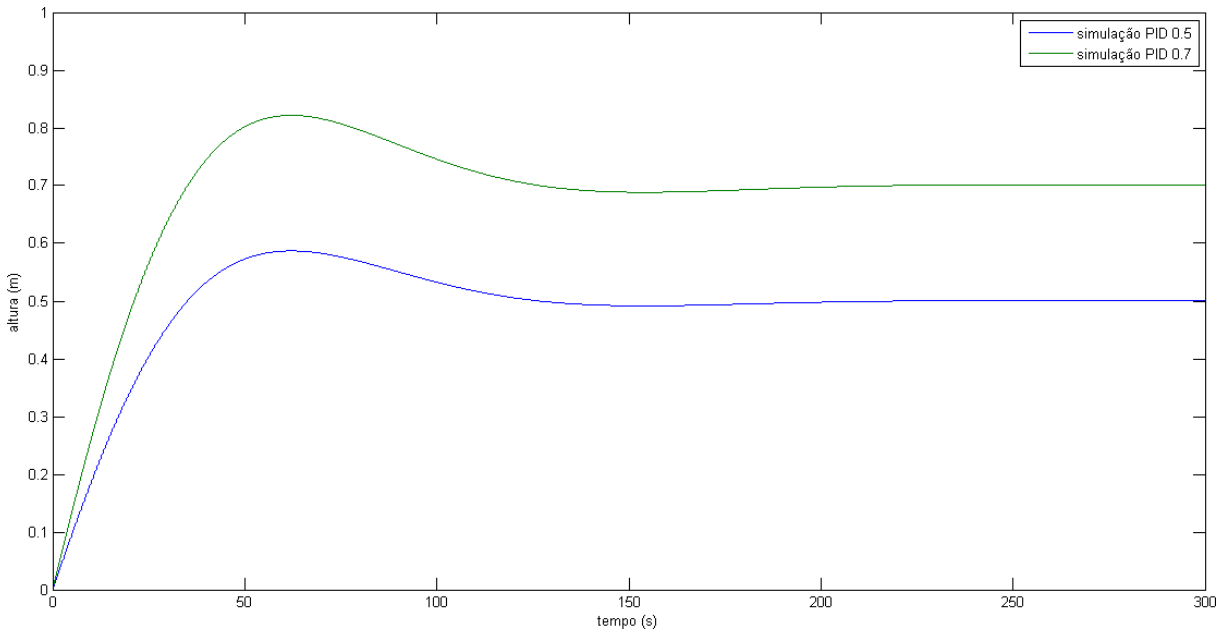
A Figura 30 e a Figura 31 mostram o modo que o controlador PID simulado atua na válvula de controle pneumática para que a altura desejada seja atingida.

Figura 28 – Controlador PID construído no *Matlab/Simulink* para aplicação na simulação



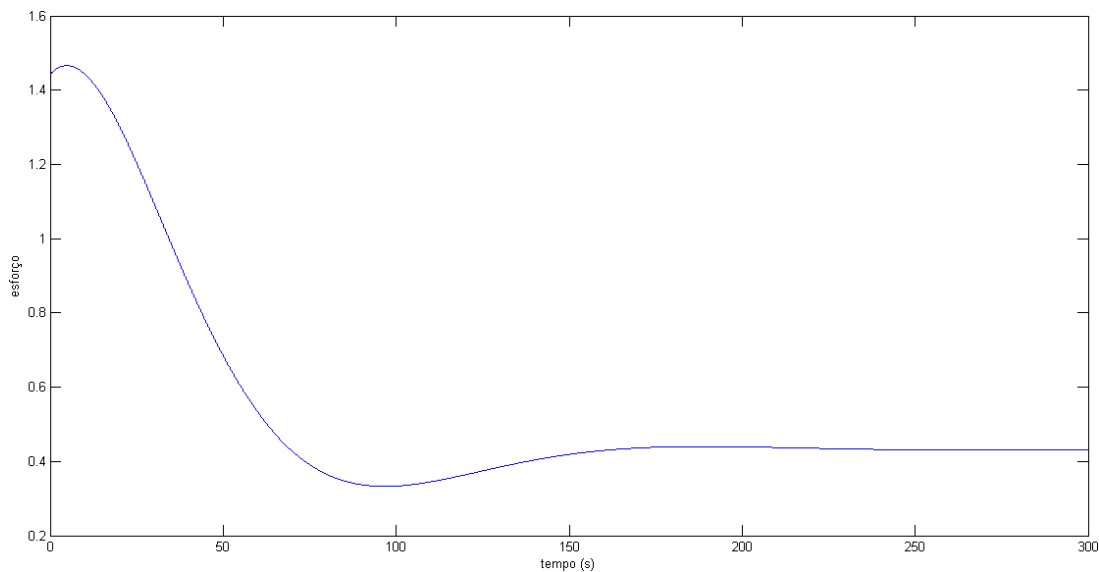
Fonte: Autoria Própria

**Figura 29 – Aplicação de uma altura de 0,5 e 0,7 metros para o controlador PID simulado**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 30 – Esforço de controle para o controlador PID simulado para uma altura de 0,5 metros**



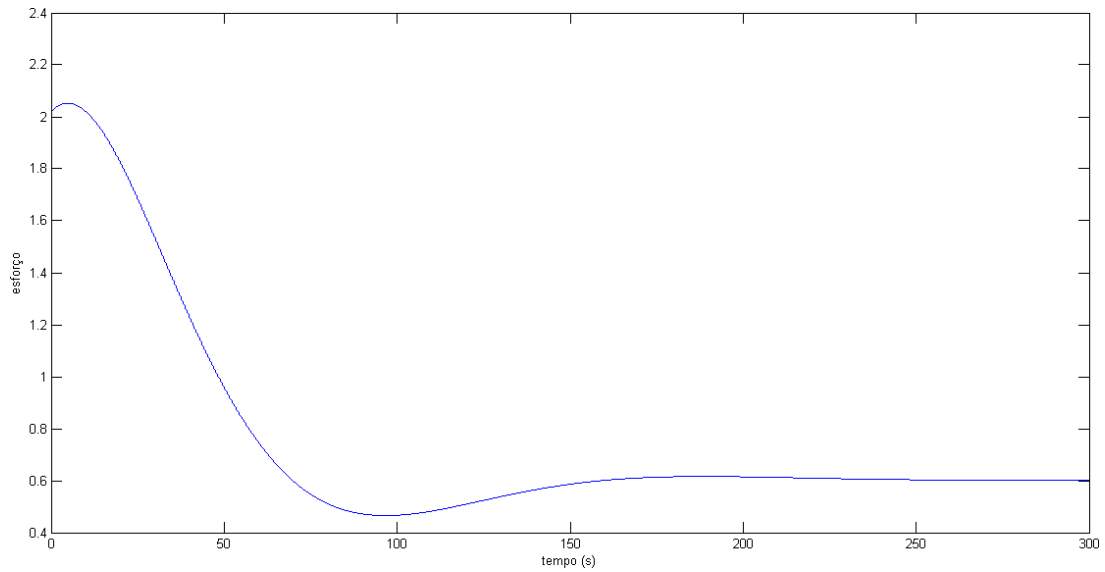
Fonte: Autoria Própria

A Figura 32 mostra a resposta com perturbação para o controlador PID simulado, a simulação foi iniciada com uma altura de 0,5 metros e no tempo 300 segundos foi colocada uma altura de 0,7 metros.

A Figura 32 mostra que o controlador PID simulado não apresenta erros mediante a aplicação de uma perturbação.

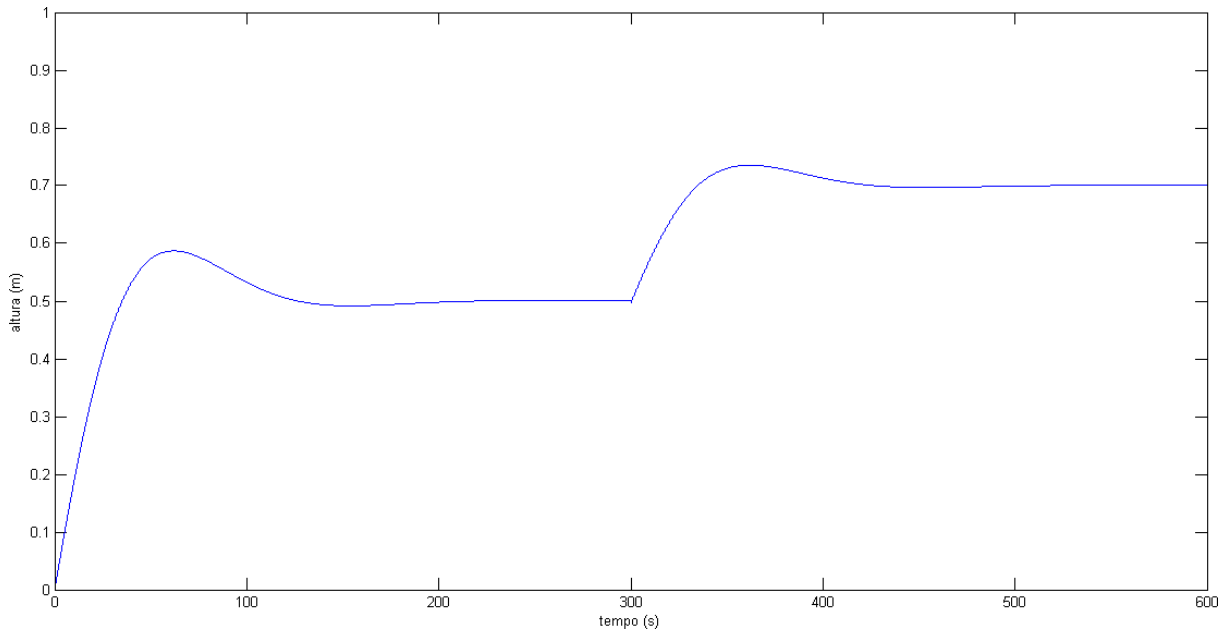
A construção desta simulação sofreu algumas alterações em relação a construção da Figura 28, estas alterações podem ser observadas na Figura 33.

**Figura 31 – Esforço de controle para o controlador PID simulado para uma altura de 0,7 metros**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 32 – Aplicação de uma perturbação para o controlador PID simulado**



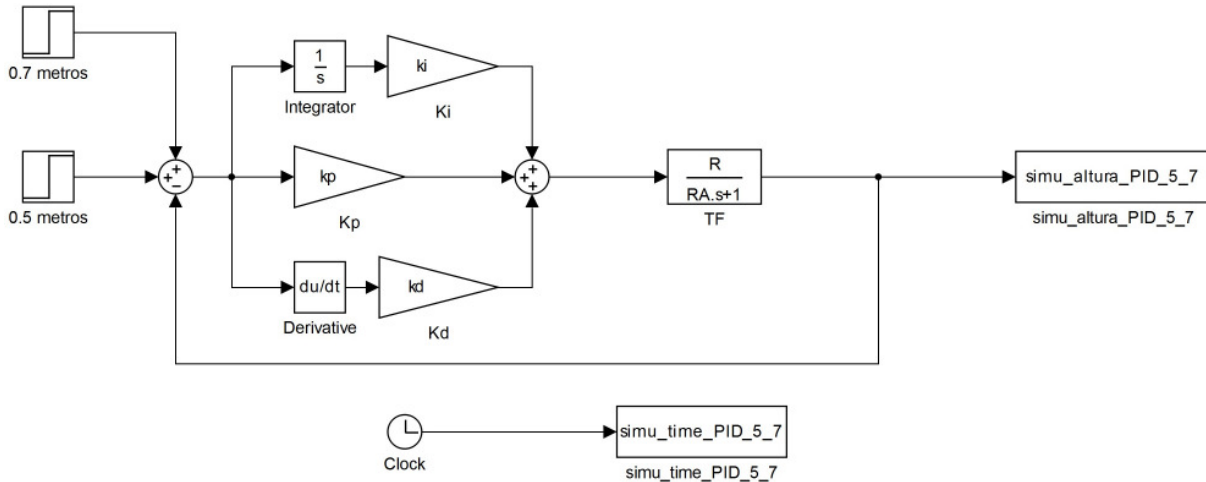
Fonte: Autoria Própria

O *Matlab/Simulink* mostra os resultados obtidos para a simulação do controlador PID para as alturas 0,5 e 0,7 metros como pode ser observado na Tabela 9.

No *Matlab/Simulink* foi aplicado o controlador *fuzzy*, a Figura 34 mostra como o controlador *fuzzy* foi construído.

A aplicação das alturas desejadas para o controlador *fuzzy* foram as mesmas aplicadas para o controlador PID. A Figura 35 mostra as repostas para as alturas 0,5 e 0,7 metros.

