

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – IFSP

ROGÉRIO LUIS SPAGNOLO DA SILVA

**PROPOSTA DE CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY PARA
CONTROLE DE NÍVEL DE UM TANQUE EM UM PROCESSO
DE NEUTRALIZAÇÃO DE PH**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Automação e Controle de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Barbosa

São Paulo

2014

S583p Silva, Rogério Luis Spagnolo da.
Proposta de Controlador PID Digital Fuzzy para controle de nível de um tanque em um processo de neutralização de pH / Rogério Luis Spagnolo da Silva. São Paulo: [s.n.], 2014.
130 f.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Barbosa

Dissertação (Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2014.

1. Controle de Sistemas 2. Controlador PID digital 3. Lógica fuzzy
I. Silva, Rogério Luis Spagnolo da. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo III. Título

CDU 681.0



ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a) : Rogério Luis Spagnolo da Silva

Nome do Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Barbosa

Nome do Co-orientador:

Título do Trabalho: "Proposta de Controlador PID Digital Fuzzy para controle de nível de um tanque em um processo de neutralização de pH"

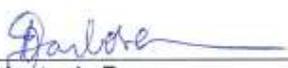
Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Paulo Roberto Barbosa – Orientador	IFSP – SPO	Aprovado
Prof. Dr. Alexandre Simião Caporali – Membro Interno	IFSP – SPO	Aprovado
Profª Drª Mariana Pelissari Monteiro Aguiar Baroni – Membro Externo	IFSP - SPO	Aprovado
Nome completo dos Participantes Suplentes da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Eduardo Alves da Costa – Membro Interno	IFSP - SPO	
Profª Drª Graziela Marchi Tiago – Membro Externo	IFSP - SPO	

Considerando-o: APROVADO
 NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 30 de setembro de 2014



Presidente da Banca



Membro Interno



Membro Externo

Observações:

Adequar o texto de acordo
com as sugestões da banca

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto Barbosa pela orientação e oportunidade que me concedeu para elaboração desta pesquisa; pela sua dedicação e empenho em prover todo o suporte necessário durante o desenvolvimento do trabalho de pesquisa; nas reuniões de orientação, nas revisões e correções nos meus textos, pela compreensão e ajuda nos momentos de dificuldade, sempre fornecendo palavras de apoio e incentivo.

A todos os professores das sete disciplinas cursadas no programa de mestrado, que foram de grande valia e agregaram muito valor a este trabalho.

À Schneider Electric Brasil e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, pelos subsídios técnicos e pela infraestrutura providenciada.

Aos meus colegas, Engenheiro Carlos Alberto Teixeira (*in memoriam*), pelo incentivo e motivação aos meus estudos e ao Engenheiro João Armando Jerez Soler, por ter depositado sua confiança no meu desenvolvimento profissional e ter me liberado das atividades profissionais nos momentos que foram necessários para tratar de assuntos ligados ao desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus colegas de suporte técnico da empresa Schneider Electric Brasil que trabalharam por mim nos momentos em que estive ausente da empresa para poder me dedicar ao mestrado.

Finalmente aos meus pais José Luis e Lourdes, a minha noiva Erika, por todo o amor, carinho, amizade, conselho e apoio prestado no decorrer destes anos.

A todas as outras pessoas que de alguma forma colaboraram nesse trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma nova abordagem na aplicação do Controlador PID Digital Fuzzy para controle de nível de um tanque em um processo de neutralização de pH, que utiliza os controladores convencionais de Garcia (2006, 2008) e a curva de reação de Ziegler-Nichols (1942) para a sintonia dos controladores. A lógica *fuzzy* é caracterizada como um método de controle não-convencional capaz de expressar de uma maneira sistemática quantidades imprecisas, vagas e mal definidas. No trabalho, a metodologia abordada é apresentada como uma variação de métodos existentes para aplicações em sistemas de primeira ordem e utiliza bibliotecas computacionais que acrescentam funções *fuzzy* ao PAC (controlador programável de automação), caracterizando-o assim, como um controlador (proporcional, integral, derivativo) digital *fuzzy*. Os resultados mostraram que a aplicação da lógica *fuzzy* como um método de controle não-convencional na proposta do Controlador PID Digital Fuzzy aperfeiçoou os resultados dos controladores convencionais propostos por Garcia (2006, 2008) em um processo caracterizado pela alta não-linearidade, tempo de atraso e possuir um elemento final de controle não-linear. Para a referência de nível de 1m, o tempo de atraso (t_d) foi eliminado e o tempo de acomodação (t_s) e sobressinal (M_p) reduziram, associando as vantagens da lógica *fuzzy* em não-linearidades à precisão de aproximação da referência garantida pelo controlador digital. Para a integração entre os ambientes computacionais *Matlab/Simulink*[®] e *UnityPro*[®] na execução do Controlador PID Digital Fuzzy em plataforma industrial com as mesmas características da planta-piloto, foi desenvolvida uma arquitetura de programa utilizando linguagem gráfica FBD (*function block diagram*) em conformidade à norma IEC61131-3.

Palavras-chave: controle de sistemas, controlador PID digital, lógica *fuzzy*

ABSTRACT

This work describes the development of a new approach to the application of a Fuzzy Digital PID Controller for a tank's level control at a pH neutralization process that uses conventional controllers from Garcia (2006, 2008) and reaction's curve proposed by Ziegler-Nichols (1942) for tuning of the controllers. Fuzzy logic is characterized as a non-conventional method capable of expressing in a systematic way imprecise, vague and ill-defined quantities. In this work, the proposed methodology is presented as a variation of existing methods for applications in first-order systems and uses computational libraries added fuzzy functions to the PAC (programmable automation controller) characterizes it as fuzzy digital PID controller (proportional, integral, derivative). The simulation's result on fuzzy logic application as non-conventional control method at the Fuzzy Digital PID Controller improved the results of conventional controllers proposed by Garcia (2006, 2008) in process characterized by high non-linearity, time delay and has a non-linear final control element. For a reference level of 1m, the delay time (t_d) was eliminated, the setting time (t_s) and the overshoot (M_p) were reduced, combining the advantages of fuzzy logic in nonlinearities with the precision of the reference's approximation guaranteed by digital controller. The integration between computational environments *Matlab/Simulink*[®] and *UnityPro*[®] for Fuzzy Digital PID Controller execution in a industrial platform with the same characteristics, a program architecture using FBD (function block diagram) graphical language was developed in accordance to IEC 61131-3 standard.

Keywords: control systems, digital PID controller, *fuzzy* logic

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Formulário dos coeficientes de ganho para controladores PI e PID pelo método da curva de reação de Ziegler-Nichols (1942)	33
Tabela 2.2 – Estudo comparativo das medidas de desempenho entre os controladores de nível	40
Tabela 3.1 – Valores da curva de resposta estática do atuador da válvula de controle.....	53
Tabela 4.1 – Parâmetros para simulação do Controlador PI Analógico.....	71
Tabela 4.2 – Parâmetros para simulação do Controlador PID Digital.....	72
Tabela 4.3 – Regras de inferência para o Controlador PID Digital Fuzzy	73
Tabela 4.4 – Comparativo das medidas de desempenho entre os controladores de nível	76
Tabela 4.5 – Recursos necessários do navegador de projeto para programação.....	81
Tabela 4.6 – Blocos de função para aplicação do Controlador PID Digital no ambiente <i>UnityPro</i> [®]	82
Tabela 4.7 – Blocos de função <i>fuzzy</i> no ambiente <i>UnityPro</i> [®]	83
Tabela C.1 – Exemplos de dispositivos constituintes nos níveis de controle industrial	115
Tabela C.2 – Classificação das medidas de nível	117

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Sistema baseado em conhecimento em uma malha de controle	27
Figura 2.2 – Estrutura típica de um controlador nebuloso	28
Figura 2.3 – Exemplo de função triangular	29
Figura 2.4 – Curva de reação típica em sistemas de primeira ordem	31
Figura 2.5 – Intervalos de tempo da curva de reação em sistemas de primeira ordem	32
Figura 2.6 – Parâmetros para medidas de desempenho em sistemas subamortecidos	34
Figura 2.7 – Diagrama de blocos do sistemas de controle de nível	38
Figura 2.8 – Curva de resposta do sistema para uma referência de 0,15m	39
Figura 2.9 – Diagrama de blocos típico de um controlador PID digital <i>fuzzy</i>	41
Figura 2.10 – Curva de resposta do sistema para uma referência de 3 bar	41
Figura 2.11 – Controlador PID digital <i>fuzzy</i> no processo de extrusão de plástico.....	42
Figura 2.12 – Curva de resposta do sistema para uma referência de 200°C	43
Figura 2.13 – PAC Modicon M340®	46
Figura 3.1 – Esquema do tanque cilíndrico vertical aberto.....	49
Figura 3.2 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada	50
Figura 3.3 – Diagrama de blocos do atuador da válvula de controle	52
Figura 3.4 – Diagrama de blocos da válvula de controle	55
Figura 3.5 – Modelo do conversor I/P	55
Figura 3.6 – Diagrama de blocos do processo em malha fechada	57
Figura 3.7 – Modelo da válvula de controle.....	58
Figura 3.8 – Modelo do atuador da válvula de controle.....	58
Figura 3.9 – Modelo do corpo da válvula de controle.....	58
Figura 3.10 – Modelo do tanque.....	59

Figura 3.11 – Modelo do transmissor de nível.....	59
Figura 3.12 – Diagrama de blocos do Controlador PI Analógico.....	60
Figura 3.13 – Diagrama de blocos de um sistema de controle digital típico.....	62
Figura 3.14 – Exemplo de sinal reconstruído por um ZOH	63
Figura 3.15 – Diagrama de blocos do Controlador PID Digital	64
Figura 3.16 – Diagrama de blocos do Controlador PID Digital Fuzzy	65
Figura 4.1 – Fluxograma de simulações do Controlador PID Digital Fuzzy	66
Figura 4.2 – Diagrama de blocos do sistema em malha aberta	68
Figura 4.3 – Curva de reação do sistema (resposta em malha aberta)	68
Figura 4.4 – Curva de reação do sistema para a proposta de Garcia (2006) no Controlador PI Analógico.....	70
Figura 4.5 – Curva de reação do sistema o Controlador PI Analógico.....	71
Figura 4.6 – Curva de resposta do sistema para o Controlador PID Digital	72
Figura 4.7 – Superfície de controle	73
Figura 4.8 – Curva de reação do sistema o Controlador PID Digital Fuzzy	74
Figura 4.9 – Comparativo das curvas de resposta entre os controladores de nível..	75
Figura 4.10 – Configuração dos canais de entrada e saída analógicas no ambiente <i>UnityPro</i> [®]	79
Figura 4.11 – Navegador de projeto no ambiente <i>UnityPro</i> [®]	80
Figura 4.12 – Controlador PID Digital no ambiente <i>UnityPro</i> [®]	81
Figura 4.13 – Sistema de inferência <i>fuzzy</i> no ambiente <i>UnityPro</i> [®]	84
Figura 4.14 – Variáveis declaradas no ambiente <i>UnityPro</i> [®]	85
Figura A.1.1 – Ambiente para código M no <i>Matlab/Simulink</i> [®]	99
Figura A.1.2 – Ambiente Simulink no <i>Matlab/Simulink</i> [®]	100
Figura A.1.3 – Ambiente FIS no <i>Matlab/Simulink</i> [®]	101
Figura A.2.1 – Ambiente <i>UnityPro</i> [®] em modo de monitoração	102
Figura A.2.2 – Seção de programa em FBD com blocos de função MFB	103

Figura B.1.1 – Morfologia monotônica (<i>singleton</i>)	105
Figura B.3.1 – Função de associação triangular $\mu_A(x)$	107
Figura B.3.2 – Fuzzificação por função triangular com 50% de superposição	107
Figura B.3.3 – Função de associação trapezoidal $\mu_A(x)$	108
Figura B.3.4 – Fuzzificação por função trapezoidal com 50% de superposição	108
Figura B.3.5 – Função de associação gaussiana $\mu_A(x)$	109
Figura B.3.6 – Fuzzificação por função trapezoidal com 50% de superposição	109
Figura B.4.1 – Método de defuzzificação pela média da associação máxima	110
Figura B.4.2 – Método de defuzzificação pelo centro da área	111
Figura B.4.3 – Método de defuzzificação pelo centro do máximo	112
Figura C.1 – Níveis de controle industrial.....	114
Figura C.2 – Válvula globo sede simples	119
Figura C.3 – Curvas características de válvulas de controle	120
Figura D.1 – Composição da norma IEC61131-3	122
Figura D.2 – Definições da norma IEC61131-3	123
Figura E.1 – Metodologia utilizada para testes da planta-piloto no ambiente <i>Matlab/Simulink</i> [®]	126
Figura E.2 – Metodologia utilizada para testes de lógica e de endereçamento no ambiente <i>UnityPro</i> [®]	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>analog to digital converter</i> (conversor analógico-digital)
CLP	controlador lógico programável
CPU	<i>central processing unit</i> (unidade central de processamento)
DAC	<i>digital to analog converter</i> (conversor digital-analógico)
EFC	elemento final de controle
e-PAC	<i>ethernet programmable automation controller</i> (controlador programável de automação <i>ethernet</i>)
ERP	<i>enterprise resource planning</i> (sistema de gestão empresarial)
FBD	<i>function block diagram</i> (diagrama de blocos funcionais)
FIS	<i>fuzzy inference system</i> (sistema de inferência <i>fuzzy</i>)
IHM	interface homem-máquina
MES	<i>manufacturing execution system</i> (sistema de execução de manufatura)
MFB	<i>motion function block</i> (blocos de função para controle de movimento)
OPC	<i>OLE for process control</i> (OLE para controle de processo)
PAC	<i>programmable automation controller</i> (controlador programável de automação)
PH	potencial hidrogeniônico
PI	proporcional, integral
PID	proporcional, integral, derivativo
SCADA	<i>supervisory control and data acquisition</i> (sistemas de supervisão e aquisição de dados)
SISO	<i>single input, single output</i> (sistemas com uma entrada e uma saída)
SDCD	sistema digital de controle distribuído
ZOH	<i>zero order holder</i> (segurador de ordem zero)

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Massa específica [kg/m ³]
θ	Tempo de atraso [s]
τ	Constante de tempo [s]
τ_{AT}	Constante de tempo do transmissor de nível [s]
τ_T	Constante de tempo do atuador da válvula de controle [s]
C_v	Coeficiente de vazão de válvula [gpm/psi ^{1/2}]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
h_{ref}	Referência de nível [m]
K	Ganho do processo
K_C	Ganho proporcional
K_T	Relação entre a faixa de operação do controlador e o nível [mA/m]
K_v	Coeficiente de ajuste de cálculo de vazão pela válvula
M_p	Sobressinal máximo [p.u.]
R	Rangeabilidade da válvula
T_D	Tempo derivativo [s]
T_{D_lag}	Tempo de atraso da componente derivativa [s]
t_d	Tempo de atraso [s]
t_{df}	Tempo de atraso com o Controlador PID Digital Fuzzy [s]
T_I	Tempo integral [s]
t_p	Tempo de pico [s]
t_r	Tempo de subida [s]
t_s	Tempo de acomodação [s]

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 A LÓGICA FUZZY	17
1.2 CONTROLADORES PROGRAMÁVEIS DE AUTOMAÇÃO	19
1.2.1 Aplicação lógica fuzzy no PAC	20
1.2.2 Os ambientes Matlab/Simulink®	21
1.2.3 O ambiente UnityPro®	21
1.3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	22
1.4 MOTIVAÇÃO	22
1.5 OBJETIVOS	23
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 INTRODUÇÃO	25
2.2 SISTEMAS DE CONTROLE INTELIGENTES.....	25
2.3 SINTONIA DE CONTROLADORES EM SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM	30
2.4 CARACTERÍSTICAS DAS RESPOSTAS TRANSITÓRIAS	33
2.4.1 Tempo de atraso (t_d).....	34
2.4.2 Tempo de subida (t_r).....	35
2.4.3 Tempo de pico (t_p)	35
2.4.4 Tempo de acomodação (t_s)	35

2.4.5 Sobressinal máximo (M_p).....	35
2.5 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE CONTROLADORES	
PID DIGITAL FUZZY	36
2.5.1 Controle de nível.....	37
2.5.2 Controle de pressão.	40
2.5.3 Controle de temperatura.....	42
2.6 APLICAÇÃO DO PAC COMO CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY PARA CONTROLE DE NÍVEL EM PROCESSOS DE NEUTRALIZAÇÃO DE PH	44
3. CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY PARA CONTROLE DE NÍVEL EM PROCESSOS DE NEUTRALIZAÇÃO DE PH	47
3.1 INTRODUÇÃO	47
3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA PLANTA-PILOTO	47
3.2.1 Modelo da válvula.....	51
3.2.2 Modelo do conversor I/P.....	55
3.2.2 Modelo do transmissor de nível.....	56
3.2.4 Modelo do processo.	57
3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO CONTROLADOR DE NÍVEL	59
3.2.1 Modelagem matemática do Controlador PI Analógico.....	60
3.2.2 Modelagem matemática do Controlador PID Digital.....	61
3.2.3 Modelagem matemática do Controlador PID Digital Fuzzy.	65
4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS	66
4.1 INTRODUÇÃO	66
4.2 SIMULAÇÕES DO CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY	67
4.2.1 Análise da curva de reação do sistema em malha aberta.	67
4.2.2 Simulações com o Controlador PI Analógico.....	69
4.2.3 Simulações com o Controlador PID Digital.....	72
4.2.4 Simulações com o Controlador PID Digital Fuzzy.	73

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO ENTRE OS CONTROLADORES DE NÍVEL	75
4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM O CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY	77
4.5 TRANSCRIÇÃO EQUIVALENTE DO CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY PARA TESTES EM CAMPO	78
4.5.1 Estrutura de programa do Controlador PID Digital.	79
4.5.2 Estrutura de programa do Controlador PID Digital Fuzzy.	83
4.5.3 Estrutura de dados do Controlador PID Digital e PID Digital Fuzzy.	85
4.6 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA A TRANSCRIÇÃO EQUIVALENTE DO CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY PARA TESTES DE CAMPO	86
4.7 RESULTADOS DA TRANSCRIÇÃO EQUIVALENTE DO CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY PARA TESTES EM CAMPO	87
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
5.1 Trabalhos futuros.	91
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
APÊNDICE A: Os ambientes computacionais <i>Matlab/Simulink</i> [®] e <i>UnityPro</i> [®]	99
A.1 <i>Matlab/Simulink</i> [®]	99
A.2 <i>UnityPro</i> [®]	101
APÊNDICE B: Teoria do controle <i>fuzzy</i>	104
B.1 Comparação entre os métodos <i>Takagi-Sugeno</i> e <i>Mamdani</i>	104
B.2 Funções de associação <i>fuzzy</i>	106
B.3 Fuzzificação	106
B.4 Defuzzificação	110
APÊNDICE C: Instrumentação industrial	113
APÊNDICE D: A norma IEC61131-3 e os benefícios da <i>PLC Open</i> [®]	121

APÊNDICE E: Metodologia de simulações	125
<i>E.1 Simulações no ambiente Matlab/Simulink®</i>	126
<i>E.2 Simulações no ambiente UnityPro®</i>	127
APÊNDICE F: Programa em ambiente <i>Matlab/Simulink®</i> elaborado para as simulações.....	129

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta um breve relato sobre o uso da lógica *fuzzy* em controladores programáveis de automação. Há também a caracterização da proposta do Controlador PID Digital Fuzzy, as motivações e as justificativas do porquê da necessidade de investimentos em pesquisas sobre a aplicação de métodos controle não-convencionais em projetos de controladores de nível.

1.1 A LÓGICA FUZZY

A lógica *fuzzy*, também definida como lógica difusa ou nebulosa, pode ser caracterizada como um método de controle não-convencional que incorpora a forma humana de pensar (raciocínio dedutivo). É caracterizada pelo aprendizado e generalização através de exemplos particulares provenientes da observação do comportamento de processos industriais com características não lineares para situações dinâmicas ou variantes no tempo (SIMÕES, M. G., SHAW, I.S., 2007).

Simões e Shaw (2007) e Nascimento Júnior e Yoneyama (2010) relatam que o advento deste método ocorreu em função da necessidade de um método capaz de expressar de uma maneira sistemática quantidades imprecisas, vagas e mal definidas.

Tomando esta abordagem, Nascimento Júnior e Yoneyama (2010) afirmam que a lógica *fuzzy* busca prover às máquinas a capacidade de integrar e realizar rotinas, não necessariamente algorítmicas, do ser humano e também para construir um controlador mesmo quando um modelo matemático do sistema não existe.

Segundo os autores, a lógica *fuzzy* é considerada eficaz para lidar com incertezas, permitindo que as máquinas realizem tarefas complexas no lugar do operador humano sem que haja a necessidade de consultas a especialistas. Os autores ainda definem este método como um sistema baseado em conhecimentos, representado muitas vezes na forma de regras de produção do tipo “**SE-ENTÃO**”.

Baseado nestes conceitos, Yenikomochian (2011, p.12) relata que a lógica *fuzzy*:

[...] pode ser brevemente entendida como uma extensão da lógica booleana que admite valores lógicos intermediários entre o Falso (0) e o Verdadeiro (1). Este tipo de lógica engloba de certa forma conceitos estatísticos principalmente na área de inferência. Seu uso está associado à construção de sistemas inteligentes, isto é, sistemas capazes de reproduzir a forma humana de decisão em uma tarefa de controle [...] e produzir na saída variáveis quantificáveis, como a atuação sobre uma válvula ou um nível de alarme.

Simões e Shaw (2007, *apud* YENIKOMOCHIAN, B.C., 2011, p.12) relatam ainda que, o uso da lógica *fuzzy* está associado ao uso de conjuntos *fuzzy*, estendendo o conceito de conjunto em razão de permitir que um elemento passe a ter um grau de pertinência variando entre 0 e 1 ao invés de somente pertencer ou não ao conjunto como na teoria de conjuntos tradicional. Segundo o autor, “para uma função de pertinência $\mu_A(x)$, cujo conjunto imagem está entre 0 e 1 (ou 0% e 100%), pode haver a proposição de infinitos valores entre estes extremos.”.

Baseado neste conceito, Brandl (2008) relata que as variáveis em geral são quantificadas por unidades, por exemplo, metros, graus, etc. Segundo o autor, ao representar as variáveis de acordo com as descrições humanas (raciocínio dedutivo), podemos dizer que estes termos são tratados como linguísticos.

Araújo *et al* (2005) relatam que a forma mais usual de tratar os termos linguísticos é através da *fuzzificação*. A *fuzzificação* consiste em transcrever a representação da lógica aritmética para lógica *fuzzy*.

Yenikomochian (2011, p.12) afirma que “um modelo *fuzzy* simples é construído associando um grau de pertinência à uma proposição”. Os operadores **E** e **OU**, que representam as funções de mínimo e máximo respectivamente, são utilizados para união dos graus de pertinência de cada proposição de forma a estabelecer as regras de inferência que relacionem um conjunto de proposições.

Tomando esta abordagem, ao estabelecer as regras, têm-se o que chamamos de sistema de inferência. Assim, pode-se definir descrições humanas adquiridas por meio de uma observação, por exemplo “alto”, “baixo”, “médio”, “quente”, “frio” ou “**SE** a temperatura é alta **E** a pressão é muito alta, **ENTÃO**, a abertura da válvula proporcional é baixa.” (BRANDL, A., 2008; YENIKOMOCHIAN, B.C., 2011).

O resultado aritmético do sistema de inferência, baseado na agregação dos resultados de todas as regras, é obtido pelo processo denominado *defuzzificação*. A *defuzzificação* consiste na solução final através de uma operação matemática por exemplo, a média dos máximos, centróide, etc (SIMÕES, M.G., SHAW, I.S., 2007; NASCIMENTO JÚNIOR, C.L., YONEYAMA, T., 2010).

1.2 CONTROLADORES PROGRAMÁVEIS DE AUTOMAÇÃO

O PAC (controlador programável de automação), define uma classe de controladores programáveis industriais multifuncionais, integrados, otimizados e com possibilidade de ser também personalizadas, caracterizado pela elevada confiabilidade de hardware que advém do CLP (controlador lógico programável), elevada capacidade de processamento e quantidade de memória do SDCD (sistema digital de controle distribuído) e ter integrado as funções de controle envolvendo lógica, controle de movimentos, sincronismo e interpolação de eixos em um único controlador. (CASTRUCCI, P.; MORAES, C., 2007; ANDRADE, A. ; YAMAGUCHI, M.Y, 2008).

Na visão de Yamaguchi (2008, p.12) “a ideia central de um PAC é ter as funções de um SDCD com o preço e a simplicidade do CLP”. Segundo o autor, ainda requer um investimento inicial maior tornando-o inviável para sistemas de pequeno porte.

Castrucci e Moraes (2007) e Andrade e Yamaguchi (2008) relatam que o PAC abre oportunidades de aplicação para controle de processos com monitoramento de cerca de dois mil pontos de entrada e saída com custo reduzido em relação ao SDCD mantendo a qualidade e robustez de um equipamento que está em conformidade às normas e certificados reconhecidos para aplicação e uso.

A plataforma de evolução do PAC, definida como e-PAC (controlador programável de automação *ethernet*), além de possuir os recursos integrados relatados por Castrucci e Moraes (2007) e Andrade e Yamaguchi (2008), possui em sua arquitetura de processamento um co-processador *ethernet* responsável por gerenciar tarefas de comunicação entre os módulos de entrada e saída com a CPU (unidade central de processamento). O e-PAC permite ainda a redundância de CPU e tráfego de pacotes de dados otimizados em topologia anel com estações remotas.

1.2.1 A lógica fuzzy no PAC

Guimarães *et al* (2014, p.64) relatam que “o controle PID (proporcional, integral, derivativo) é utilizado em sistemas dinâmicos, sendo responsável por manter o valor da saída igual ao valor ajustado pelo usuário.”. Segundo os autores, este tipo de controle clássico, também definido como convencional, é aplicado em sistemas de controle de velocidade, temperatura e nível.