**Figura 33 – Alterações no Matlab/Simulink para aplicação da perturbação no controlador PID simulado**



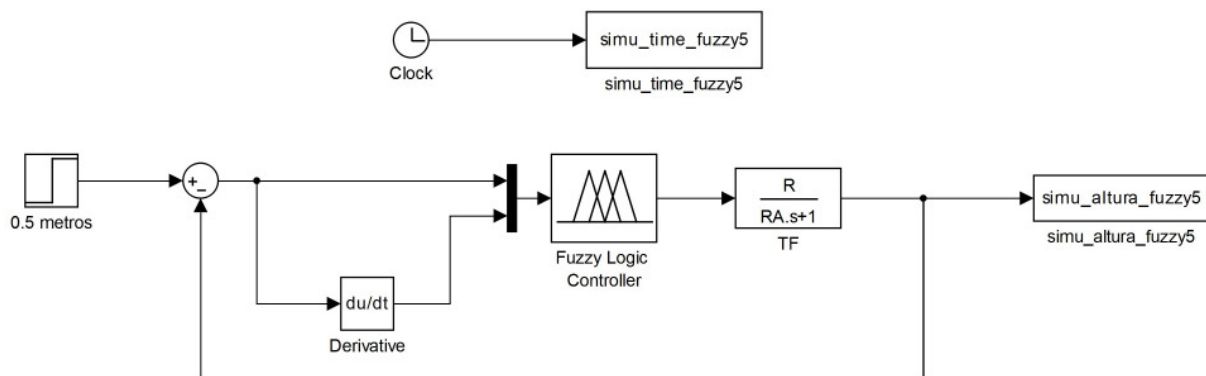
Fonte: Autoria Própria

**Tabela 9 – Resultados para o controlador PID simulado para as alturas de 0,5 e 0,7 metros**

Informação	0,5 metros	0,7 metros
Tempo de subida (s)	26,7209	26,7209
Tempo de estabilização (s)	115,979	115,979
Valor mínimo tempo de estabilização	0,4501	0,6301
Valor máximo tempo de estabilização	0,587	0,8218
Sobressinal (%)	17,3729	17,3729
Sobressinal inferior (%)	0	0
Valor de pico	0,587	0,8218
Tempo do valor de pico (s)	62,244	62,244

Fonte: Autoria própria

**Figura 34 – Controlador *fuzzy* construído no Matlab/Simulink para aplicação na simulação**

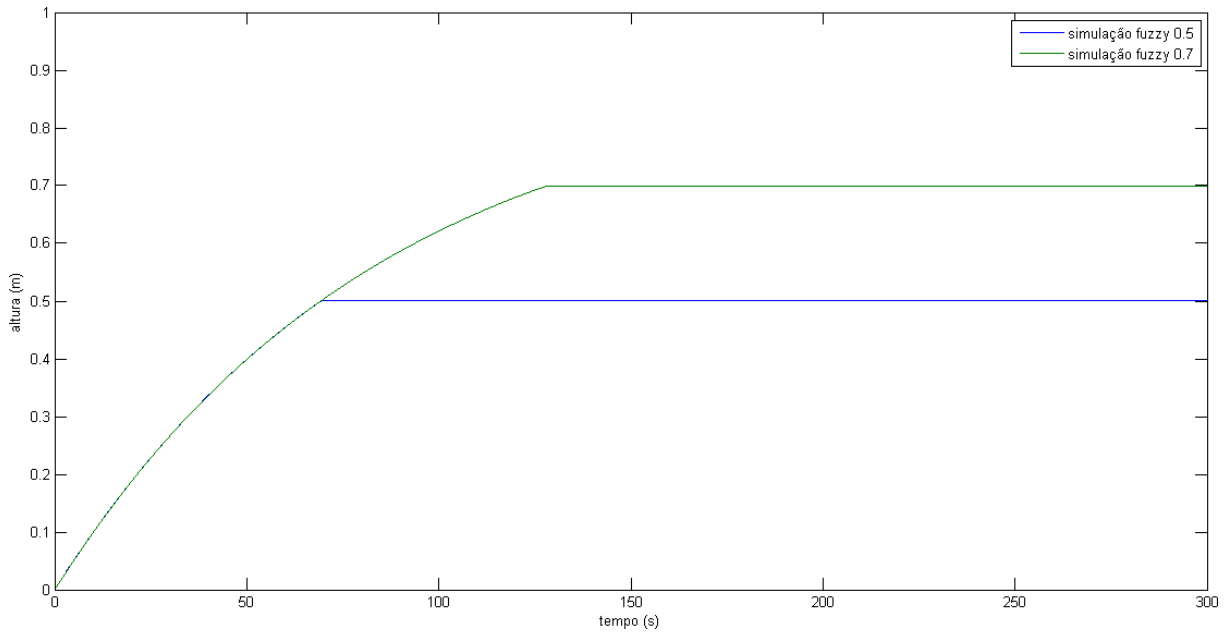


Fonte: Autoria Própria

A Figura 35 mostra a similaridade dos resultados do controlador *fuzzy* simulado para as alturas 0,5 e 0,7 metros.

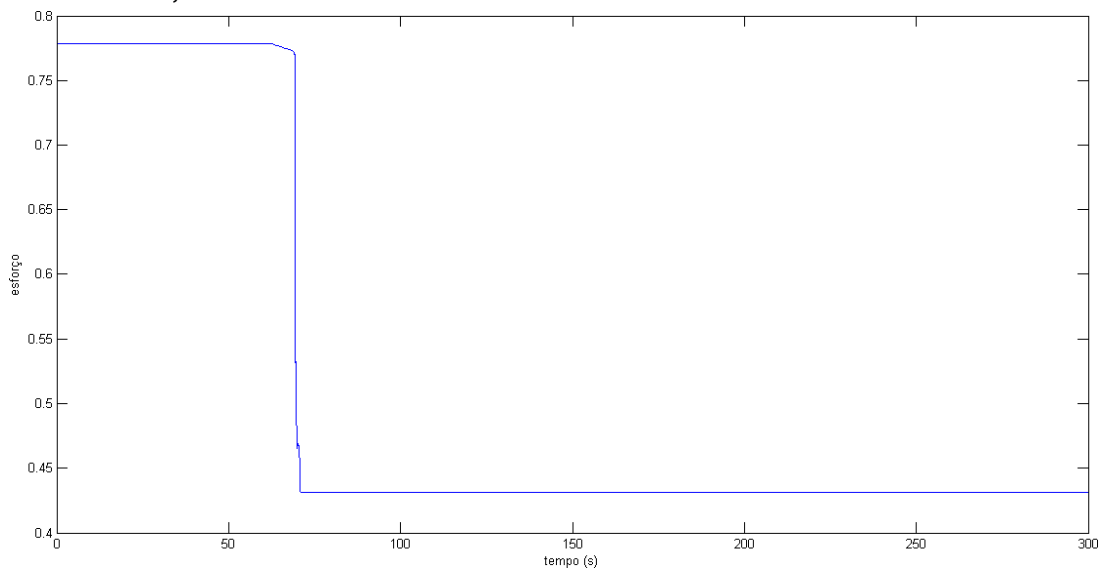
Os esforços de controle para as alturas de 0,5 e 0,7 metros foram adquiridos para observar qual o esforço que o controlador *fuzzy* faz para estabilizar na altura desejada. A Figura 36 mostra o esforço de controle para a altura 0,5 metros.

**Figura 35 – Aplicação de uma altura de 0,5 e 0,7 metros para o controlador *fuzzy* simulado**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 36 – Esforço de controle para o controlador *fuzzy* simulado para uma altura de 0,5 metros**



Fonte: Autoria Própria

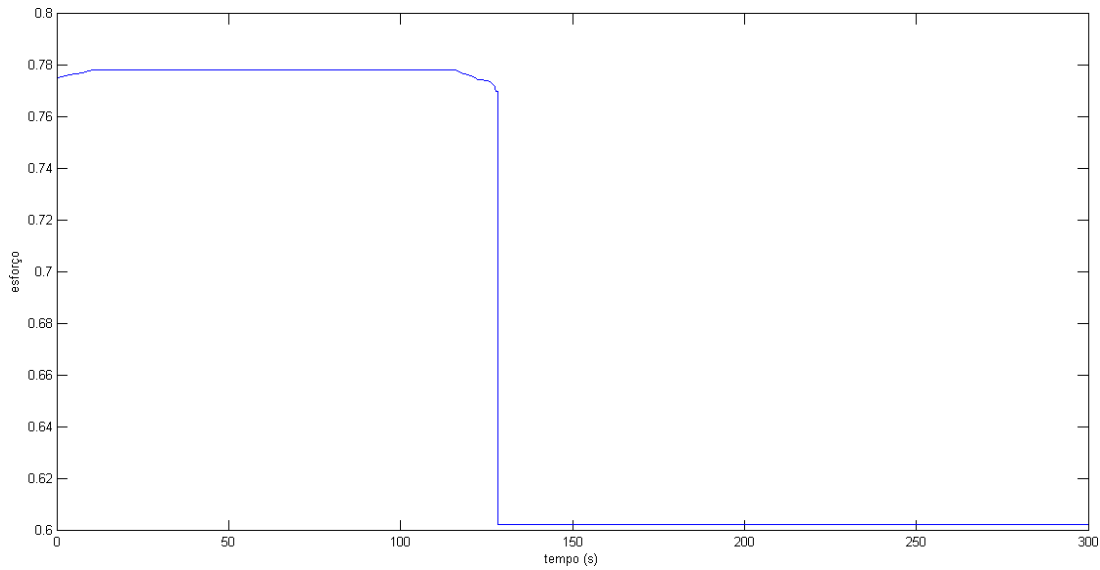
A Figura 37 mostra o esforço de controle para a altura 0,7 metros.

A Figura 36 e a Figura 37 mostram o modo que o controlador *fuzzy* simulado atua na válvula de controle pneumática para que a altura desejada seja atingida.

A Figura 38 mostra a resposta com perturbação para o controlador *fuzzy* simulado, a simulação foi iniciada com uma altura de 0,5 metros e no tempo 300 segundos foi colocada uma altura de 0,7 metros como foi feito para o controlador PID simulado.

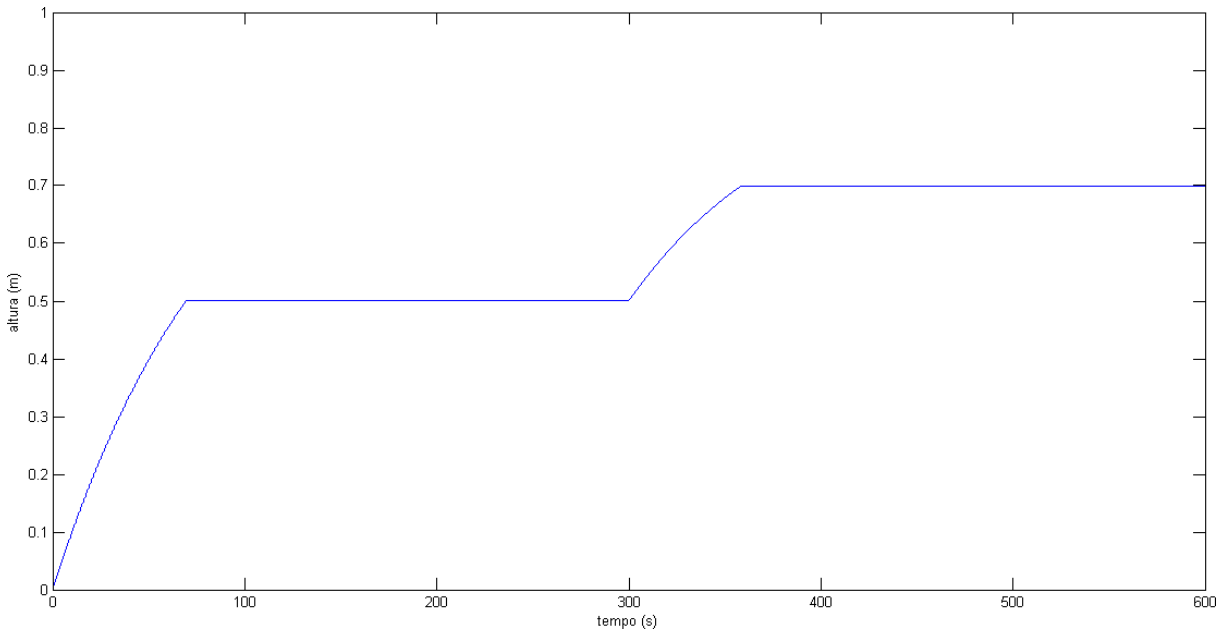
A Figura 38 mostra que o controlador *fuzzy* simulado não apresenta erros

**Figura 37 – Esforço de controle para o controlador *fuzzy* simulado para uma altura de 0,7 metros**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 38 – Aplicação de uma perturbação para o controlador *fuzzy* simulado**



Fonte: Autoria Própria

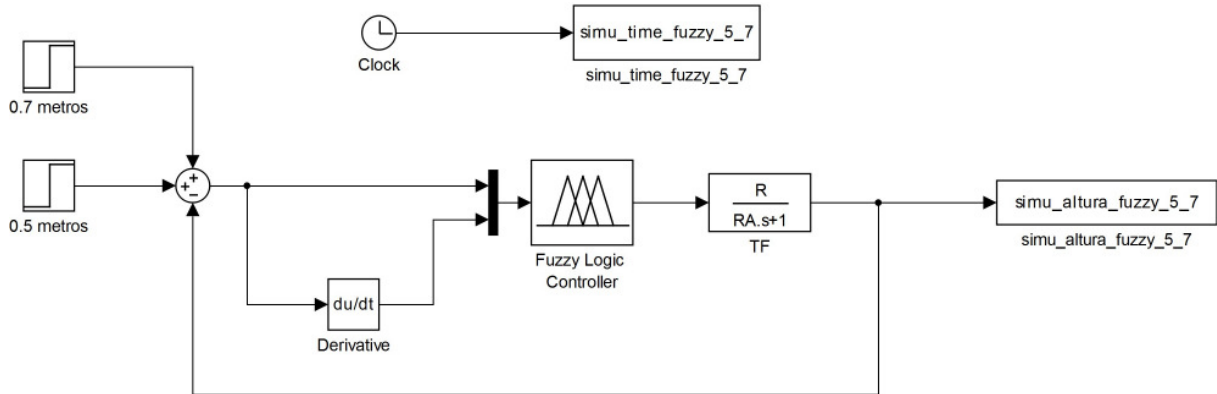
mediante a aplicação de uma perturbação.

A construção desta simulação sofreu algumas alterações em relação a construção da Figura 34, estas alterações podem ser observadas na Figura 39.

O *Matlab/Simulink* mostra os resultados obtidos para a simulação do controlador *fuzzy* para as alturas 0,5 e 0,7 metros como pode ser observado na Tabela 10.

Os resultados para os controladores PID e *fuzzy* simulados podem ser comparados para as alturas 0,5, e 0,7 metros e com perturbação. A comparação dos resulta-

**Figura 39 – Alterações no *Matlab/Simulink* para aplicação da perturbação no controlador *fuzzy* simulado**



Fonte: Autoria Própria

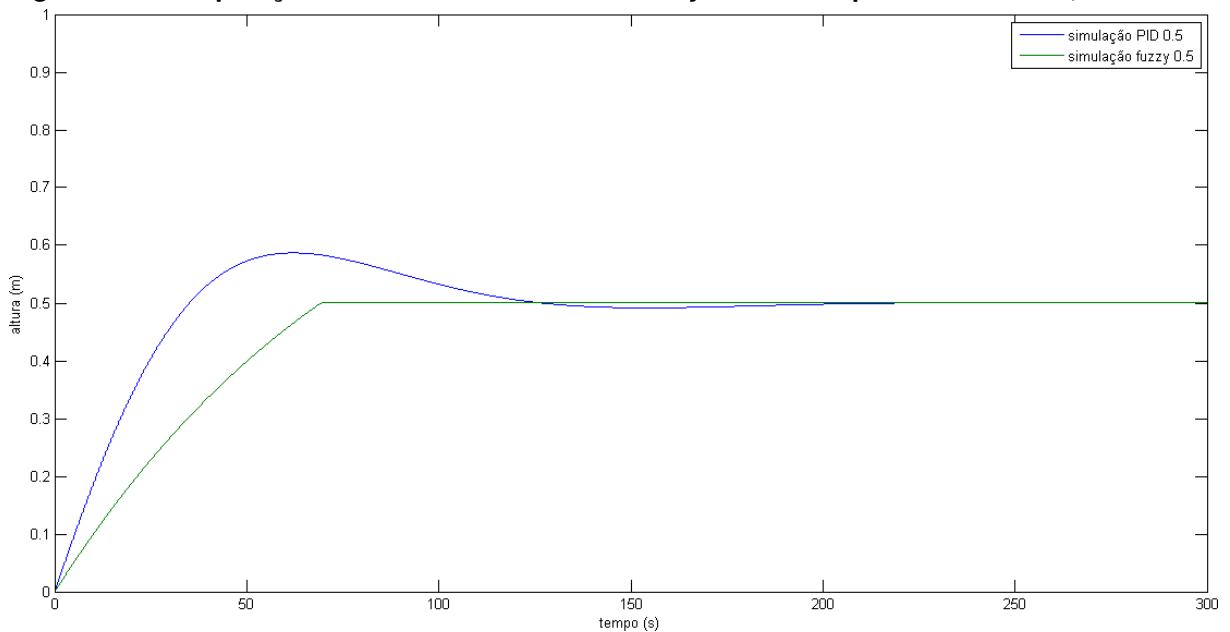
**Tabela 10 – Resultados para o controlador *fuzzy* simulado para as alturas de 0,5 e a,7 metros**

Informação	0,5 metros	0,7 metros
Tempo de subida (s)	54,4826	95,7009
Tempo de estabilização (s)	67,3749	122,3615
Valor mínimo tempo de estabilização	0,4505	0,6295
Valor máximo tempo de estabilização	0,5006	0,6994
Sobressinal (%)	0	0
Sobressinal inferior (%)	0	0
Valor de pico	0,5006	0,6994
Tempo do valor de pico (s)	71,9350	128,7270

Fonte: Autoria própria

dos PID e *fuzzy* simulados para a altura 0,5 metros pode ser observado na Figura 40.

**Figura 40 – Comparação dos controladores PID e *fuzzy* simulados para a altura de 0,5 metros**



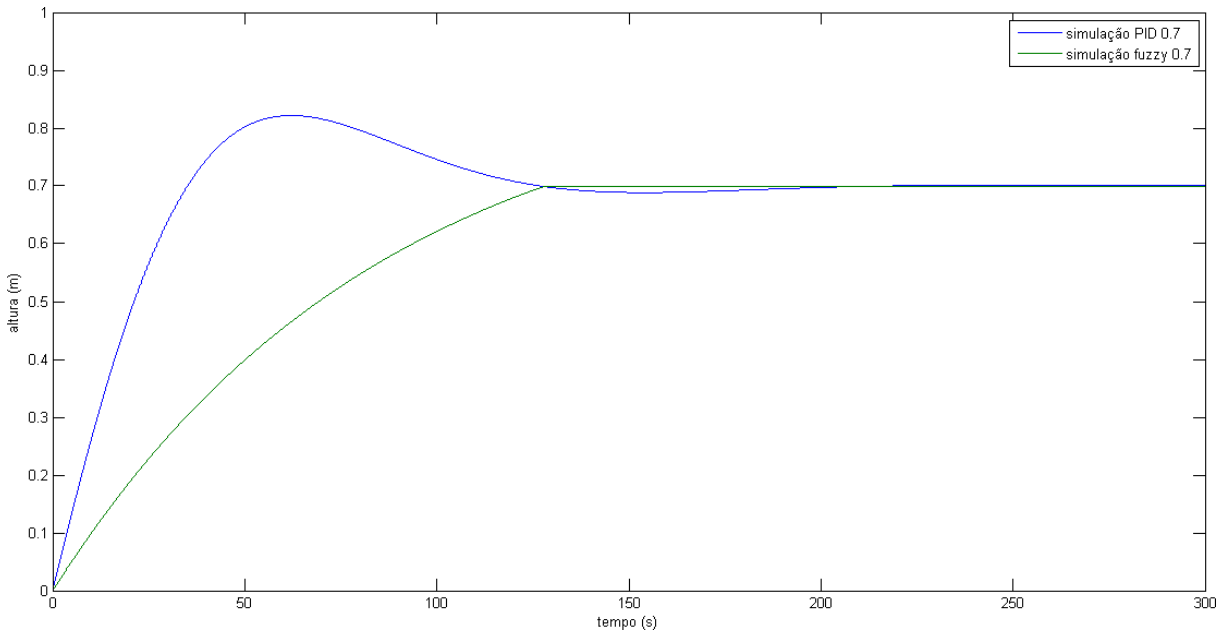
Fonte: Autoria Própria

A comparação dos resultados PID e *fuzzy* simulados para a altura 0,7 metros



pode ser observado na Figura 41.

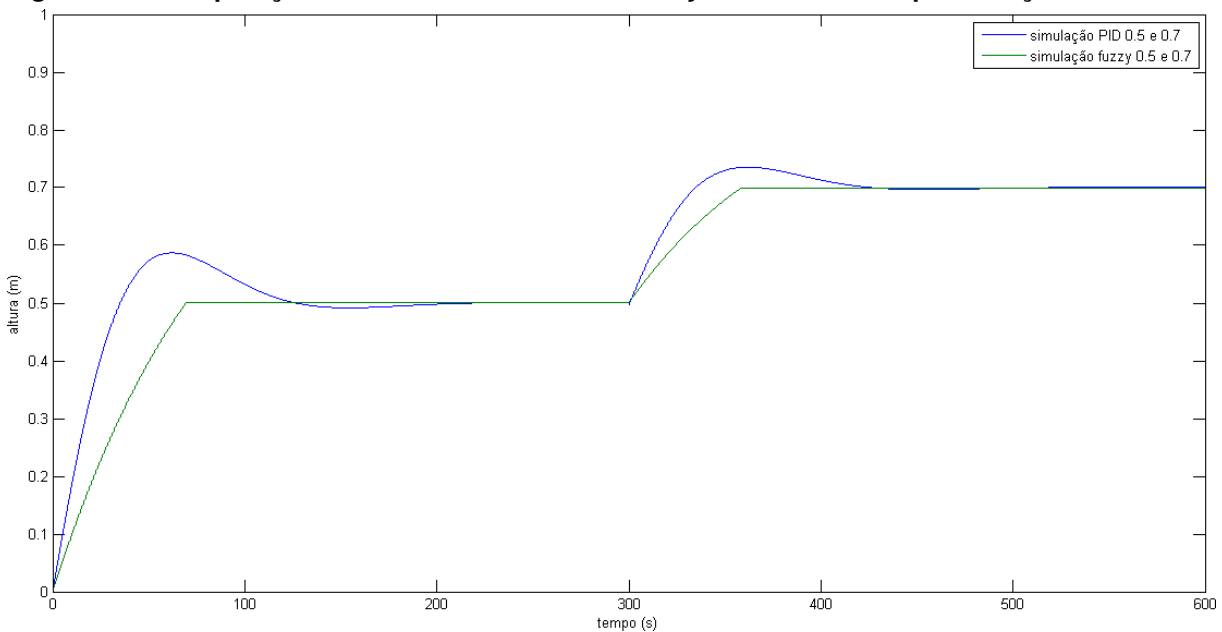
**Figura 41 – Comparação dos controladores PID e *fuzzy* simulados para a altura de 0,7 metros**



**Fonte: Autoria Própria**

A comparação dos resultados PID e *fuzzy* simulados com perturbação pode ser observado na Figura 42.

**Figura 42 – Comparação dos controladores PID e *fuzzy* simulados com perturbação**



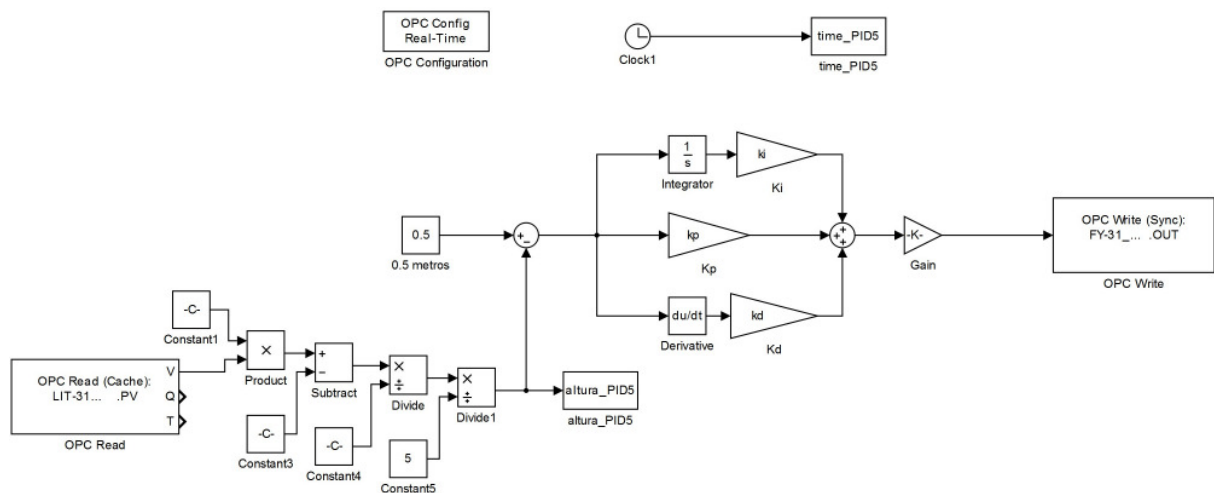
**Fonte: Autoria Própria**

As figuras Figura 40, Figura 41 e Figura 42 mostram que o controlador *fuzzy* apresenta melhores resultados em comparação com o controlador PID, pois o controlador *fuzzy* não apresenta sobre sinal e apresenta um tempo de estabilização menor.