Baseado neste conceito, Andrade e Yamaguchi (2008) relatam que o PAC está munido em seu ambiente computacional de programação de um algoritmo de controle PID digital. No entanto, para a aplicação da lógica *fuzzy* como um método não-convencional de controle, os fabricantes comercializam à parte bibliotecas computacionais que acrescentam funções *fuzzy* aos controladores clássicos, caracterizando-os assim, como controladores PID digital *fuzzy*.

Akkaya e Çetin (2010) relatam que, em razão da aplicação de controladores PID digital *fuzzy* estarem associados à processos complexos e/ou não-lineares, torna-se possível associar as vantagens da lógica *fuzzy* em não-linearidades à precisão de aproximação do valor de referência garantida pelo controlador PID digital.

Segundo Al-Odinenat e Al-Lawama (2008) e Ahmad *et al* (2012), os controladores PID digital *fuzzy* caracterizam-se por dispor de auto sintonia, adaptação em tempo real para não-linearidades, estabilidade e ajustes na variação de tempo reproduzindo resposta mais rápida com nível de sobressinal reduzido.

Tais características viabilizam e contribuem no desenvolvimento intelectual da tecnologia e permitem a troca de experiências entre os programadores, desenvolvedores de aplicações e suporte técnico, visando a portabilidade entre os ambientes computacionais relatada por Yenikomochian (2011).

Assim sendo, a proposta do Controlador PID Digital Fuzzy utilizou a aplicação das características da biblioteca computacional para lógica *fuzzy* do ambiente *UnityPro*[®] na definição do sistema de inferência para o ambiente *Matlab/Simulink*[®] e também para a transcrição equivalente para testes de campo.

1.2.2 Os ambientes *Matlab/Simulink*[®]

O *Matlab/Simulink*[®] são ambientes interativos para computação numérica de alto desempenho utilizado para desenvolver algoritmos, modelos e programas para diversas aplicações, incluindo o processamento de imagens e vídeos, sistemas de controle e finanças.

O *Matlab/Simulink*[®] integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos que permitem atingir uma solução mais rápida do que os métodos convencionais que utilizam planilhas e linguagens de programação como JAVA[™] ou C/C++. Neste trabalho, os ambientes *Matlab/Simulink*[®] forma utilizados nas simulações dos controladores de nível na modelagem da planta-piloto.

O Apêndice A detalha os ambientes de simulações *Matlab/Simulink*[®] e suas características.

1.2.3 O ambiente *UnityPro*[®]

O *UnityPro*[®] é um ambiente para desenvolvimento de aplicações com controladores programáveis da empresa Schneider Electric, e vem sendo utilizado desde 2003 em aplicações industriais para controle de máquinas e processos. Neste trabalho, o ambiente *UnityPro*[®] foi utilizado na apresentação da transcrição equivalente do Controlador PID Digital Fuzzy para testes de campo.

O ambiente *UnityPro*[®] permite a execução de tarefas rápidas e das seções de programa desenvolvidas nas cinco linguagens de programação definidas pela norma IEC61131-3 em paralelo através do modo de visualização estrutural, caracterizando assim, o sistema de processamento como multi-tarefa.

O Apêndice A detalha o ambiente de desenvolvimento *UnityPro*[®] e suas características.

1.3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de pesquisa proposto neste estudo é desenvolver uma nova abordagem na aplicação do Controlador PID Digital Fuzzy em um sistema de controle de nível que utiliza os controladores convencionais de Garcia (2006, 2008) e a curva de reação de Ziegler-Nichols (1942) para a sintonia dos controladores.

Para o desenvolvimento desta proposta recorreu-se:

- ao estudo e compreensão do método da curva de reação de Ziegler-Nichols (1942);
- ao estudo e aplicação da biblioteca para lógica *fuzzy* do ambiente computacional *UnityPro*[®];
- à modelagem do controlador PID digital proposta por Garcia (2008);
- associação dos tópicos acima relacionados para desenvolver a transcrição equivalente do Controlador PID Digital Fuzzy para testes de campo e realizar a integração entre os ambientes computacionais *Matlab/Simulink*[®] e *UnityPro*[®].

1.4 MOTIVAÇÃO

Para realização desta proposta, optou-se em aplicar esta metodologia em um sistema de controle de nível de um tanque em um processo de neutralização de pH. A escolha desse sistema se deu por se tratar de um sistema de automação industrial comum em diversas aplicações nos ramos químico, petroquímico, de celulose, de alimentos por possuir curva de reação típica de um sistema de primeira ordem.

Embora os sistemas de controle de primeira ordem possam reproduzir resultados satisfatórios com métodos de controle convencionais, na modelagem matemática da válvula de controle para a planta-piloto, Garcia (2006) relata que curva de resposta do atuador da válvula de controle não é linear.

Tomando esta abordagem, a proposta do Controlador PID Digital Fuzzy:

- utiliza no PAC a aplicação de um método de controle não-convencional (lógica *fuzzy*) em um processo caracterizado pela alta não-linearidade, tempo de atraso e possuir EFC (elemento final de controle) não-linear;
- apresenta um aperfeiçoamento dos controladores de nível utilizados por Garcia (2006, 2008), com o PAC como controlador PID digital ao invés dos métodos existentes que utilizam SDCD e o método da curva de reação proposto por Ziegler-Nichols (1942) para a sintonia em controladores convencionais;
- demonstra uma solução para atender a demanda por sistemas de controle inteligentes eficientes em diversos segmentos da indústria, em especial os citados anteriormente.

1.5 OBJETIVOS

- adotar o algoritmo de controle PID de um PAC como PID digital e utilizar a saída e a variação da saída como variáveis de entrada para o sistema de inferência *fuzzy*, estabelecendo assim, o Controlador PID Digital Fuzzy para este trabalho;
- aplicar os conhecimentos adquiridos pelo estudo avançado da biblioteca para lógica *fuzzy* do ambiente *UnityPro*[®] na definição das regras de inferência para o ambiente *Matlab/Simulink*[®], em conformidade às adaptações ou limitações de operação informadas pelo fabricante;
- estudar e simular a aplicação do Controlador PID Digital Fuzzy proposto em malha fechada na modelagem matemática de uma planta-piloto para controle de nível de um tanque em um processo de neutralização de pH;

- propor a integração entre os ambientes computacionais *Matlab/Simulink*[®] e *UnityPro*[®] pela transcrição equivalente do Controlador PID Digital Fuzzy;
- elaborar uma arquitetura de programa para testes de campo em planta industrial com as mesmas características da planta-piloto baseada na linguagem gráfica FBD (*function block diagram*), em conformidade à norma IEC61131-3, permitindo a execução de lógica *fuzzy* em plataformas industriais de tempo real.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho em questão está organizado em cinco capítulos e seis anexos, conforme apresentado nas linhas abaixo.

No Capítulo 1, é feita uma abordagem inicial do problema proposto e uma breve caracterização do Controlador PID Digital Fuzzy para o trabalho em questão.

O Capítulo 2 apresenta as revisões de literatura sobre sistemas de controle inteligentes, o método da curva de reação de Ziegler-Nichols (1942) e os indicadores de desempenho para sistemas de primeira ordem. Finalizando o capítulo, são apresentados três exemplos de aplicação e o embasamento teórico que culmina com a escolha de utilizar como PID digital, o algoritmo de controle PID de um PAC para o controle de nível em processos de neutralização de pH.

O Capítulo 3 aborda a modelagem matemática da planta-piloto (tanque cilíndrico vertical aberto para um processo de neutralização de pH), dos controladores convencionais de Garcia (2006, 2008) e do Controlador PID Digital Fuzzy.

O Capítulo 4 apresenta as simulações e resultados da proposta em planta-piloto no ambiente *Matlab/Simulink*[®] para as condições definidas no trabalho. O capítulo apresenta também a transcrição equivalente da proposta para o ambiente *UnityPro*[®] para testes de campo em planta industrial com as mesmas características.

O Capítulo 5 trata das conclusões, contendo as considerações finais, contribuições do trabalho e propostas para estudos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão de literatura sobre sistemas de controle inteligente, o método da curva de reação de Ziegler-Nichols (1942) e os indicadores de desempenho para sistemas de primeira ordem.

Finalizando o capítulo, serão apresentados três exemplos de aplicação de controladores PID digital *fuzzy* em sistemas de primeira ordem e o embasamento teórico que culmina com a escolha de utilizar como PID digital o algoritmo de controle PID de um PAC para o controle de nível em processos de neutralização de pH.

2.2 SISTEMAS DE CONTROLE INTELIGENTES

Simões e Shaw (2007) afirmam que os controladores que combinam técnicas de controle convencionais com métodos não-convencionais são caracterizados como sistemas de controle inteligentes e são aplicados em sistemas dinâmicos complexos, automatizando operações realizadas por operadores ou quando o controle convencional falha.

Baseado neste conceito, Bauchpiess *et al* (2005) e Almeida *et al* (2010) relatam que os sistemas de controle inteligentes são também caracterizados por fornecer respostas que solucionam problemas, mesmo que sejam novas ou inesperadas, fazendo que o comportamento seja único ou considerado como criativo.

Segundo Yenikomochian (2011), um sistema inteligente ideal permitiria a criação de sistemas autônomos, os quais poderiam executar complexas tarefas de controle sob todas as condições de operação de um processo ou de uma planta, mesmo na presença de falhas, sem supervisão ou intervenção de operadores externos. No entanto, o autor alerta que como não há um controlador que tenha características ideais para todas as aplicações, cada contribuição vem ser mais uma alternativa para projetistas de controladores *fuzzy*.

Tomando esta abordagem, Fernandes (2008) apresenta sob o ponto de vista gerencial de uma planta industrial, os componentes básicos que constituem um sistema de controle inteligente:

- base de conhecimentos;
- máquina de inferência, para armazenar as regras de inferência e procedimentos de execução humanos para solução de problemas;
- subsistema de explicações;
- *interface* do usuário;
- subsistema de aquisição do conhecimento que visa guiar usuários, por meio de explicações através de uma *interface*, nos procedimentos operacionais que devem ser executados no sistema, de forma que durante a execução, o usuário não possua dúvidas de como atuar e que contenha as informações e interatividade necessárias com o sistema.

Segundo o autor, o Engenheiro do Conhecimento é uma figura central, tanto na construção do sistema inteligente, vista sob o aspecto técnico, como na aquisição do conhecimento.

Na visão de Gonçalves (1986), a Engenharia do Conhecimento compreende na aquisição, análise e representação do conhecimento. Segundo o autor, o processo de aquisição do conhecimento com abordagem psicológica, procura “imitar” as ações do especialista e a abordagem baseada em modelo, caracteriza-se por tarefas básicas, por exemplo, diagnóstico.

A abordagem psicológica relatada por Gonçalves (1986), consiste na transferência do conhecimento heurístico de um especialista a outro de maneira que a interatividade com o sistema ocorra naturalmente e com segurança quanto aos seus procedimentos operacionais.

Segundo Rolandi (1986, *apud* FERNANDES, A.M.R., 2008, p.18), “a abordagem baseada em modelo complementa a abordagem psicológica exigindo do Engenheiro do Conhecimento uma explanação sob o aspecto técnico de operação do sistema para determinação de seus procedimentos em distintas situações.”.

Nascimento Júnior e Yoneyama (2010) apresentam sob o ponto de vista técnico, mediante o embasamento teórico apresentado por Fernandes (2008), o diagrama de blocos de um sistema de controle inteligente na **Figura 2.1**:

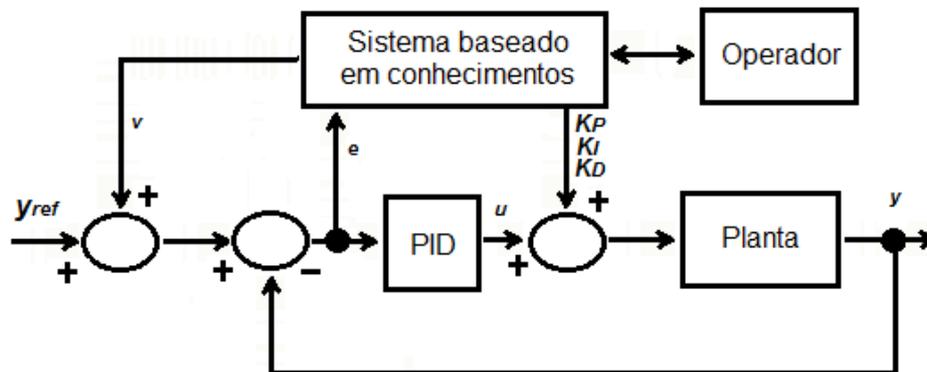


Figura 2.1 – Sistema baseado em conhecimentos em uma malha de controle.
Fonte: Extraída de Nascimento Júnior e Yoneyama (2010, p.61).

onde:

y_{ref} : é o sinal de referência para o sistema;

v : é o sinal que provém do sistema baseado em conhecimentos;

e : é o erro do sistema;

K_P , K_I , K_D : são os ganhos do controlador PID;

r : é o sinal que provém do sistema baseado em conhecimentos para atuar com o controlador PID na planta;

y : é o sinal de saída do sistema.

Os autores observam que a **Figura 2.1** caracteriza uma malha de controle típica de uma entrada e uma saída, caracterizado por Lathi (2007) como um sistema SISO (*Single Input – Single Output*) com os sinais provenientes do sistema baseado em conhecimentos v e r atuando diretamente nos sinais de referência e no controlador PID da planta.