## 4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com os resultados das simulações obtidos pode ser feita a aplicação dos controladores PID e *fuzzy* na planta didática PD3 localizada no Laboratório de Sistemas Supervisórios – LSUP. Com o auxílio do *Matlab/Simulink* foi construído o controlador PID para ser aplicado à planta Didática PD3, a Figura 43 mostra como foi aplicado o controlador PID através do *Matlab/Simulink*, foram utilizados os blocos *OPC Read*, *OPC Write* e *OPC Configuration* para a integração da planta didática PD3 com o *Matlab/Simulink*.

**Figura 43 – Controlador PID construído no *Matlab/Simulink* para aplicação na planta didática PD3**



**Fonte: Autoria Própria**

Foram feitas as mesmas aplicações de altura e perturbação aplicadas para as simulações, com as alturas 0,5 e 0,7 metros, os resultados podem ser observados na Figura 44

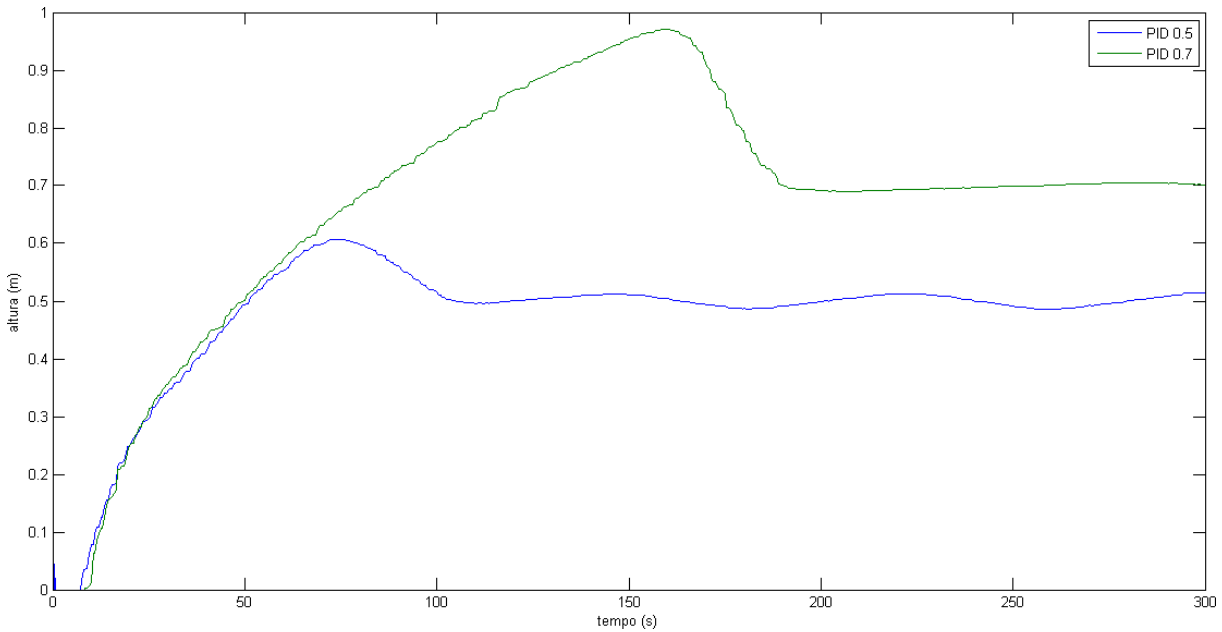
A Figura 44 mostra a similaridade dos resultados do controlador PID aplicado a planta didática PD3 para as alturas 0,5 e 0,7 metros.

Os esforços de controle para as alturas de 0,5 e 0,7 metros foram adquiridos para observar qual o esforço que o controlador PID faz para estabilizar na altura desejada. A Figura 45 mostra o esforço de controle para a altura 0,5 metros.

A Figura 46 mostra o esforço de controle para a altura 0,5 metros.

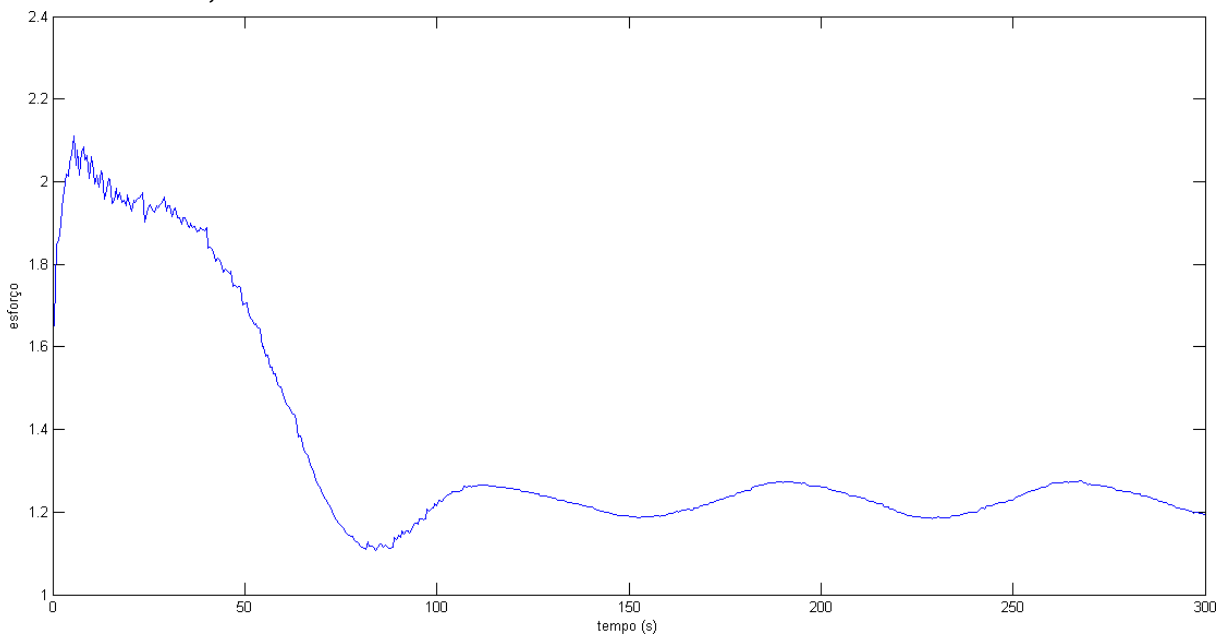
A Figura 45 e a Figura 46 mostram o modo que o controlador PID aplicado na planta didática PD3 atua na válvula de controle pneumática para que a altura desejada seja atingida.

**Figura 44 – Aplicação das alturas 0,5 e 0,7 metros para o controlador PID da planta didática PD3**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 45 – Esforço de controle para o controlador PID na planta didática PD3 para uma altura de 0,5 metros**

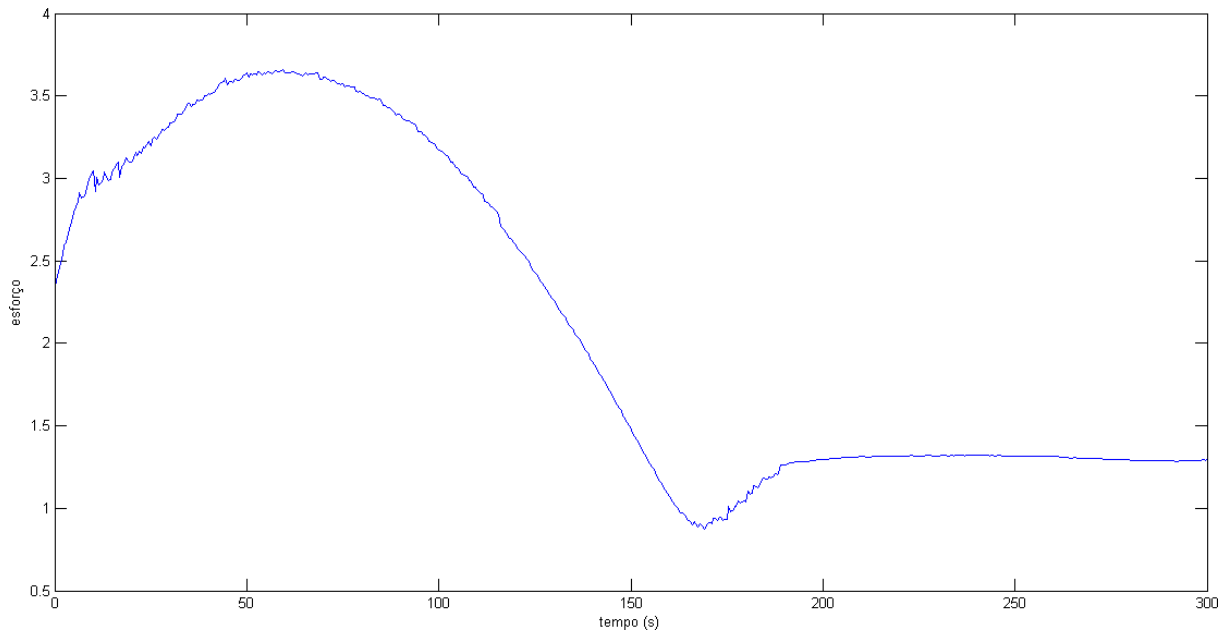


Fonte: Autoria Própria

Para os resultados dos esforços de controle do controlador PID da Figura 45 e da Figura 46 foi colocado um ganho na saída do controlador como pode ser observado na Figura 43. Foi observado o valor máximo do esforço de controle sem o ganho e com este valor foi calculado um valor para que o ganho chegasse a um valor próximo a abertura máxima da válvula de controle, o valor do ganho calculado foi 72,52.

A Figura 47 mostra a resposta com perturbação para o controlador PID na

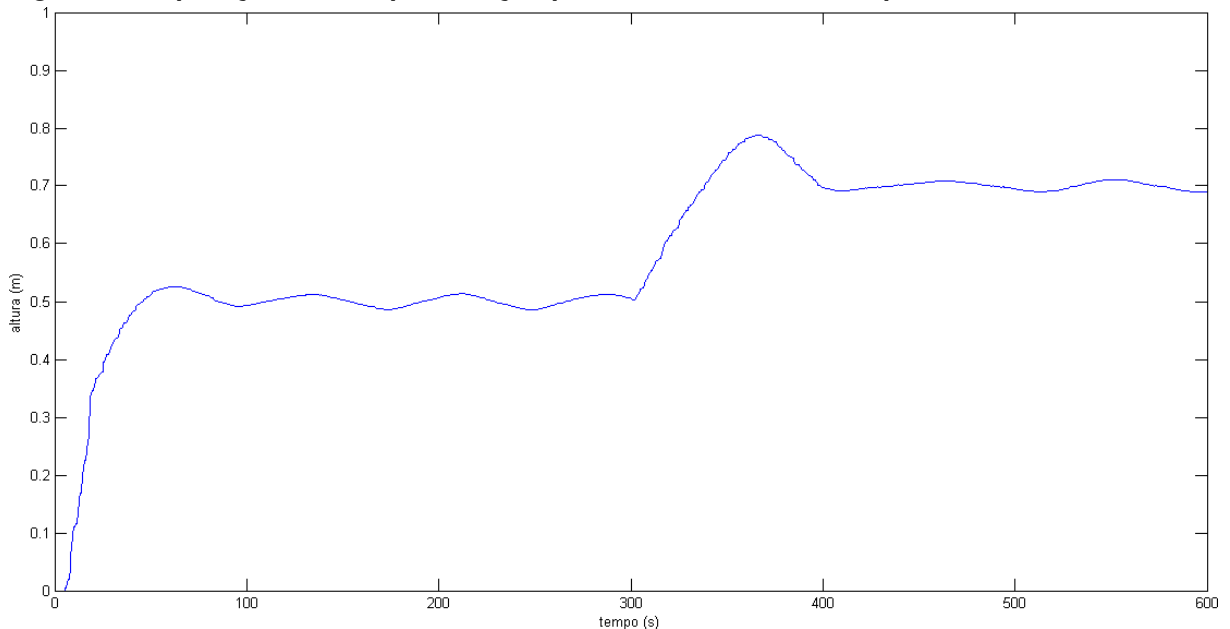
**Figura 46 – Esforço de controle para o controlador PID na planta didática PD3 para uma altura de 0,7 metros**



**Fonte: Autoria Própria**

planta didática PD3. O controle foi iniciado com uma altura de 0,5 metros e no tempo 300 segundos foi colocada uma altura de 0,7 metros.

**Figura 47 – Aplicação de uma perturbação para o controlador PID na planta didática PD3**



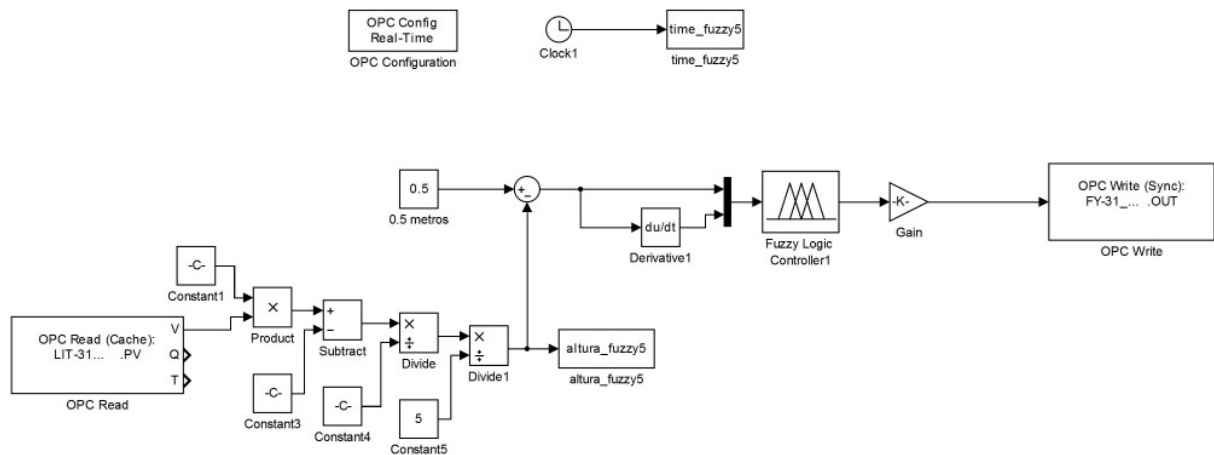
**Fonte: Autoria Própria**

A Figura 47 mostra que o controlador PID aplicado na planta didática PD3 não apresenta erros mediante a aplicação de uma perturbação.

A construção deste controle sofreu algumas alterações em relação a construção da Figura 43, estas alterações podem ser observadas na Figura 48.

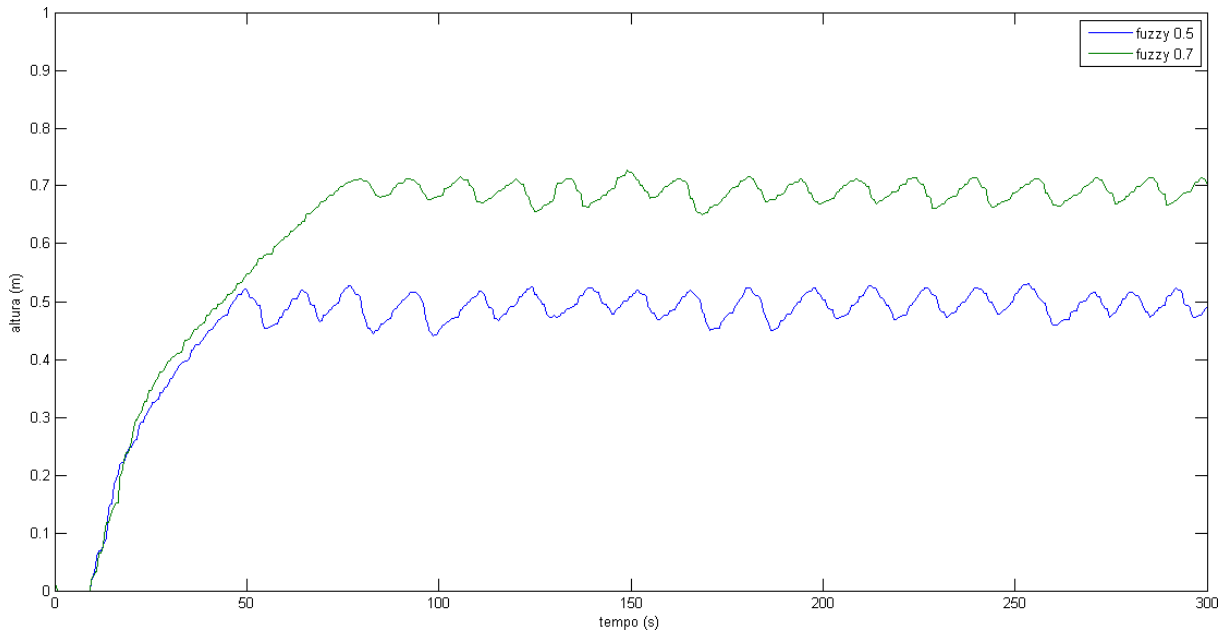


**Figura 49 – Controlador *fuzzy* construído no *Matlab/Simulink* para aplicação na planta didática PD3**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 50 – Aplicação das alturas de 0,5 e 0,7 metros para o controlador *fuzzy* da planta didática PD3**



Fonte: Autoria Própria

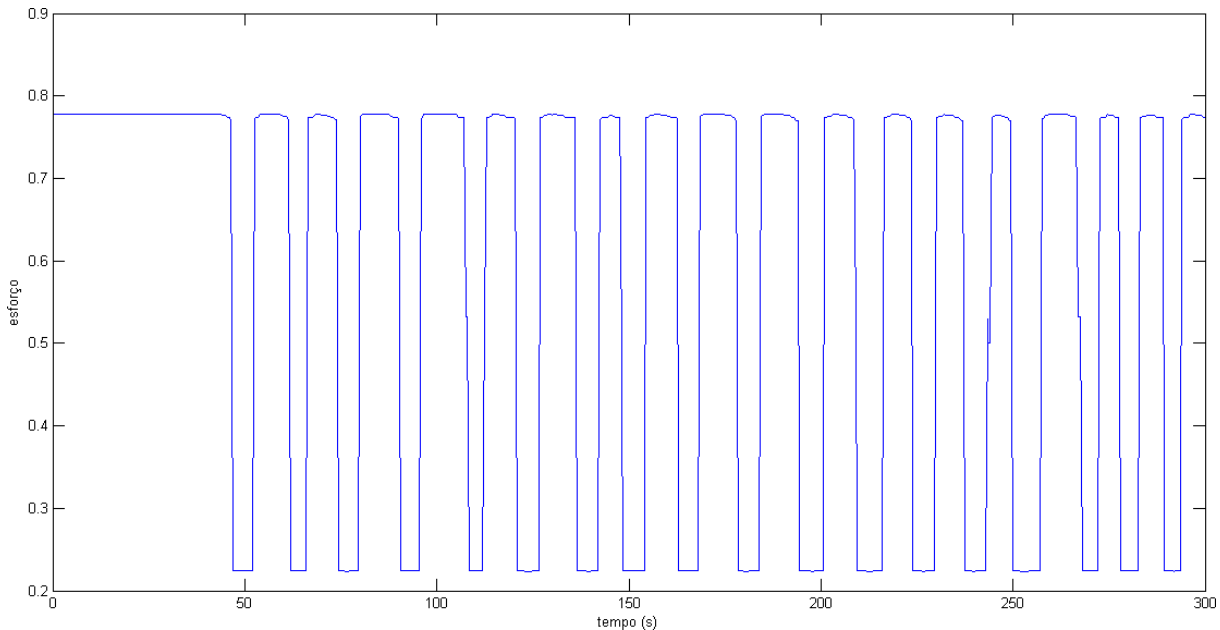
para observar qual o esforço que o controlador *fuzzy* faz para estabilizar na altura desejada. A Figura 51 mostra o esforço de controle para a altura 0,5 metros.

A Figura 52 mostra o esforço de controle para a altura 0,7 metros.

A Figura 51 e a Figura 52 mostram o modo que o controlador *fuzzy* simulado atua na válvula de controle pneumática para que a altura desejada seja atingida.

Para os resultados dos esforços de controle do controlador *fuzzy* da Figura 51 e da Figura 52 foi colocado um ganho na saída do controlador como pode ser observado na Figura 49. Foi observado o valor máximo do esforço de controle sem o ganho e com este valor foi calculado um valor para que o ganho chegasse a um valor próximo

**Figura 51 – Esforço de controle para o controlador *fuzzy* na planta didática PD3 para uma altura de 0,5 metros**



**Fonte: Autoria Própria**

a abertura máxima da válvula de controle, o valor do ganho calculado foi 100,715.

A Figura 53 mostra a resposta com perturbação para o controlador *fuzzy* na planta didática PD3. O controle foi iniciado com uma altura de 0,5 metros e no tempo 300 segundos foi colocada uma altura de 0,7 metros.

A Figura 47 mostra que o controlador *fuzzy* aplicado na planta didática PD3 não apresenta erros mediante a aplicação de uma perturbação.

A construção deste controle sofreu algumas alterações em relação a construção da Figura 49, estas alterações podem ser observadas na Figura 54.

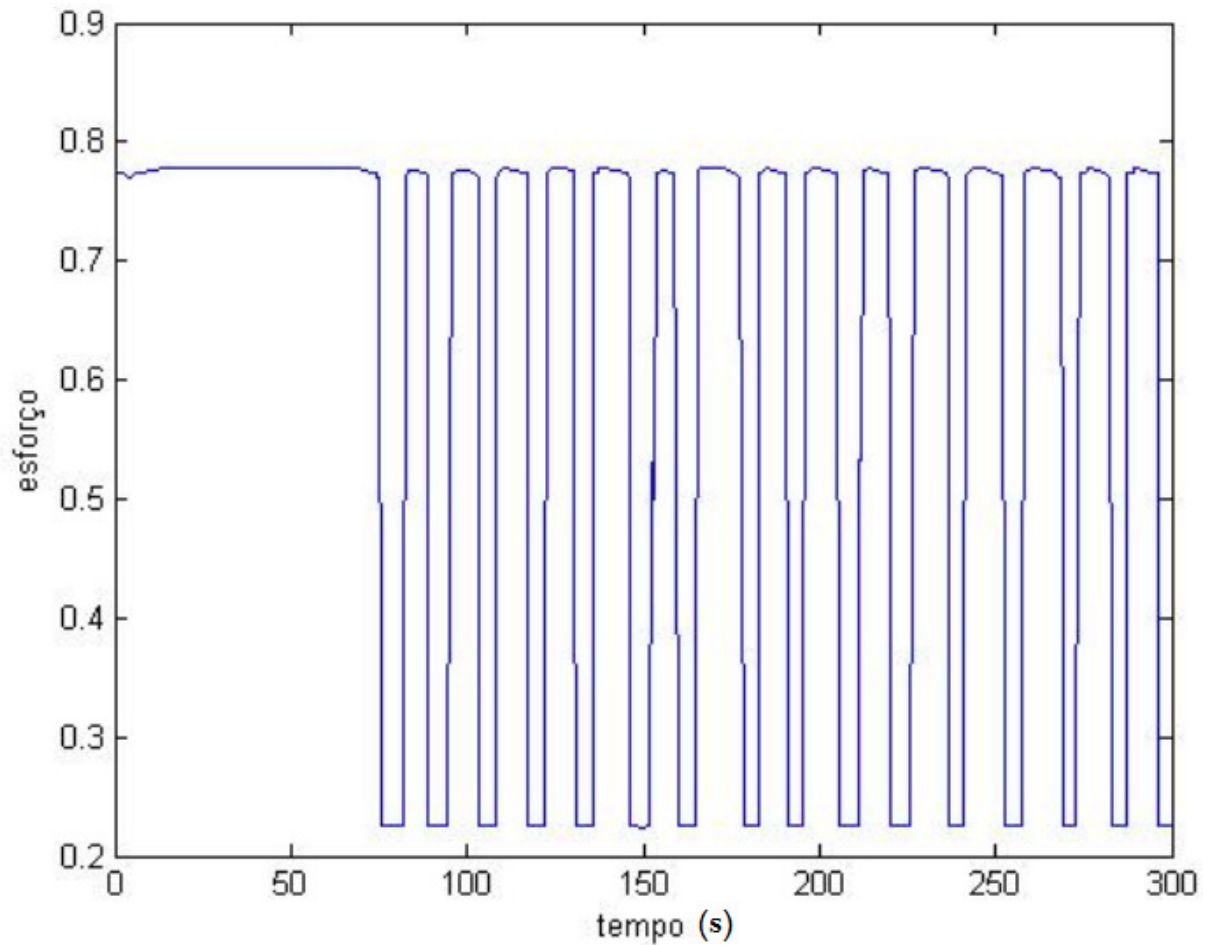
O *Matlab/Simulink* mostra os resultados obtidos na planta didática PD3 do controlador *fuzzy* para as alturas 0,5 e 0,7 metros como pode ser observado na Tabela 12

Os resultados para os controladores PID e *fuzzy* aplicados na planta didática PD3 podem ser comparados para as alturas 0,5, e 0,7 metros e com perturbação. A comparação dos resultados PID e *fuzzy* aplicados na planta didática PD3 para a altura 0,5 metros pode ser observado na Figura 55.

A comparação dos resultados PID e *fuzzy* na planta didática PD3 para a altura 0,7 metros pode ser observado na Figura 56.