Segundo Araújo *et al* (2005, p.3), os modelos de sistemas *fuzzy* para um sistema baseado em conhecimentos:

[...] podem ser divididos em dois tipos: os clássicos e os de interpolação. Os clássicos se caracterizam pela conclusão de cada regra especificar um termo nebuloso dentro de um conjunto fixo de termos, sendo estes termos conjuntos nebulosos convexos representados graficamente por funções com: triângulos, trapézios e funções de sino. Os modelos clássicos mais comuns são o modelo de Mamdani e o modelo de Larsen. O sistema nebuloso por interpolação se caracteriza por apresentar uma conclusão através de uma função estritamente monotônica, usualmente diferente para cada regra. Os modelos de interpolação mais comuns são o modelo de Takagi-Sugeno e o modelo de Tsukamoto.

Segundo Almeida *et al* (2010) e Nascimento Júnior e Yoneyama (2010), o sistema baseado em conhecimentos da **Figura 2.1** é formado por um controlador nebuloso típico, que consiste de uma etapa de fuzzificação, uma máquina de inferência e a defuzzificação conforme ilustra a **Figura 2.2**:

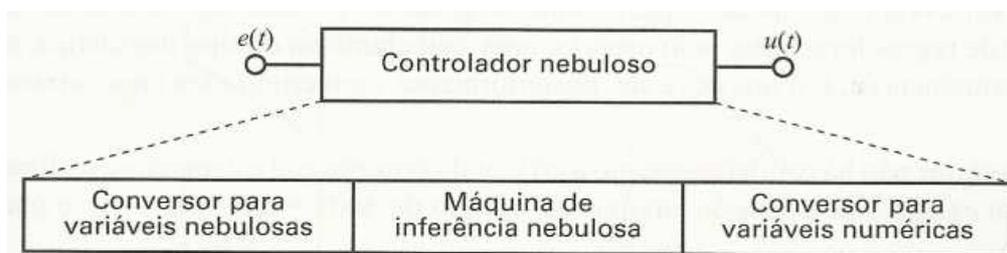


Figura 2.2 - Estrutura típica de um controlador nebuloso.

Fonte: Extraída de Nascimento Júnior e Yoneyama (2010, p.79).

onde:

e(t): é a variável de entrada para o sistema de inferência (valor *fuzzy*);

u(t): é a variável de saída do sistema de inferência (valor exato – *crisp*).

Baseado nesta estrutura, Nascimento Júnior e Yoneyama (2010) e Barbosa (2013) afirmam que, para que um controlador nebuloso possa expressar seu conhecimento empírico e heurístico humano na sua própria linguagem de

comunicação e reproduzir um resultado ao seu universo de discurso, na etapa de fuzzificação, o valor numérico deve passar por funções de associação que determinem seu grau de pertinência ao conjunto de regras.

Na etapa de fuzzificação, Tusset (2008), Nascimento Júnior e Yoneyama (2010), Altas e Mengi (2012) e Barbosa (2013) relatam que as funções de associação mais comuns são a trapezoidal, a gaussiana e a triangular. Esta última, é a mais comum adotada pelos fabricantes de controladores programáveis industriais e encontra-se disponível na biblioteca *fuzzy* para o ambiente *UnityPro*[®].

A **Figura 2.3** ilustra uma função de associação triangular $\mu_A(x)$, com superposição de 50% (TUSSET, A.M. 2008), que determina o valor exato $\lambda(x)$ (*crisp*) por meio da associação de seu grau de pertinência à uma proposição:

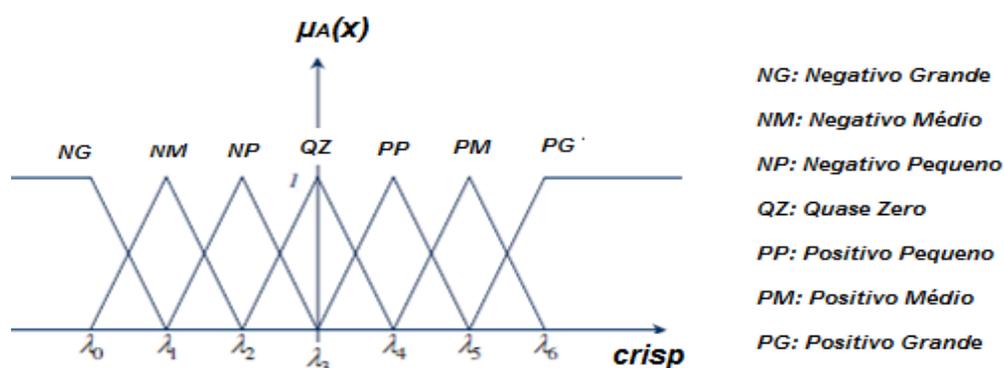


Figura 2.3 - Exemplo de função de associação triangular.
 Fonte: Extraída e adaptada de Barbosa (2013, p.16).

Seguindo pela estrutura típica de um controlador nebuloso relatada por Nascimento Júnior e Yoneyama (2010), Brandl (2008, p.5) relata que “a lógica *fuzzy* associada à teoria dos conjuntos permite a manipulação de informações imprecisas e ambíguas por meio de variáveis linguísticas.”.

Assim, baseado neste conceito, Barbosa (2013, p.4) define o sistema de inferência ou máquina de inferência nebulosa como “um método conveniente de mapear um espaço de entrada em um espaço de saída, baseado num conjunto de regras.”.

Portanto, o sistema de inferência atua nos resultados das funções de associação, ou seja, diretamente com as respostas em domínio lógico *fuzzy* para

entregar em domínio aritmético as respostas que relacionem as descrições humanas, inclusive com operadores lógicos **E** e **OU** para auxiliar nas descrições que envolvem o grau de pertinência de mais de uma variável (BRANDL, A., 2008).

Na etapa de defuzzificação, Tusset (2008), Nascimento Júnior e Yoneyama (2010), Altas e Mengi (2012) e Barbosa (2013), destacam como os principais métodos: o centro da área, o centro do máximo e a média da associação máxima. Este último, é o mais comum adotado pelos fabricantes de controladores programáveis industriais (Mamdani - *singleton*) e encontra-se disponível na biblioteca fuzzy para o ambiente *UnityPro*[®].

Segundo Simões e Shaw (2007, *apud* TUSSET, A.M., 2008, p.132), o método da média da associação máxima como solução mais plausível por desconsiderar o formato das funções de pertinência na saída e utilizar a saída cujo valor tenha o maior valor de pertinência e pode ser representado pela equação (2.1):

$$\mu^* = \sum_{m=1}^M \frac{\mu_m}{M} \quad (2.1)$$

onde:

μ_m : é o m-ésimo elemento no universo de discurso;

M : é o número total de elementos.

O Apêndice B detalha a teoria do controle *fuzzy* com abordagem sobre os métodos de Mamdani e de Takagi-Sugeno e nas principais funções de associação, fuzzificação e métodos de defuzzificação.

2.3 SINTONIA DE CONTROLADORES EM SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM

Ziegler e Nichols (1942, *apud* NASCIMENTO JÚNIOR, C.L., YONEYAMA, T., 2010, p.61) afirmam que em sistemas de controle que a relação entre a entrada e saída do processo é levemente não-linear, o comportamento da curva de reação

caracteriza-se por um sistema de primeira ordem e em geral, são realizados controle por métodos convencionais.

Nascimento Júnior e Yoneyama (2010) e Schuttenberg *et al* (2014) apresentam na equação **(2.2)** a função de transferência no domínio transformado de Laplace (OGATA, K., 2010) de um sistema de primeira ordem:

$$G_p(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{\tau \cdot s + 1} \quad (2.2)$$

onde:

K: é o ganho do processo (adimensional);

τ : é a constante de tempo (em segundos);

θ : é o tempo de atraso (em segundos);

s: é a variável no domínio transformado de Laplace.

Segundo os autores, os sistemas de controle de nível possuem este comportamento e ilustram na **Figura 2.4**, a curva de reação típica em sistemas de primeira ordem para a resposta a um degrau unitário:

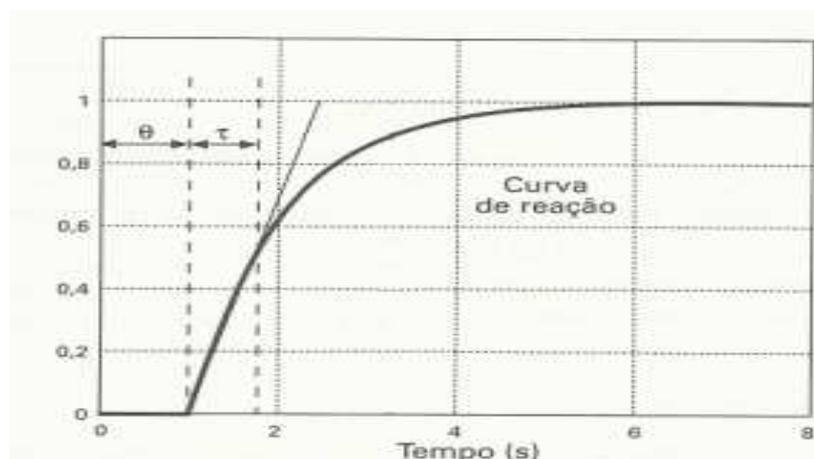


Figura 2.4 - Curva de reação típica em sistemas de primeira ordem.
Fonte: Extraída de Nascimento Júnior e Yoneyama (2010, p.61).

Na visão de Nascimento Júnior e Yoneyama (2010), a sintonia de controladores visa a redução da variabilidade e boa sintonia está relacionada à estabilidade e velocidade de resposta da malha de controle.

Tomando a abordagem pelo método da curva de reação de Ziegler-Nichols (1942), Araújo *et al* (2005) relatam que o método da curva de reação consiste “com o sistema em malha aberta, aplicar uma perturbação na entrada de referência e obter a curva de reação do processo em formato sigmoidal (em situação contrária o método não é aplicável).”.

A **Figura 2.5** ilustra a curva de reação do processo com os intervalos de tempo t_1 e t_2 referentes a 28,3% e 63,2% do ganho do processo, sendo $c(\infty) = K$, para determinação dos coeficientes de ganho segundo o método de Ziegler-Nichols (1942) para a curva de reação:

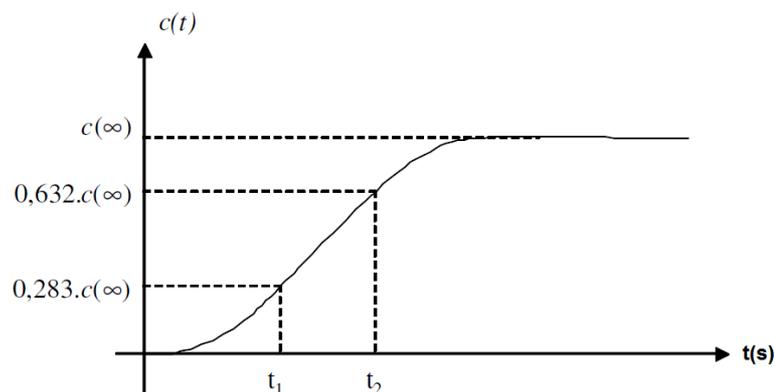


Figura 2.5 – Intervalos de tempo da curva de reação em sistemas de primeira ordem.
Fonte: Extraída de Tannuri e Cruz (2008, p 19).

Tannuri e Cruz (2008) mostram nas equações (2.3) e (2.4) como obter os parâmetros τ e θ definidos pela equação (2.2) a partir da curva de reação ilustrada na **Figura 2.4**:

$$\tau = 1,5 \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.3)$$

$$\theta = t_2 - \tau \quad (2.4)$$

A **Tabela 2.1** ilustra o formulário de cálculo para obter os coeficientes de ganho de um controlador PID, para o método da curva de reação de Ziegler-Nichols (1942):

Tabela 2.1 – Formulário dos coeficientes de ganho para controladores PI e PID pelo método da curva de reação de Ziegler-Nichols (1942).

K_C (adimensional) (Ganho proporcional)	T_I (s) (Tempo integral)	T_D (s) (Tempo derivativo)
$K_C = \frac{0,9 \cdot \tau}{K \cdot \theta}$	$T_I = \frac{\theta}{0,3}$	0
$K_C = \frac{1,2 \cdot \tau}{K \cdot \theta}$	$T_I = 2 \cdot \theta$	$T_D = 0,5 \cdot \theta$

Fonte: Extraída e adaptada de Tannuri e Cruz (2008, p.20).

2.4 CARACTERÍSTICAS DAS RESPOSTAS TRANSITÓRIAS

Na visão de Bittar *et al* (2011, p.76), “as respostas ao degrau têm importância porque na prática podem ser facilmente medidas, bastando para isso modificar o patamar das entradas e registrar as saídas.”. No entanto, os autores alertam que respostas transitórias dependem de condições iniciais e que podem sofrer perturbações ou ruídos, comuns em ambientes industriais.

Tomando esta abordagem, Ogata (2010) e Bittar *et al* (2011) relatam que os indicadores que serão apresentados para medidas de desempenho de sistemas subamortecidos (DORF, R.C.; BISHOP, R.H., 2013) podem ser empregados em especificações de projeto para melhor compreender se a resposta do sistema é favorável quando é realizado um comparativo.