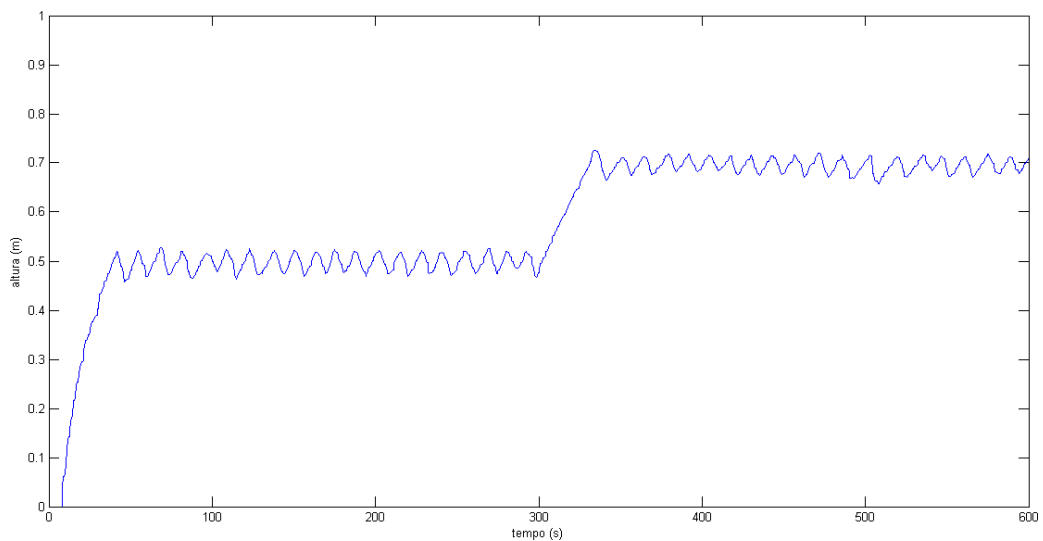
A comparação dos resultados PID e *fuzzy* na planta didática PD3 com perturbação pode ser observado na Figura 57.

Figura 52 – Esforço de controle para o controlador *fuzzy* na planta didática PD3 para uma altura de 0,7 metros



Fonte: Autoria Própria

Figura 53 – Aplicação de uma perturbação para o controlador *fuzzy* na planta didática PD3

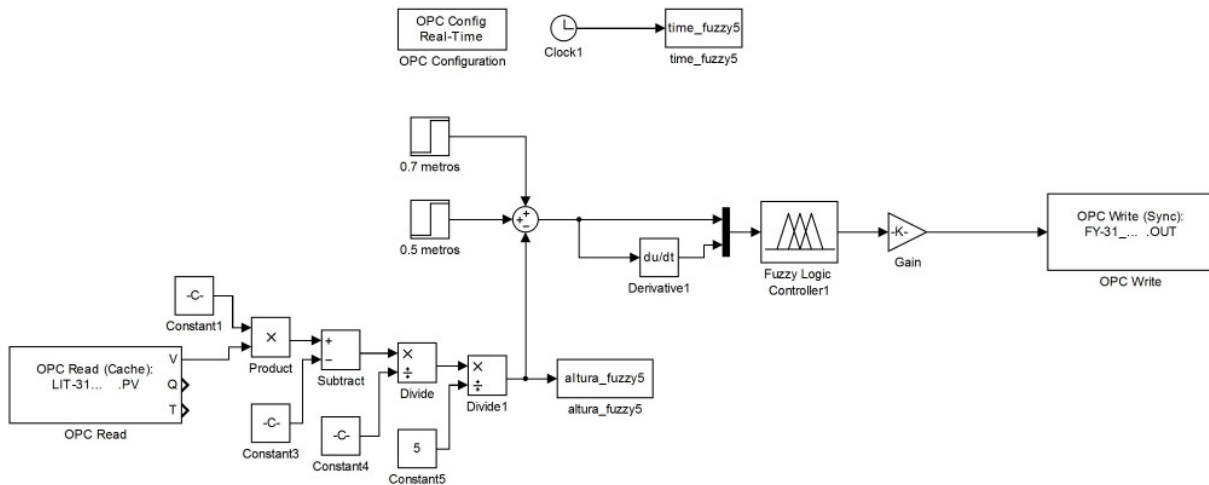


Fonte: Autoria Própria

A Figura 55, Figura 56 e Figura 57 mostram que o controlador *fuzzy* apresenta melhores resultados em comparação com o controlador PID.



**Figura 54 – Alterações no *Matlab/Simulink* para aplicação da perturbação no controlador *fuzzy* na planta didática PD3**



Fonte: Autoria Própria

**Tabela 12 – Resultados para o controlador *fuzzy* na planta didática PD3 para as alturas de 0,5 e 0,7 metros**

Informação	0,5 metros	0,7 metros
Tempo de subida (s)	31.1468	51.3273
Tempo de estabilização (s)	55	80
Valor mínimo tempo de estabilização	0.4389	0.6379
Valor máximo tempo de estabilização	0.5304	0.7272
Sobressinal (%)	7.8915	3.5285
Sobressinal inferior (%)	18.7552	12.8265
Valor de pico	0.5304	0.7272
Tempo do valor de pico (s)	57	83

Fonte: Autoria própria

#### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO E DA APLICAÇÃO NA PLANTA DIDÁTICA PD3

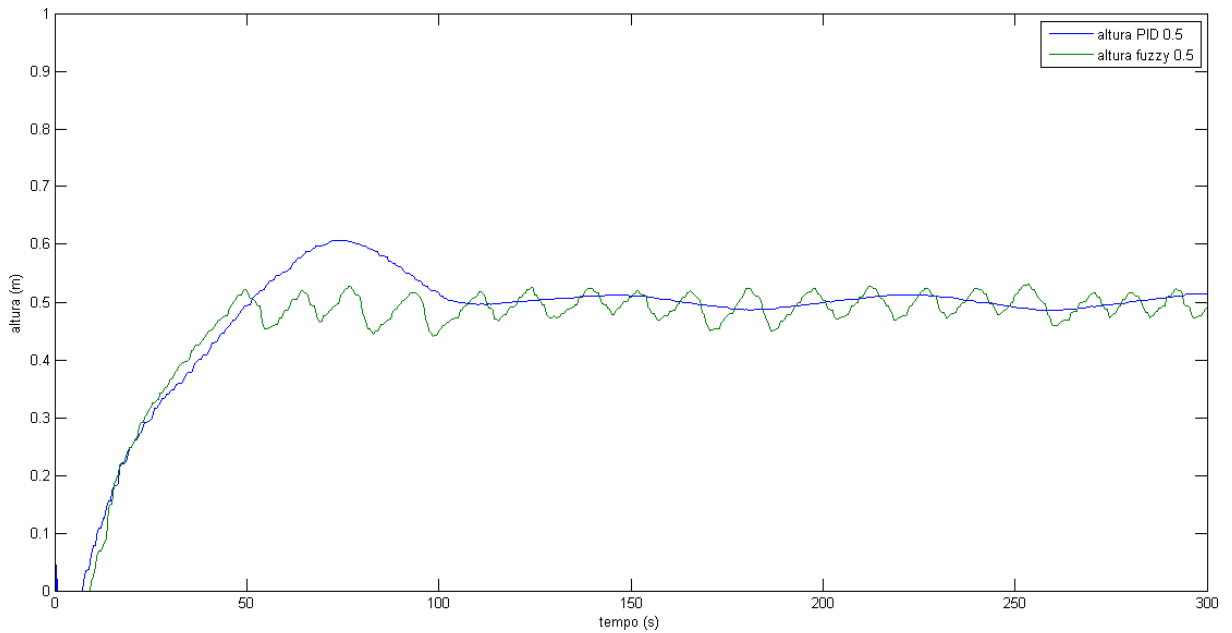
Os resultados das simulações e da aplicação na planta didática PD3 dos controladores PID e *fuzzy* podem ser comparados, com o auxílio do *Matlab/Simulink* podem ser plotadas as respostas obtidas para as alturas 0,5 metros, 0,7 metros e com perturbação.

A Figura 58 mostra a comparação dos resultados em simulação e na planta didática PD3 para a altura de 0,5 metros para o controlador PID.

A Figura 59 mostra a comparação dos resultados em simulação e na planta didática PD3 para a altura de 0,7 metros para o controlador PID.

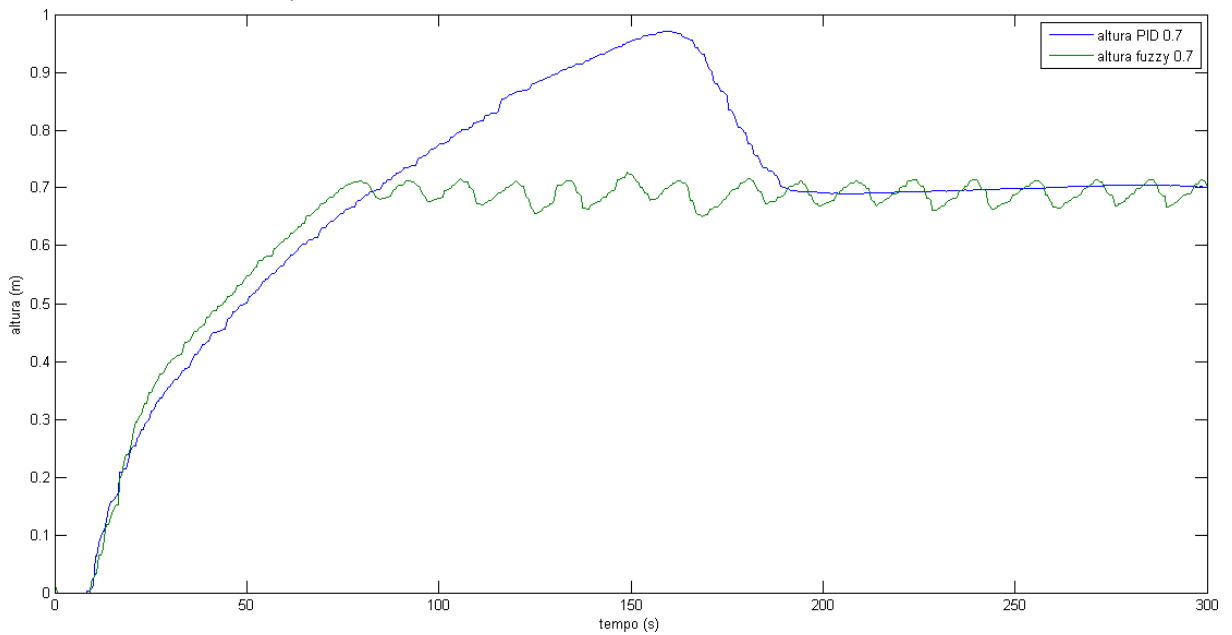
A Figura 60 mostra a comparação dos resultados em simulação e na planta didática PD3 para uma perturbação para o controlador PID.

**Figura 55 – Comparação dos controladores PID e *fuzzy* aplicados na planta didática PD3 para a altura de 0,5 metros**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 56 – Comparação dos controladores PID e *fuzzy* aplicados na planta didática PD3 para a altura de 0,7 metros**



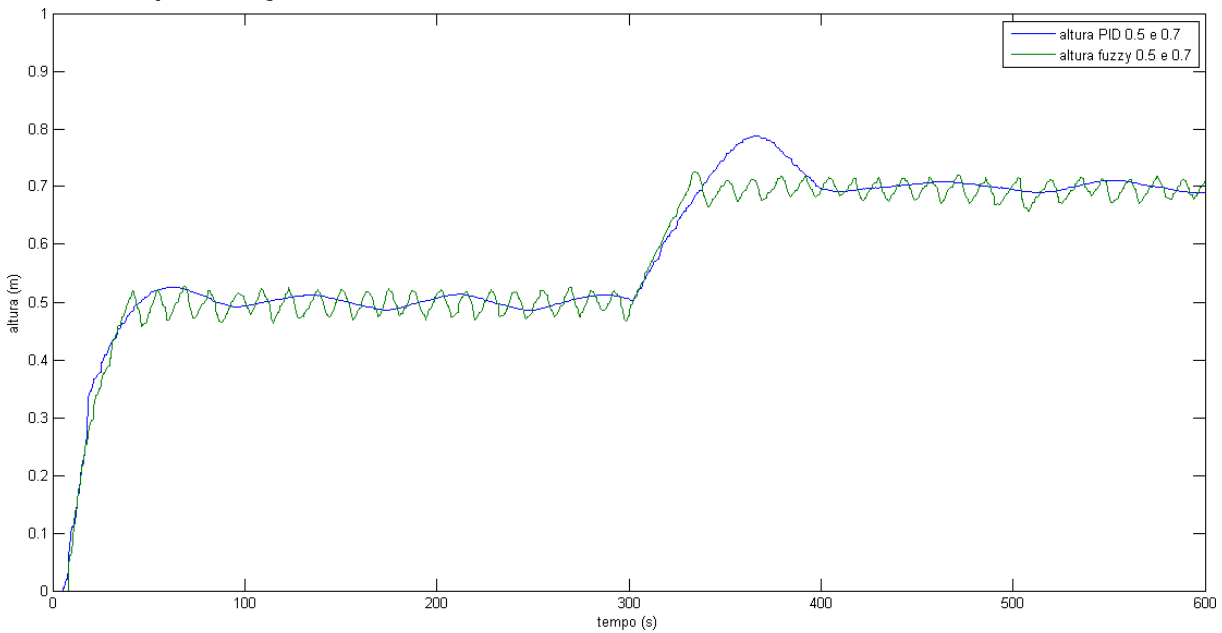
Fonte: Autoria Própria

A Figura 61 mostra a comparação dos resultados em simulação e na planta didática PD3 para a altura de 0,5 metros para o controlador *fuzzy*.