Os parâmetros para medidas de desempenho de sistemas subamortecidos são ilustrados na **Figura 2.6**:

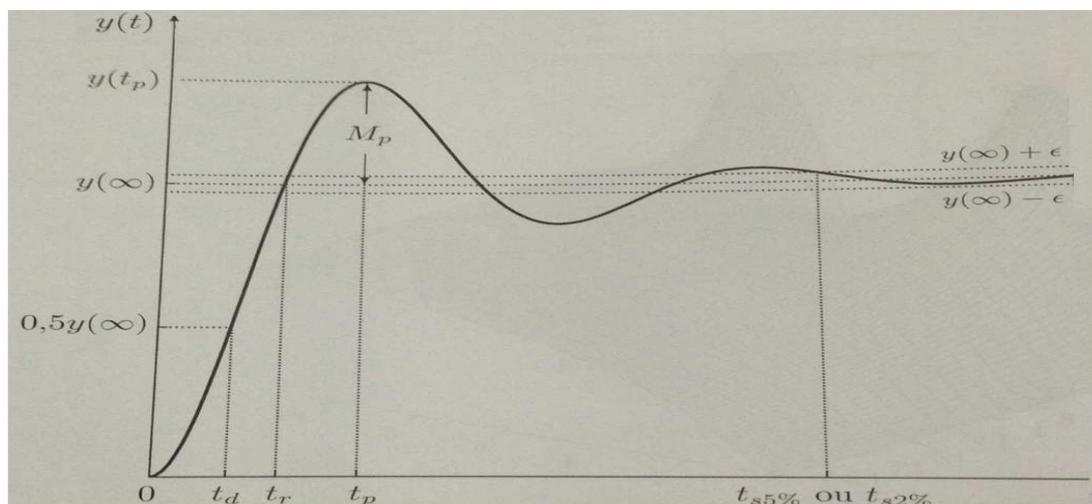


Figura 2.6 – Parâmetros de desempenho em sistemas subamortecidos.
Fonte: Extraída de Bittar *et al* (2011, p.76).

onde:

t_d : é o tempo de atraso (s);

t_r : é o tempo de subida (s);

t_p : é o tempo de pico (s);

t_s : é o tempo de acomodação (s);

M_p : é o sobressinal máximo (p.u).

2.4.1 Tempo de atraso (t_d)

Segundo Bittar *et al* (2011), o tempo de atraso é o tempo necessário para a resposta ao degrau alcançar pela primeira vez a metade do valor final. No entanto, neste trabalho, será considerado que o tempo de atraso t_d é o tempo de atraso θ definido na equação (2.2) em razão do sistema de controle de nível adotado reproduzir uma curva de resposta típica de um sistema de primeira ordem conforme ilustrado pela **Figura 2.4**.

2.4.2 Tempo de subida (t_r)

Para sistemas com amortecimento crítico ou sistemas superamortecidos o tempo de subida normalmente é definido como o tempo necessário para a resposta ao degrau ir de 10% a 90% do seu valor final. Para sistemas subamortecidos, define-se como o primeiro instante em que a resposta ao degrau alcança 100% do seu valor final (CASTRUCCI, P.; MORAES, C., 2007; BITTAR, A., CASTRUCCI, P.L., SALES, R.M., 2011).

2.4.3 Tempo de pico (t_p)

O tempo de pico é o tempo necessário para a resposta ao degrau alcançar o primeiro pico de sobressinal, que somente ocorre em sistemas subamortecidos. No instante de pico, a derivada da resposta ao degrau é nula, sendo assim, têm-se $t = t_p$ (CASTRUCCI, P.; MORAES, C., 2007; BITTAR, A., CASTRUCCI, P.L., SALES, R.M., 2011).

2.4.4 Tempo de acomodação (t_s)

O tempo de acomodação é o tempo necessário para que a resposta ao degrau passe a permanecer dentro de uma faixa de tolerância em torno do valor final. Esta faixa é usualmente especificada em porcentagem do valor final, por exemplo, $\pm 2\%$ ou $\pm 5\%$ de, representados na **Figura 2.6** por $t_{s2\%}$ e $t_{s5\%}$ (CASTRUCCI, P.; MORAES, C., 2007; BITTAR, A., CASTRUCCI, P.L., SALES, R.M., 2011).

2.4.5 Sobressinal máximo (M_p)

O sobressinal é definido como máximo valor de pico da resposta menos o seu valor final em porcentagem do seu valor final (BITTAR, A., CASTRUCCI, P.L., SALES, R.M., 2011) e pode ser definido pela equação **(2.5)**:

$$M_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \quad (2.5)$$

Segundo Bittar *et al* (2011), em sistemas com amortecimento crítico e sistemas superamortecidos, apenas t_s e t_r são considerados como medidas de desempenho, pois nestes sistemas não há sobressinal.

2.5 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE CONTROLADORES PID DIGITAL FUZZY

Para melhor ilustrar a metodologia proposta, serão apresentados três exemplos de aplicação de controladores PID digital *fuzzy* em sistemas de primeira ordem. Nestes exemplos observou-se na abordagem as características de respostas transitórias, o uso dos parâmetros para medidas de desempenho de sistemas subamortecidos ilustrados na **Figura 2.6** e a sintonia dos controladores através da curva de reação.

Os autores utilizaram como variáveis de entrada para as funções de associação, a relação entre as grandezas físicas, pressão e temperatura respectivamente, com seus níveis de variação para estabelecer um determinado comportamento em sua região de não-linearidade ou para garantir atuação em sistemas cujos os métodos de controle convencionais falham ou não atingem o nível de resposta desejado.

Inicialmente, como exemplo de aplicação, será apresentado o controle de nível de um tanque cilíndrico através da medição da pressão diferencial. Consiste de um controlador Takagi-Sugeno, funções de associação triangular e para representar o valor numérico no processo de defuzzificação, a média ponderada de todas as saídas, representada pela equação (2.6):

$$\mu_w = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (2.6)$$

onde:

N: é o número de regras;

w_i: é o peso da regra;

z_i: é o grau de pertinência.

Na sequência, serão apresentados dois exemplos de aplicações (controle de pressão e de temperatura) que utilizaram um controlador Mamdani, funções de associação triangular e para representar o valor numérico no processo de defuzzificação, o método do centro da área representado no universo de discurso discreto pela equação (2.7):

$$\mu^{crisp} = \frac{\sum_{i=1}^R b_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^R \mu_i} \quad (2.7)$$

onde:

R: é o número de quantização da saída;

b_i: é o valor da variável de saída para o intervalo de quantização **i**;

μ_i: é o grau de pertinência.

2.5.1 Controle de nível

Neste exemplo, Bhaskar *et al* (2013) apresentaram o desenvolvimento de um aplicativo computacional gráfico para interação com o usuário baseado em controladores PID digital *fuzzy* no ambiente *Matlab/Simulink*[®] para controle de nível de um tanque cilíndrico.

O controle de nível no tanque de um metro (1m) de altura ocorria através da medição da pressão diferencial por meio de um capilar instalado na parte inferior do tanque e o aumento de pressão era diretamente proporcional ao aumento do nível de água no tanque.

A detecção de nível foi realizada por um sensor de pressão diferencial, modelo SX05DN da empresa Honeywell, que convertia as alterações no nível de água em variações de resistência.

Este sensor também convertia as variações de resistência em tensão equivalente para o sensor de pressão colocado na parte superior do tanque, cuja a entrada estava conectada à outra extremidade do capilar, através de um amplificador analógico.

Bhaskar *et al* (2013) realizaram experimentos com os seguintes equipamentos:

- Transdutor de pressão diferencial;
- Fonte de excitação;
- Amplificador analógico;
- Placa ADC – DAC;
- Módulo de *interface* de entradas e saídas.

O diagrama de blocos do sistema é ilustrado na **Figura 2.7**:

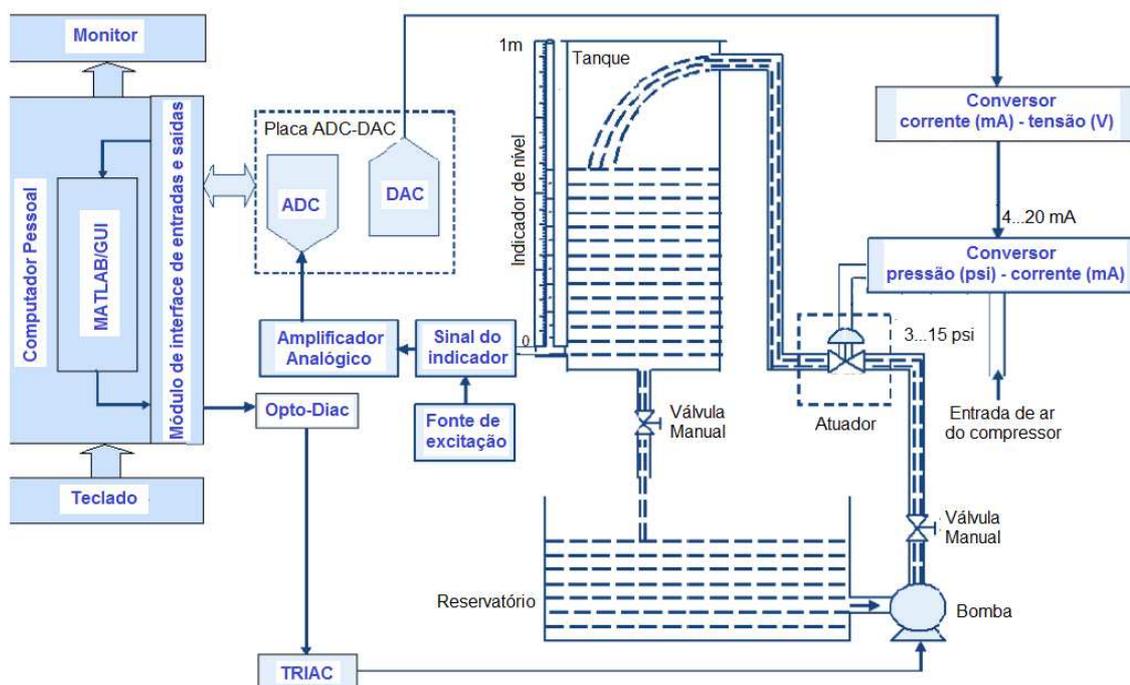


Figura 2.7 – Diagrama de blocos do sistema de controle de nível.
Fonte: Extraída e adaptada de Bhaskar *et al* (2013, p.54).

Neste sistema, um computador foi responsável em realizar a aquisição dos valores de tensão correspondentes à variável de nível através de conversores ADC e DAC, modelo DAC7541A da empresa Burr-Brown, instalados em uma placa de entradas e saídas (DIOT) com 24 entradas e saídas digitais e três temporizadores com resolução de 16 bits da empresa Advantech, projetados exclusivamente para esta aplicação.

Os experimentos foram realizados com base no desenvolvimento do aplicativo computacional gráfico para interação com o usuário no ambiente *Matlab/Simulink*[®] envolvendo três controladores: PID analógico (**PIDC**), controladores PID digital *fuzzy* (**FLC**) e PID digital *fuzzy* integrado (**IFLC**), correspondente às ações em cascata dos controladores **PIDC** e **FLC**.

O esquema de controle adotado nos controladores *fuzzy* por Bhaskar *et al* (2013) consistiam de um controlador Takagi-Sugeno com sete funções de associação triangular e duas entradas: o erro (**error**) e a variação de erro (**changeinerror**) e a saída do processo (**ca**).

Para relacionar as proposições no sistema de inferência, os autores utilizaram o operador mínimo. Os resultados obtidos são apresentados na **Figura 2.8** para uma referência (**Ref**) de 0,15 m:

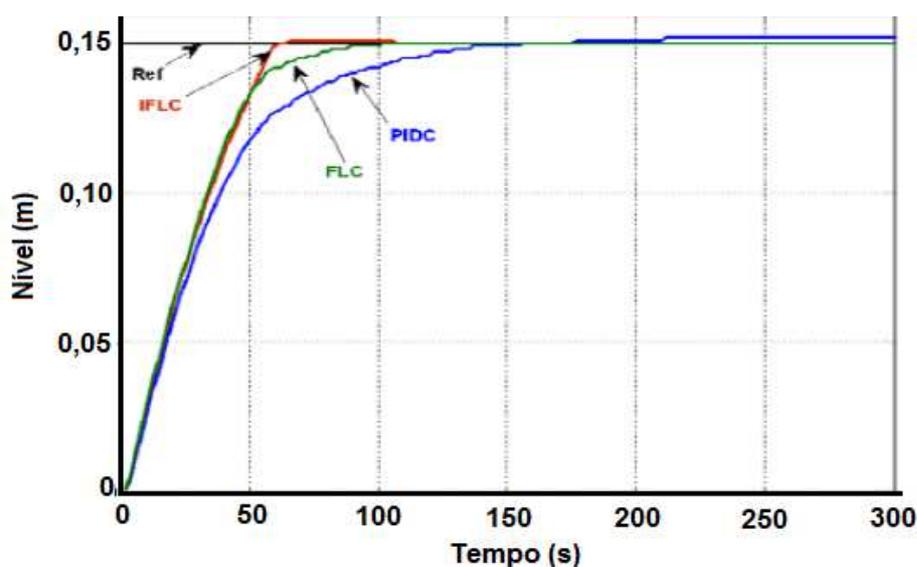


Figura 2.8 – Curva de resposta do sistema para uma referência de 0,15 m. Fonte: Extraída e adaptada de Bhaskar *et al* (2013, p.58).

Baseado nos resultados das simulações da **Figura 2.8**, Bhaskar *et al* (2013) apresentam os resultados obtidos através de um estudo comparativo na **Tabela 2.2**:

Tabela 2.2 – Estudo comparativo das medidas de desempenho entre os controladores de nível.

Controlador	t_r (s)	t_s (s)	M_p (m)
PID analógico	76,40	156,80	0,02
PID digital <i>fuzzy</i>	51,30	102,00	0,01
PID digital <i>fuzzy</i> integrado	50,60	61,80	sem sobressinal

Fonte: Extraída e adaptada de Bhaskar *et al* (2013, p.57).

2.5.2 Controle de pressão

Na visão de Kanagaraj *et al* (2009), o controle de pressão é considerado essencial em áreas como geração de vapor em plantas industriais, controle de reação em indústria química, aquecimento, ventilação e ar condicionado, extração de petróleo e controle na emissão de poluentes em automóveis.

As simulações realizadas por Kanagaraj *et al* (2009) visaram estabelecer o comparativo entre as curvas de resposta do sistema de controle pressão para os Controladores PID Analógico e digital *fuzzy*. Para medir a pressão no tanque, os autores propuseram o uso de um micro controlador, modelo AT91M55800A da empresa ATMEL, com taxa de amostragem de 0,5 segundos, indicadores e transmissores de pressão de alta precisão.

Segundo os autores, a ação de controle para a válvula pneumática foi feita por meio de um conversor de tensão-corrente e corrente-pressão com a finalidade de controlar a entrada de ar que é fornecida continuamente a partir de um compressor de ar portátil proporcional ao controle eletropneumático ligado à entrada do tanque.

O esquema de controle utilizou um controlador *fuzzy* do tipo Mamdani com três entradas: o erro $e(k)$, variação de erro $\Delta e(k)$ e a somatória do erro $\Sigma e(k)$ e a saída do processo $y(k)$, conforme ilustrado em diagrama de blocos na **Figura 2.9**:

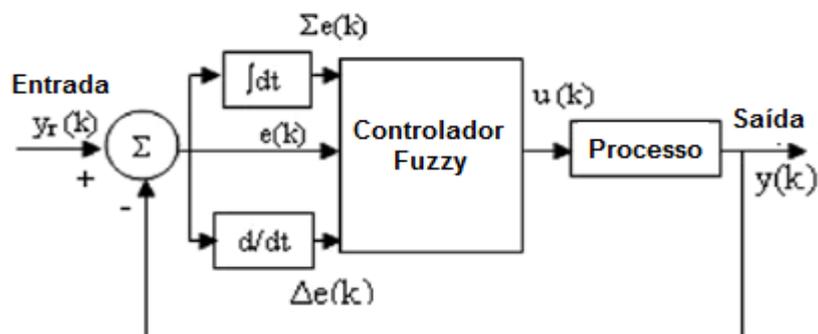


Figura 2.9 – Diagrama de blocos típico de um controlador PID digital *fuzzy*.
Fonte: Extraída e adaptada de Kanagaraj *et al* (2009, p. 295).

Para relacionar as proposições no sistema de inferência, os autores utilizaram o operador mínimo e na **Figura 2.10**, apresentam os resultados obtidos durante a simulação para uma referência de pressão de 3 bar:

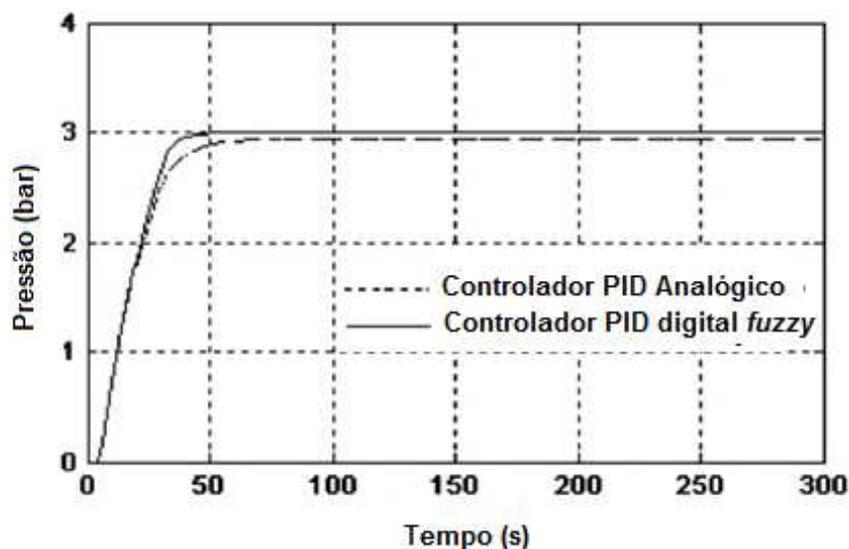


Figura 2.10 – Curva de resposta do sistema para uma referência de 3 bar.
Fonte: Extraída e adaptada de Kanagaraj *et al* (2009, p. 297).

2.5.3 Controle de temperatura

Para a aplicação de controle de temperatura em um processo de extrusão de plástico, Balakrishman e Ravi (2010) propuseram realizar a modelagem em ambiente computacional *Matlab/Simulink*[®] considerando três zonas de medição de temperatura: zona do tambor, adaptador e zona morta; e, destacaram que para ter uma boa qualidade na produção de plástico, cada zona deve ser adequadamente ajustadas e controladas de forma precisa, pois há aquecedores em diferentes condições de temperatura.

Assim como Kanagaraj *et al* (2009), Balakrishman e Ravi (2010) utilizaram funções de associação triangular e para relacionar as proposições no sistema de inferência, o operador mínimo. O esquema de controle utilizou um controlador *fuzzy* do tipo Mamdani com duas entradas: o erro (**e**) e a variação de erro (**ce**) e para representar o valor numérico na defuzzificação, adotaram o método descrito pela equação (2.7).

O diagrama de blocos do sistema é ilustrado na **Figura 2.11**:

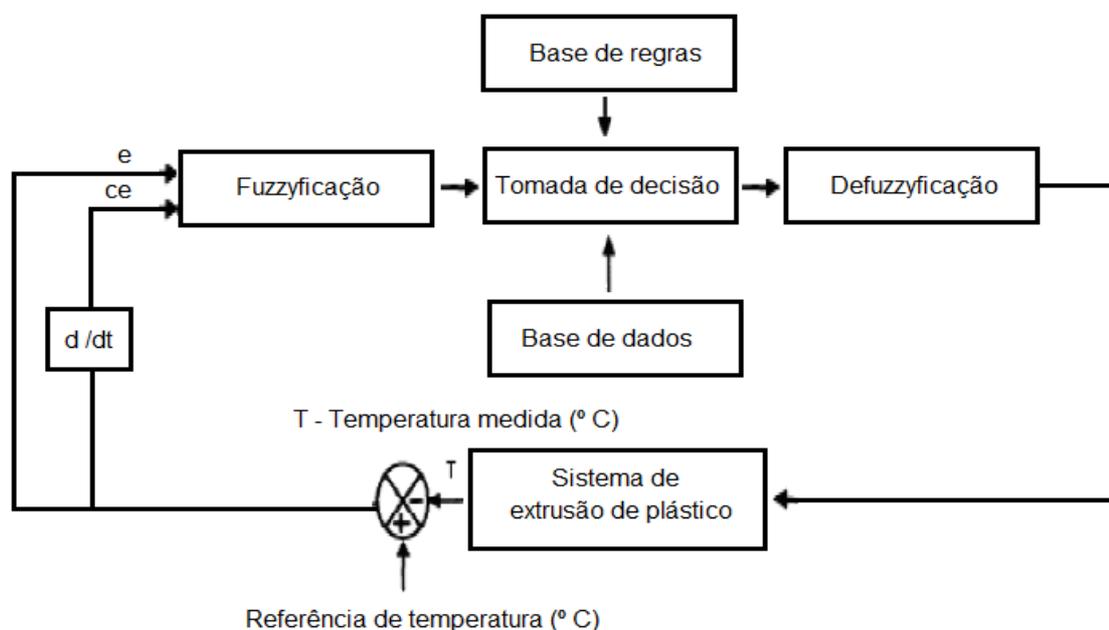


Figura 2.11 – Controlador PID digital *fuzzy* no processo de extrusão de plástico.
Fonte: Extraída adaptada de Balakrishman e Ravi (2010, p.137).

As simulações realizadas por Balakrishman e Ravi (2010) destacaram a eficiência de um controlador PID digital *fuzzy* em sistemas de primeira ordem e também permitiram estabelecer o comparativo entre as curvas de resposta do sistema de controle de temperatura para os Controladores PID Analógico e PID digital *fuzzy*.

A **Figura 2.12** ilustra o resultados obtidos pelos autores para os seguintes parâmetros, baseados na equação (2.1), sendo $K = 0,92$, $\tau = 144s$ e $\theta = 10s$:

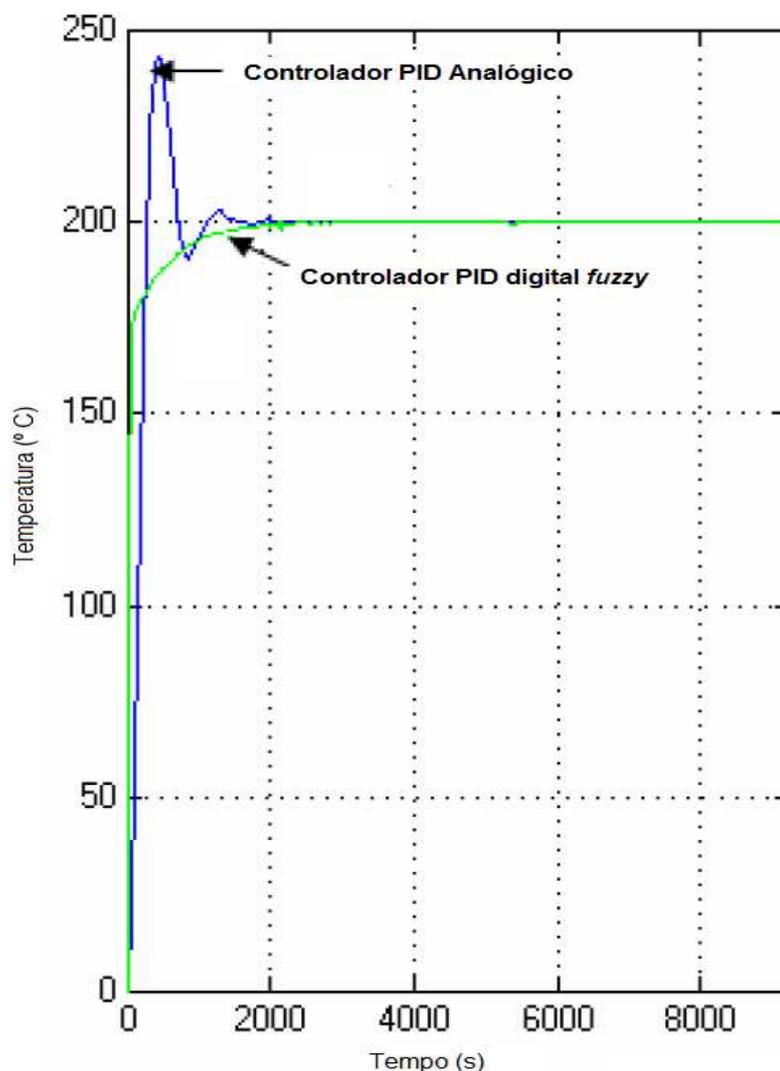


Figura 2.12 – Curva de resposta do sistema para uma referência de 200° C.
Fonte: Extraída adaptada de Balakrishman e Ravi (2010, p.139).

2.6 APLICAÇÃO DO PAC COMO CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY PARA CONTROLE DE NÍVEL EM PROCESSOS DE NEUTRALIZAÇÃO DE PH

Os resultados apresentados por Kanagaraj *et al* (2009) para o controle de pressão e Balakrishman e Ravi (2010) para o controle de temperatura, consideraram apenas a resposta gráfica para ilustrar o desempenho do projeto dos controladores ao contrário da abordagem realizada por Bhaskar *et al* (2013) para controle de nível.

Bhaskar *et al* (2013) acrescentaram à resposta gráfica, uma análise comparativa de desempenho entre os controladores de nível apresentando os resultados de alguns dos indicadores propostos por Ogata (2010) e Bittar *et al* (2011) ilustrados na **Figura 2.6**.

A proposta do Controlador PID Digital Fuzzy traz uma nova abordagem com o PAC como controlador PID digital ao invés dos métodos existentes que utilizam SDCD como controladores de processos e mantém o método da curva de reação proposto por Ziegler-Nichols (1942) para a sintonia em controladores convencionais.