A Figura 62 mostra a comparação dos resultados em simulação e na planta didática PD3 para a altura de 0,7 metros para o controlador *fuzzy*.

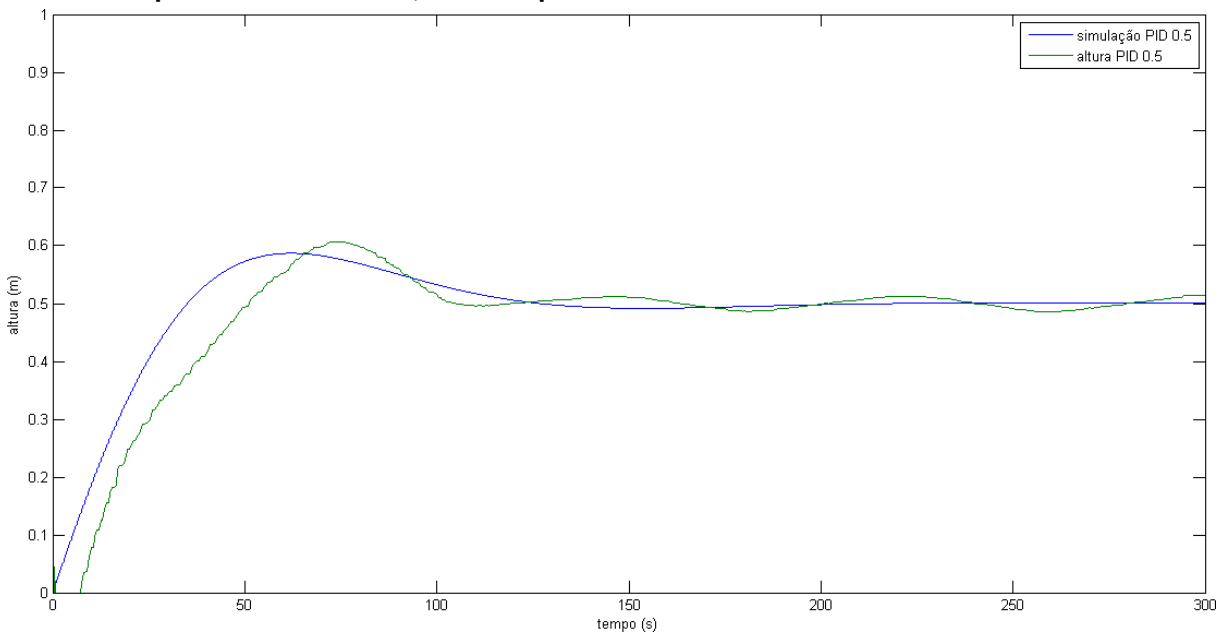
A Figura 63 mostra a comparação dos resultados em simulação e na planta didática PD3 para uma perturbação para o controlador *fuzzy*.

**Figura 57 – Comparação dos controladores PID e *fuzzy* aplicados na planta didática PD3 com perturbação**



Fonte: Autoria Própria

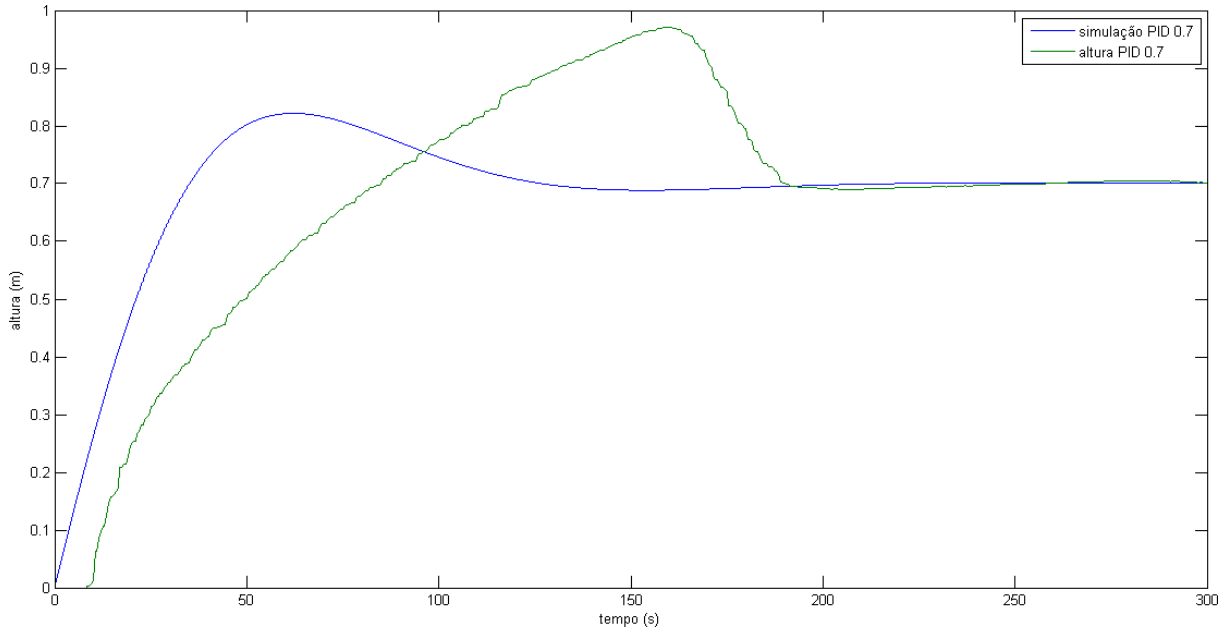
**Figura 58 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma altura de 0,5 metros para o controlador PID**



Fonte: Autoria Própria

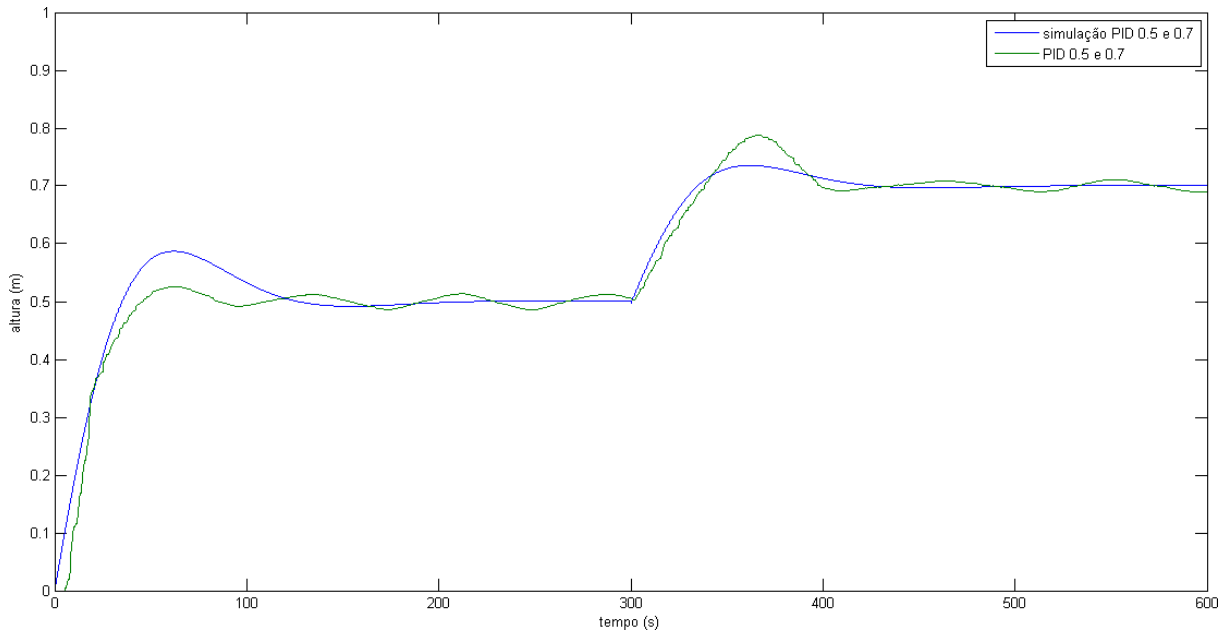
A Figura 58, Figura 59, Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63 mostram a similaridade entre a aplicação dos controladores PID e *fuzzy* simulados e aplicados na planta didática PD3, existe uma pequena diferença devido ao atraso de comunicação entre o controlador e a válvula de controle pneumática.