O Controlador PID Digital Fuzzy é apresentado como aperfeiçoamento dos controladores de nível utilizados por Garcia (2006, 2008) e como uma variação da proposta de Bhaskar *et al* (2013). Esta proposta de controlador de nível é também uma variação de outros métodos já existentes em aplicações em sistemas de primeira ordem com controlador tipo Mamdani, tais como as estruturas apresentadas por Kanagaraj *et al* (2009) e Balakrishman e Ravi (2010).

Garcia *et al* (2013, p.1) relatam que “o processo de neutralização de pH pode ser encontrado em diferentes processos industriais, por exemplo, tratamento de efluentes, processos biotecnológicos e processos químicos” e segundo os autores, as pesquisas sobre o controle deste processo são justificadas pela alta não-linearidade e pelo tempo de atraso que o processo apresenta.

Tomando esta abordagem, a proposta do Controlador PID Digital Fuzzy apresentada neste trabalho é um projeto de controlador *fuzzy* para atender a demanda por sistemas de controle inteligentes eficientes em diversos segmentos da indústria, em especial nos ramos químico, petroquímico, de celulose e de alimentos.

Shinsky (1996, *apud* GARCIA, C., LOURENÇO, L., MORALES, C., 2013, p.1) relata que o processo de neutralização de pH tem a finalidade de mudar o pH da vazão de entrada (influyente) adicionando um reagente (variável manipulada) para obter na vazão de saída o pH desejado.

Segundo Garcia (2006) e Haddad (2013), o pH consiste de um indicador para a acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução. As reações de neutralização ocorrem entre misturas de soluções ácidas ($0 < \text{pH} < 7$) e básicas ($\text{pH} > 7$) de modo que o pH seja neutralizado ($\text{pH} = 7$), produzindo água e um sal.

A importância do controle de nível em sistemas industriais automatizados, as tecnologias aplicáveis na medição direta de nível e o uso da instrumentação industrial em geral, inclusive para controle de pressão e de temperatura, são tratadas no Apêndice C, por meio da apresentação dos níveis de controle industrial classificados por Andrade (2007).

Apesar da metodologia apresentada ter sido testada em um sistema de controle de nível de tanque em um processo de neutralização de pH, a proposta pode ser também testada na modelagem matemática de outros sistemas cuja a resposta típica seja de um sistema de primeira ordem, tais como aplicações de controle de pressão e temperatura apresentados nos exemplos de aplicação por Kanagaraj *et al* (2009) e Balakrishman e Ravi (2010), respectivamente.

Com base no exposto, a transcrição equivalente do Controlador PID Digital Fuzzy para o ambiente *UnityPro*[®] permitiu também, usufruir os principais diferenciais do PAC: controlador híbrido (sistema de monitoramento das variáveis de processo em tempo real integrado ao ambiente computacional de programação do controlador), elevada taxa de atualização e ciclo de amostragem (CASTRUCCI, P.L., MORAES, C.C., 2007; ANDRADE, A., YAMAGUCHI, M.Y., 2008).

O PAC utilizado neste trabalho de pesquisa é o modelo Modicon M340[®] e foi lançado em 2007 pela empresa Schneider Electric como o primeiro PAC concebido para superar as normas e certificações para aplicação e instalação do equipamento quanto à vibração, temperatura, humidade e altitude (SCHNEIDER ELECTRIC, 2013).

As características apresentadas do PAC Modicon M340[®] e o tamanho otimizado para a instalação em painéis de automação, ilustrado na **Figura 2.13**, reforçam os benefícios da proposta do Controlador PID Digital Fuzzy:



Figura 2.13 – PAC Modicon M340[®].

Fonte: Extraída de Schneider Electric (2013, p.1).

Outro aspecto que contribuiu positivamente na proposta de aplicação do PAC está relacionado com o desenvolvimento da programação, permanecendo em conformidade com a norma IEC61131-3, publicada em 1994, que na visão de Fonseca (2010), foi o primeiro esforço real para padronização das linguagens de programação para a automação industrial.

Ainda, em complemento à norma IEC61131-3, a *PLC Open*[®] fundada em 1992, vai ao encontro de um dos maiores desafios na programação de controladores programáveis: a portabilidade. Este órgão tem realizado um trabalho de padronização das instruções de programa para cada linguagem de programação, agregando mais agilidade aos programadores no desenvolvimento do aplicativo computacional para os controladores.

O Apêndice D detalha as principais características da norma IEC61131-3 e também faz a abordagem quanto aos benefícios de aplicação da *PLC Open*[®] em ambientes computacionais para programação de controladores programáveis.

3. CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY PARA CONTROLE DE NÍVEL EM PROCESSOS DE NEUTRALIZAÇÃO DE PH

3.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta inicialmente a modelagem da planta-piloto de controle de nível de um tanque em um processo de neutralização de pH.

Na sequência serão abordadas a modelagem matemática dos controladores propostos por Garcia (2006, 2008) e a organização da proposta do Controlador PID Digital Fuzzy em diagrama de blocos em ambiente *Matlab/Simulink*[®], para melhor ilustrar a proposta deste trabalho.

3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA PLANTA-PILOTO

Segundo Schuttenberg *et al* (2014, p.59), para a identificação de um sistema:

Modelar é o princípio básico para qualquer análise de um sistema independente de suas características. Quando o modelo se aproxima do sistema original, ele é considerado como válido, ou seja, informações significativas podem ser retiradas sobre sua dinâmica e seu desempenho.

Os autores relatam que o modelo matemático de um sistema descreve o seu comportamento respeitando as leis físicas e pode ser analisado a partir de uma certa excitação, que é o sinal de entrada. O comportamento do sistema sob ação desta excitação é denominado resposta do sistema e, no domínio da frequência, a razão entre a resposta do sistema pela sua entrada é denominada função de transferência.

A amostragem de dados para obter a função de transferência de um sistema, em geral, pode ser realizada através de ensaios monitorados por instrumentos de medição apropriados, como por exemplo o uso do osciloscópio em medições de sinais elétricos (CAMPO, A.B., 2012; SCHUTTENBERG, R.M.C., REIS, D.F.G., SILVA, H.O.F., FÉLIX JÚNIOR, S.B., 2014).

Embora os métodos computacionais tenham mostrado ser bastante confiáveis, por se basearem em modelos aproximados e executarem bem sua função, os modelos matemáticos ainda são utilizados (GARCIA, C., 2008; SCHUTTENBERG, R.M.C., REIS, D.F.G., SILVA, H.O.F., FÉLIX JÚNIOR, S.B., 2014).

Segundo Von Zuben (2014, p.1), “uma razão fundamental para a obtenção de um modelo matemático de um sistema dinâmico é a necessidade de existência deste modelo para que se possa desenvolver um controlador para o sistema dinâmico”.

Tomando esta abordagem, Tannuri e Cruz (2008) relatam a importância de dispor-se de estimativas preliminares do processo e se possível dos parâmetros do controlador através de experiência prévia com sistemas de controle semelhantes ou em casos que se dispõe de um modelo matemático para o sistema.

Mesmo assim, Tannuri e Cruz (2008) e Bittar *et al* (2011) alertam que o “ajuste no campo pode ser necessário para se garantir a sintonia fina do controlador, principalmente se o modelo disponível do sistema é incompleto ou não muito preciso.”.

Baseado nos conceitos apresentados, Garcia (2006, 2008) propõe a modelagem matemática para simulações computacionais em ambiente *Matlab/Simulink*[®] dos controladores e do processo como uma alternativa preliminar que visa a diminuição do tempo de comissionamento e instalação em campo.

A modelagem matemática para simulações computacionais apresentada por Garcia (2008) segue os dois procedimentos básicos para identificação de sistemas relatados por Von Zuben (2014): a modelagem fenomenológica e a modelagem empírica.

A modelagem fenomenológica, ou identificação analítica de sistemas, envolve a análise da dinâmica do sistema físico e o desenvolvimento de um modelo matemático para o mesmo a partir da física do processo. A modelagem empírica, ou identificação computacional de sistemas, envolve coleta de dados das características de entrada-saída do sistema e utilização destes para obtenção de um modelo matemático que aproxima do comportamento observado.

As simulações dos controladores convencionais de Garcia (2006, 2008) e da proposta do Controlador PID Digital Fuzzy foram realizadas na planta-piloto ilustrada na **Figura 3.1**:

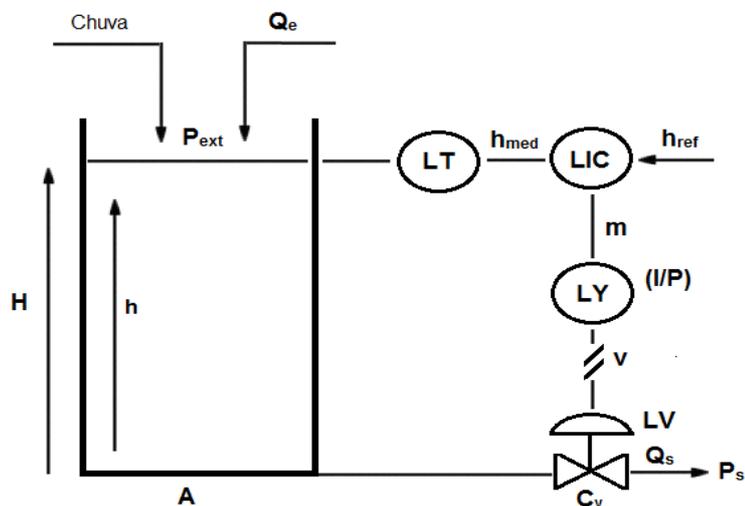


Figura 3.1 – Esquema do tanque cilíndrico vertical aberto.
Fonte: Extraída de Garcia (2006, p.566).

onde:

h_{ref} : é a referência de nível (m);

h_{med} : é o nível medido (m);

H : é a altura do tanque (m);

h : é o nível a ser controlado (m);

m : é a variável manipulada (m^3/s);

v : é o sinal de pressão na entrada (psi);

Q_e : é a vazão de entrada (m^3/s);

Q_s : é a vazão de saída (m^3/s);

C_v : é o coeficiente de vazão ($gpm/psi^{1/2}$);

P_{ext} : é a pressão externa sobre o fluído no tanque (Pa);

P_s : é a pressão na saída da válvula de controle (Pa).

A **Figura 3.2** mostra o diagrama de blocos do sistema em malha fechada:

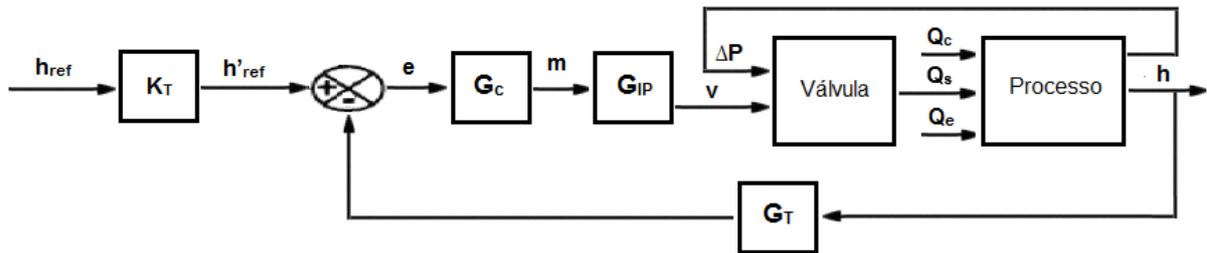


Figura 3.2 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.
Fonte: Extraída de Garcia (2006, p.572).

onde:

h_{ref} : é a referência de nível (m);

K_T : é a relação entre a referência de nível e o nível medido (m);

h'_{ref} : é a referência de nível após atuação do transmissor de nível (m);

e : é o erro do sistema;

G_c : é o controlador eletrônico;

G_{IP} : é o conversor I/P;

ΔP : é a queda de pressão na válvula (Pa);

m : é a variável manipulada (m^3/s);

v : é o sinal de pressão na entrada (psi);

Q_s : é a vazão de saída (m^3/s);

h : é o nível a ser controlado (m);

G_T : é o transmissor de nível.

Garcia (2006, p.566), apresenta algumas considerações e características preliminares para a modelagem matemática do sistema de controle apresentado na **Figura 3.1**. As variáveis a seguir serão assumidas fixas:

$\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$: é a massa específica da água (fluido incompressível);

$P_{\text{ext}} = P_s = 100.000 \text{ Pa}$: é a pressão sobre o fluido do tanque;

$A = 1 \text{ m}^2$: é a área do tanque;

$H = 2 \text{ m}$: é a altura do tanque;

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$: é a aceleração da gravidade.

Tomando esta abordagem, serão apresentadas a modelagem matemática para o ambiente *Matlab/Simulink*[®] da válvula, do conversor I/P, do transmissor de nível e do processo baseado na **Figura 3.2**. O Controlador PID Digital Fuzzy será apresentado na sequência, juntamente com o sistema de inferência utilizando a modelagem matemática do controlador PID digital.

3.2.1 Modelo da válvula

Garcia (2006, p.567) relata que a modelagem da válvula de controle **LV** é realizada em duas etapas: atuador e corpo. A dinâmica da válvula está concentrada no atuador, ao passo que o equacionamento que define a vazão que passa por ela é feito no modelo do corpo.