**Figura 59 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma altura de 0,7 metros para o controlador PID**



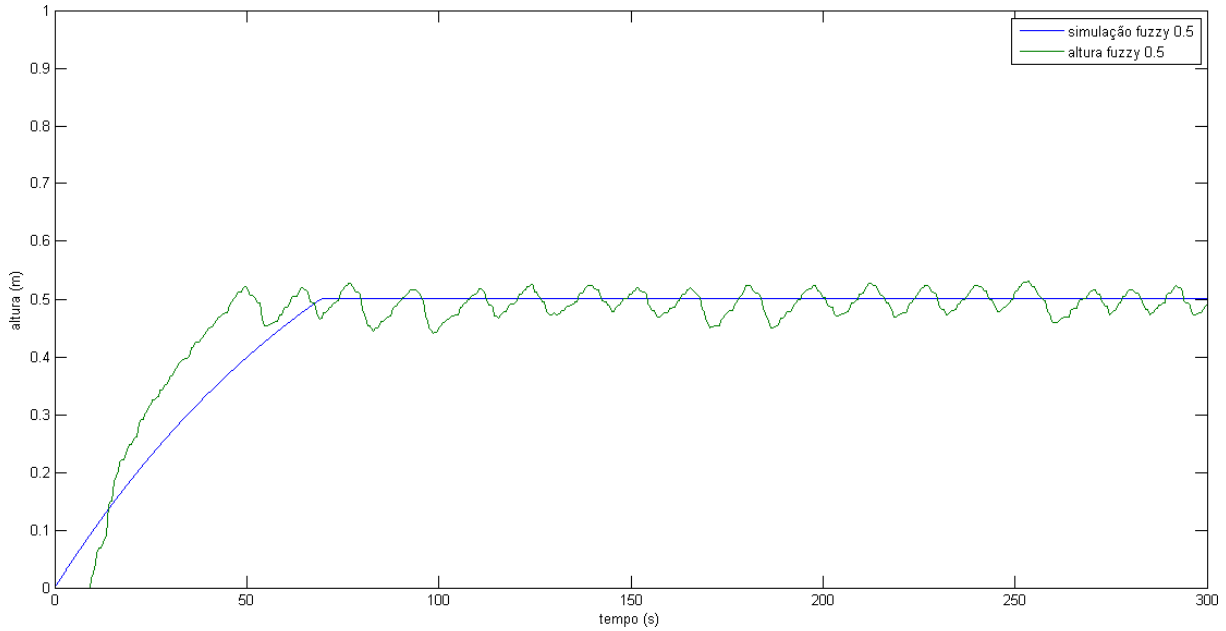
Fonte: Autoria Própria

**Figura 60 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma perturbação para o controlador PID**



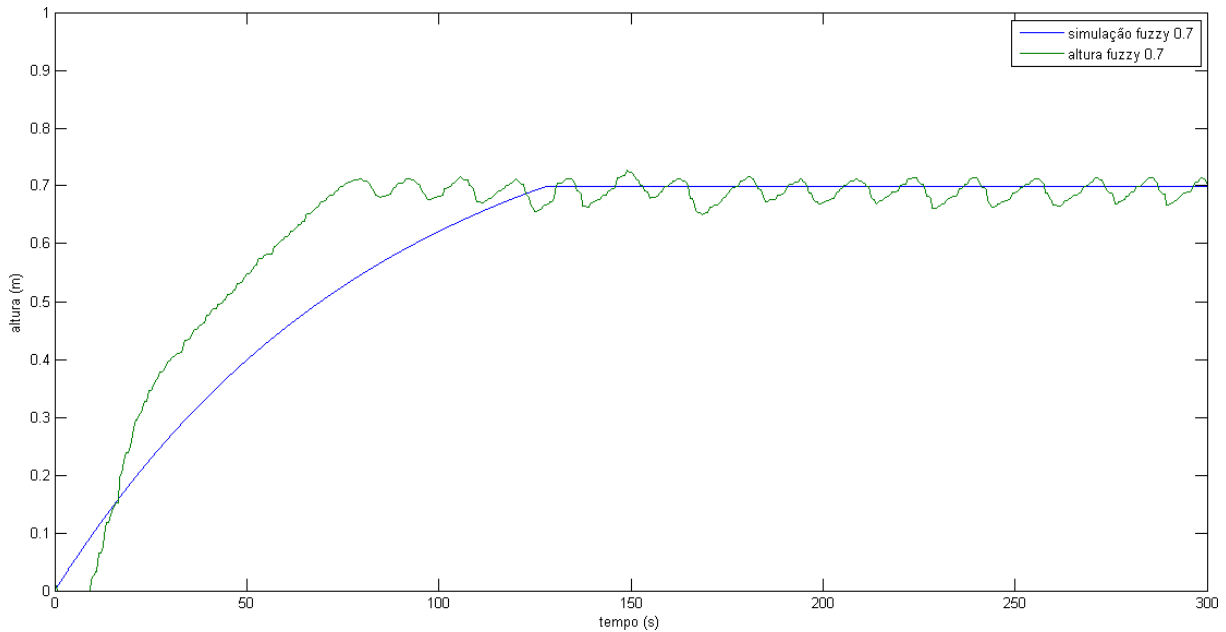
Fonte: Autoria Própria

**Figura 61 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma altura de 0,5 metros para o controlador *fuzzy***



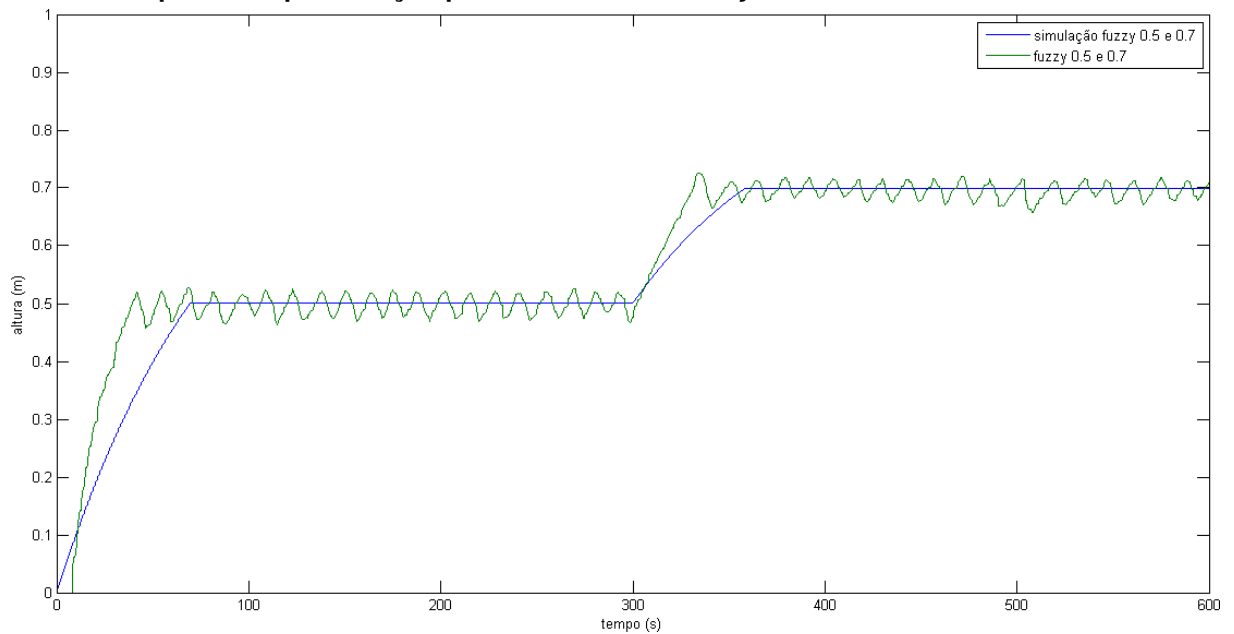
Fonte: Autoria Própria.

**Figura 62 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma altura de 0,7 metros para o controlador *fuzzy***



Fonte: Autoria Própria

**Figura 63 – Comparação dos resultados obtidos para a simulação e para a planta didática PD3 para uma perturbação para o controlador *fuzzy***



**Fonte: Autoria Própria**



## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A ampla presença do controlador PID na indústria mostra o bom emprego deste controlador em sistemas simples e sistemas complexos, porém esta técnica de controle apresenta limitações. Neste trabalho, os requisitos de projeto não foram atendidos pois o controlador foi projetado para ter um tempo de estabilização de 156 segundos e um sobre sinal de 9,48 %, mas os resultados foram um tempo de estabilização de 115,979 segundos e um sobresinal de 17,3729 % para as alturas 0,5 e 0,7 metros. Existem fatores que podem ter provocado o não atendimento dos requisitos de projeto, a impossibilidade teórica de atender simultaneamente a todas as especificações de desempenho com um controlador do tipo PID e a necessidade de sintonia adicional dos parâmetros de projeto, estes fatores podem ter provocado o não atendimento dos requisitos de projeto.

As respostas na planta didática PD3 tem uma pequena diferença se tornarmos como referência a simulação devido ao atraso da resposta da válvula de controle pneumática. A comunicação entre a planta didática e o *Matlab/Simulink* leva um tempo para acontecer, este tempo gera um atraso de comunicação entre a atuação no *Matlab/Simulink* e a atuação na válvula de controle pneumática, isto explica as diferenças entre as respostas obtidas no controlador *fuzzy* e no controlador PID na planta didática PD3 em comparação com as simulações. Mesmo com esta diferença pode ser observado que foram obtidos resultados satisfatórios entre as simulações feitas no *Matlab/Simulink* e a aplicação dos controladores na planta didática PD3.

O controlador PID é mais complexo de ser construído em relação ao controlador *fuzzy*, pois foi necessário encontrar o modelo matemático do sistema de nível da planta didática PD3 e fazer os cálculos para as constantes  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , na aplicação do controlador *fuzzy* foi necessário conhecer o sistema e como ele se comporta de modo simulado e com a aplicação na planta didática PD3, com o estudo do sistema puderam ser feitas as regras *fuzzy* para encontrar uma resposta satisfatória para o controlador *fuzzy*.

O controlador *fuzzy* tem vantagem em relação ao controlador PID por ser um controlador robusto que não depende da variação da válvula de saída (válvula de carga R) para obter resultados satisfatórios. O controlador PID depende da válvula de



saída para encontrar as constantes proporcional, integral e derivativa. Uma pequena variação na válvula de saída faz com que os ganhos do controlador PID não atendam aos requisitos de projeto definidos inicialmente.

Tomando como referência a resposta simulada para uma altura de 0,5 metros o controlador *fuzzy* não apresenta sobresinal e apresenta um tempo de estabilização de 67,37 segundos, o controlador PID apresenta um sobresinal de 17,3729 % e um tempo de estabilização de 115,979 segundos, para a altura 0,7 metros e com perturbação os resultados são similares. Além disso, há diferença no tempo de estabilização para o controlador *fuzzy* simulado para altura 0,7 metros que é 122,36 segundos, um pouco maior que o controlador PID simulado que apresenta tempo de estabilização de 115,979 segundos para uma altura de 0,7 metros. Levando em consideração o sistema de nível de líquido deste trabalho o controlador *fuzzy* apresenta resultados melhores que o controlador PID.

Este trabalho pode contribuir para o desenvolvimento de trabalhos futuros utilizando-se outros controladores, afim de se verificar qual controlador é mais adequado para esta aplicação de nível de líquido. Ainda, torna-se também relevante o estudo e implementação dessas novas técnicas de controle aplicadas diretamente em um Controlador Lógico Programável (CLP).

## REFERÊNCIAS

ABDALLAH, Y. M. **Sintonia de controlador PID via procedimento adaptativo para controle de atitude de veículos lançadores**. 2005. Dissertação (Mestrado) — INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

AMENDOLA M; SOUZA, A; BARROS L. **Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no Matlab 6.5**. [S.l.], 2005. 44 p. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

BITTENCOURT J. R; OSÓRIO, F. Fuzzyf - fuzzy logic framework: Uma solução livre para o desenvolvimento, ensino e pesquisa de aplicações de inteligência artificial multiplataforma. **Anais do III Workshop sobre Software Livre - WSL 2002**, p. 58–61, 2002. Citado na página 31.

BOLTON, W. **Engenharia de Controle**. [S.l.]: Makron Books, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 15, 22 e 23.

CARVALHO A. S; SILVA, R. C; NASCIMENTO D. B. Sistema de comunicação opc para uma coluna de destilação piloto. **IV Circuito de Iniciação Científica**, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 43, 44 e 45.

CICILLINI, D. A. **Desenvolvimento de um algoritmo de escalonamento para rede Foundation Fieldbus**. 2007. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Paulo - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Citado na página 36.

FERNANDES 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**, UFRN, 2005. Disponível em: <[http://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/artigos/2005/sbai2005\\_03.pdf](http://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/artigos/2005/sbai2005_03.pdf)>. Citado na página 16.

FILHO F. M. L; GOSMANN, H. L; BAUCHPIESS A. Controle *fuzzy* para sistema de nível de líquidos. **XIV - Congresso Brasileiro de Automática**, p. 3017–2022, 2002. Disponível em: <<http://www.ene.unb.br/~lavsi>>. Citado na página 22.

FONSECA, D. G. V. **Modelagem e controle adaptativo de uma planta didática de nível com instrumentação industrial**. 2012. Dissertação (Mestrado) — UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2012. Citado na página 16.

GALDINO, J. C. S. Controle robusto de um sistema de tanques acoplados. **VIII CONGIC - Congresso de Iniciação Científica**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2011. Citado na página 31.

GUIMARÃES F. M; NASCIMENTO, N. T; LUGLI A. B; MASSELLI Y. M. C. Controle de nível utilizando algoritmo pid implementado no clp. INATEL, 2013. Citado na página 16.

LUIZ C. C; SILVA, A. C; COELHO A. A. R; BRUCIAPAGLIA A. H. Controle adaptativo versus controle *fuzzy*: um estudo de caso em um processo de nível. **SBA Controle Automação**, Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Santa Catarina, v. 8, p. 43–51, 1997. Citado na página 22.

MAIA, D. V. A. Rede fieldbus: Foundation fieldbus x profibus pa. 2003. Citado na página 36.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. [S.l.]: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2011. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 57.

RAMOS A. P; WENSE, G. L. B. **Sistema didático de nível de líquidos**. jul. 2008. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, jul. 2008. Citado na página 21.

SCHMIDT, A. M. **Controle de nível de líquido utilizando controlador lógico programável**. jul. 2008 — UFPO - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, jul. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 21.

SHAW, I. S; SIMÕES M.G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. [s.n.], 2010. Disponível em: <<http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos12/21516891.pdf>>. Citado na página 28.

SILVA, R. N. **Projeto de um dispositivo para o controle de amortecedores magneto-reológicos usando recursos da lógica nebulosa**. 2014. Dissertação

(Mestrado) — UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.

SMAR-DFI302. **SMAR-DFI302**: Fieldbus universal bridge. [S.l.], 2014. 636 p. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

SMAR-FY302. **SMAR-FY302**: Posicionador de válvulas fieldbus. [S.l.], 2015. 98 p. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 48.

SMAR-LD302. **SMAR-LD302**: Transmissor de pressão fieldbus. [S.l.], 2014. 90 p. Citado 5 vezes nas páginas 37, 38, 39, 40 e 47.

SMAR-PD3-P. **SMAR-PD3-P**: Plantas didáticas. [S.l.], 2012. 54 p. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 46.

SMAR-STUDIO302. **SMAR-STUDIO302**: Studio302. [S.l.], 2013. 120 p. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

SOUZA A. L.; FRANCISCO, L. E. S CARVALHO A. S;. Identificação e controle *fuzzy* de uma planta didática de nível. **VII SEGeT - Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 30.

ÅSTRÖM K. J.; HÄGGLUND, T. **The future of pid control. Control Engineering Practice**. [s.n.], 2001. v. 9. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066101000624>>. Citado na página 15.



## 6 ANEXO A - COMANDOS UTILIZADOS NO MATLAB PARA ENCONTRAR OS VALORES DE KP, KI E KD

```

R = 1.1606
RA = 86
num=[R]
den=[RA 1]
G=tf(num,den)
rlocus(G)
step(num,den)
Te=156
zeta=0,6
PSS=9.48
zeta = (log(100/PSS))/sqrt((pi^2) + (log(100/PSS))^2)
wn=4/(zeta*Te)
sigmad=-zeta*wn
wd = wn * sqrt(1 - zeta^2)
sd=sigmad+j*wd
rp=freqresp(G,sd)
mp=abs(rp)
tetap=angle(rp)
mk=1/mp
tetak=-pi-tetap
a = sigmad^2 - wd^2
b=sigmad
c=2*sigmad*wd
d=wd
alpha=(sigmad*cos(tetak)-wd*sin(tetak))*mk
beta=(wd*cos(tetak)+sigmad*sin(tetak))*mk
ki=0.1361
kp=(a*beta+c*ki-c*alpha)/(-c*b+a*d)
kd=-(d*ki-d*alpha+beta*b)/(-c*b+a*d)

```

```
nk=[kd kp ki]
```

```
dk=[1 0]
```

```
K=tf(nk,dk)
```

```
L=G*K
```

```
T=feedback(L,1)
```

```
figure(1), step(T)
```

```
figure(2), pzmap(T)
```