Segundo o autor, a dinâmica do atuador pode ser modelada através de um sistema de primeira ordem com constante de tempo de 5 segundos e serve para converter o sinal de pressão v , proveniente do conversor I/P, em movimento mecânico da haste da válvula. Esse movimento mecânico, dado pela variável X , é normalizado, de modo que seu valor é assumido como estando em uma faixa entre 0 e 1.

A **Figura 3.3** ilustra o diagrama de blocos do atuador da válvula de controle:

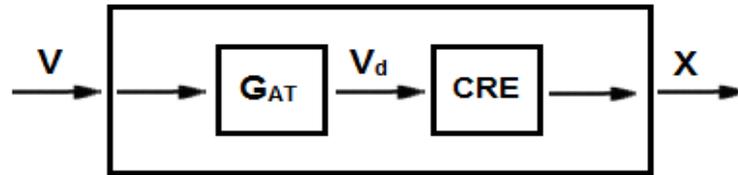


Figura 3.3 – Diagrama de blocos do atuador da válvula de controle.
Fonte: Extraída de Garcia (2006, p.569).

onde:

V: é o sinal de pressão na entrada (psi);

V_d: é o sinal de pressão **V** na válvula já afetado pela dinâmica do atuador;

CRE: é a curva de resposta estática do atuador;

X: é o movimento mecânico da haste da válvula (p.u.).

A equação (3.1) descreve a relação entre **V_d** e **V**, representado no diagrama de blocos da **Figura 3.3** por **G_{AT}**:

$$G_{AT} = \frac{V_d}{V} = \frac{1}{1 + \tau_{AT}s} = \frac{1}{1 + 5s} \quad (3.1)$$

onde:

τ_{AT}: é a constante de tempo do atuador da válvula de controle.

Segundo Garcia (2006, p.568), “ao se modelar a válvula, não se consegue representar o atuador apenas através de uma função de transferência, visto que a curva de resposta estática do atuador não é linear.”.

Tomando esta abordagem, o autor apresenta na **Tabela 3.1** os valores da curva de resposta estática do atuador da válvula de controle:

Tabela 3.1 – Valores da curva de resposta estática do atuador da válvula de controle.

<i>Sinal de entrada v (psi)</i>	<i>Sinal de saída X (p.u.)</i>
3	1
6	0,8
9	0,5
12	0,2
15	0

Fonte: Extraída de Garcia (2006, p.567).

O corpo da válvula possui característica inerente de vazão tipo igual-percentagem, com rangeabilidade R de 30:1. O coeficiente de vazão correspondente de uma válvula globo de sede simples de 6 polegadas é $C_v = 400 \text{ gpm}/(\text{psi})^{1/2}$. (GARCIA, C., 2006).

A equação **(3.2)**, apresenta a vazão volumétrica através do corpo da válvula:

$$Q_s = K_v \cdot C_v \cdot f(x) \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (3.2)$$

onde:

$C_v = 400 \text{ gpm}/\text{psi}^{1/2}$: é o coeficiente de vazão de uma válvula globo de sede simples de 6 polegadas;

$K_v = 2,40153 \cdot 10^{-5}$: é a constante de ajuste de unidade para cálculo de vazão;

$\rho = \rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$: é a massa específica do fluido que escoar pela válvula;

$\Delta P = P_{\text{montante}} - P_{\text{jusante}}$: é a queda de pressão na válvula (Pa).

Segundo Garcia (2006), como se trata de uma válvula com característica inerente de vazão igual-porcentagem (Apêndice C), com rangeabilidade $R = 30$, a equação (3.3) ilustra a função a ser adotada para $f(x)$:

$$f(x) = R^{x-1} = 30^{x-1} \quad (3.3)$$

Considerando-se a possibilidade de chuvas no local, o autor estabeleceu o valor nominal da vazão de entrada $Q_e = 6.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Para que se possa partir o sistema nas condições nominais de operação, com erro nulo no controlador, é necessário que a vazão de saída pela válvula seja igual à vazão nominal de entrada.

Da equação (3.2), resulta:

$$6.10^{-3} = 2,40153.10^{-5}.400.f(x) = \sqrt{\frac{\Delta P}{1000}} \quad (3.4)$$

A queda de pressão na válvula varia no tempo devido à influência do nível h e é definida na equação (3.5):

$$\Delta P = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot h_{\text{ref}} = 1000 \cdot 9,8.1 = 9800 \text{ Pa} \quad (3.5)$$

Substituindo a equação (3.5) em (3.4), resulta em:

$$f(x) = 0,19952 \quad (3.6)$$

Aplicando a equação (3.6) em (3.3) resulta em:

$$x = 0,52610 \quad (3.7)$$

A partir de uma interpolação linear realizada pelo autor com os valores da Tabela 3.1, obteve-se o valor de V_d equivalente ao valor de x ilustrado pela equação (3.7):

$$V_d = V = 8,7390 \text{ psi} \quad (3.8)$$

O resultado da interpolação linear comentada anteriormente para o valor de V_d equivalente ao valor de x é apresentado na equação (3.9):

$$m = 11,6520 \text{ mA} \quad (3.9)$$

Portanto, o modelo completo da válvula de controle é ilustrado na **Figura 3.4**:

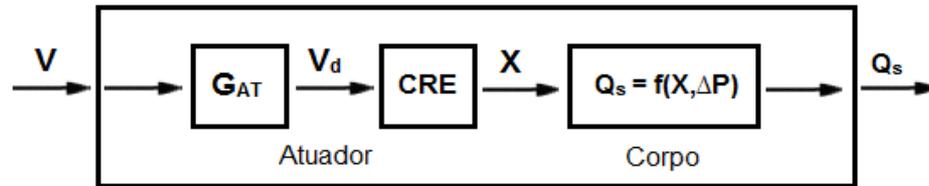


Figura 3.4 – Diagrama de blocos da válvula de controle.

Fonte: Extraída e adaptada de Garcia (2006, p.570).

3.2.2 Modelo do conversor I/P

A dinâmica do conversor I/P, segundo Garcia (2006), pode ser considerada desprezível e portanto, não será utilizada neste trabalho de pesquisa. O modelo é composto pela relação de ganho entre o sinal de pressão de entrada (em psi) e a faixa de operação para controle do nível do tanque (em mA) e é representado por:

$$G_{IP} = \frac{15 - 3}{20 - 4} = 0,75 \frac{\text{psi}}{\text{mA}} \quad (3.10)$$

Na abordagem da modelagem do processo, Garcia (2006) apresenta o conteúdo de cada um dos elementos da planta-piloto. Tomando esta abordagem, o modelo do conversor I/P é apresentado na **Figura 3.5**:

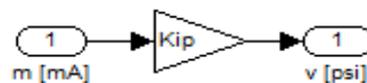


Figura 3.5 – Modelo do conversor I/P.

Fonte: Extraída e adaptada de Garcia (2006, p.573).

3.2.3 Modelo do transmissor de nível

Segundo Garcia (2006), o transmissor de nível **LT** pode ser considerado linear e é modelada através de um sistema de primeira ordem com constante de tempo de 0,5 segundos e sua função de transferência pode ser representada pela equação (3.11):

$$G_T(s) = \frac{K_T}{1 + \tau_T \cdot s} = \frac{8}{1 + 0,5 \cdot s} \quad (3.11)$$

onde:

K_T: é a relação entre a faixa de operação do controlador e o nível (8 mA/m);

τ_T: é a constante de tempo do transmissor de nível (s);

s: é a variável no domínio transformado de Laplace.

Garcia (2006) relata que recorreu na função de transferência ao uso de valores incrementais para as variáveis de entrada e de saída. Isto porque, como o instrumento foi modelado através de uma função de transferência, pressupõe-se condições iniciais nulas para o sinal sendo transmitido.

Como o autor supôs que a condição nominal de operação do sistema tenha como referência **h_{ref} = 1m**, isto implica que o sinal transmitido no instante inicial não pode ser nulo e afirma que em caso de uso de variáveis absolutas ao invés de incrementais, é necessário considerar valor inicial nulo para o sinal transmitido e, por conseguinte, para o nível do tanque, o que torna-se indesejável. Assim:

$$\bar{h} = h_{ref} = 1m \Rightarrow \therefore \bar{h}_{med} = 12mA \quad (3.12)$$

Portanto, a equação (3.12) representa o sinal que será enviado pelo transmissor de nível quando **h_{ref} = 1m**.

3.2.4 Modelo do processo

No diagrama de blocos da **Figura 3.2**, Garcia (2006) observa que a válvula e o processo não aparecem como funções de transferência e estão representados como blocos com mais de uma entrada e mais de uma saída. Esta observação deve-se ao fato de que os modelos que descrevem esses dois elementos são não-lineares e compostos de mais de uma entrada.

Para fins didáticos, o autor utilizou a representação por diagrama de blocos no ambiente *Matlab/Simulink*[®] para apresentar o modelo do processo. Na **Figura 3.6**, por exemplo, cada elemento da malha de controle foi colocado dentro de um bloco:

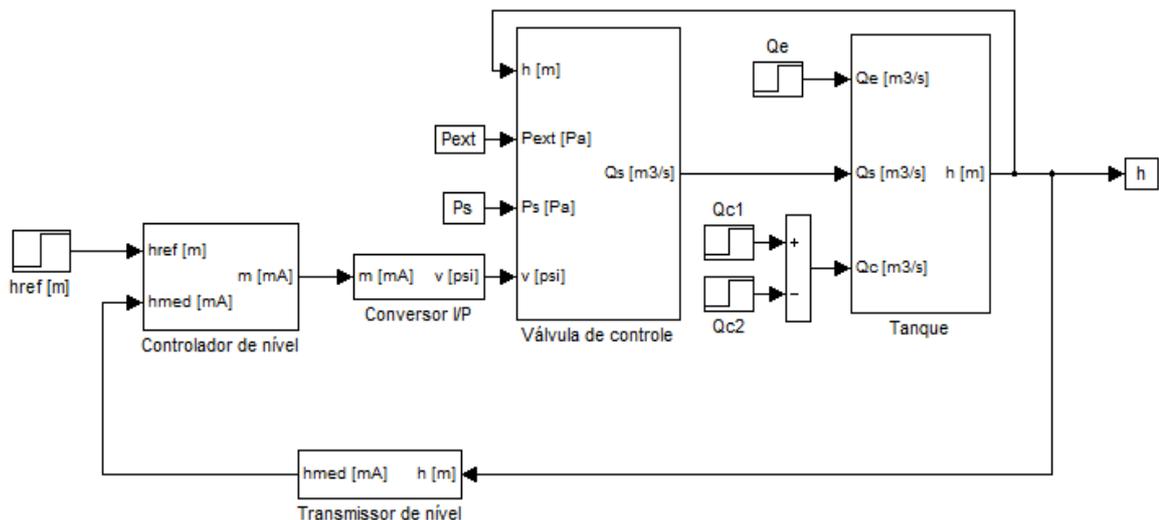


Figura 3.6 – Diagrama de blocos do processo em malha fechada.
Fonte: Extraída e adaptada de Garcia (2006, p.581).

Garcia (2006) relata que as pressões sobre o fluido no tanque (P_{ext}) e a pressão na saída da válvula de controle (P_s) foram deixadas em destaque para caso for necessário alterar o modelo, supondo que estas duas condições de contorno variem, a representação encontra-se preparada para tais alterações.

As vazões de entrada para o processo Q_e e Q_c e a variação da referência de nível h_{ref} também foram deixadas em destaque pelo autor na forma de variações em degrau, permitindo que durante a execução das simulações ilustradas no Apêndice E, essas variáveis possam ser modificadas bruscamente.

O modelo do conversor I/P já foi ilustrado na **Figura 3.5**. Na sequência, expandindo a apresentação cada um elementos do processo, a **Figura 3.7** mostra o modelo da válvula de controle:

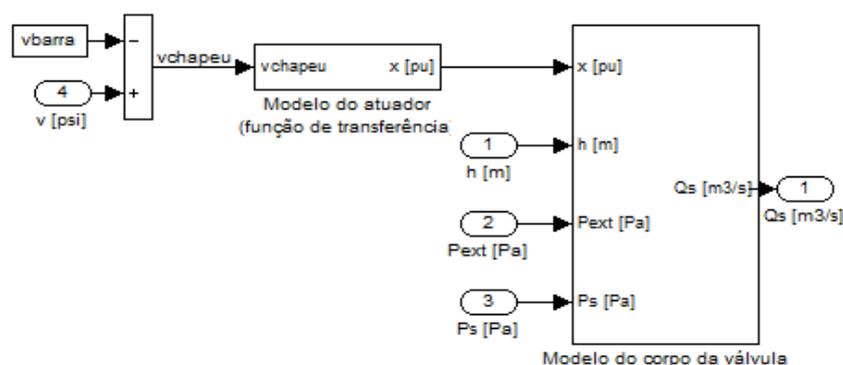


Figura 3.7 – Modelo da válvula de controle.

Fonte: Extraída e adaptada de Garcia (2006, p.573).

Segundo Garcia (2006), o modelo da válvula de controle está dividido em duas partes: atuador e corpo, conforme divisão realizada no modelo da válvula. O modelo do atuador da válvula de controle é representado na **Figura 3.8**:

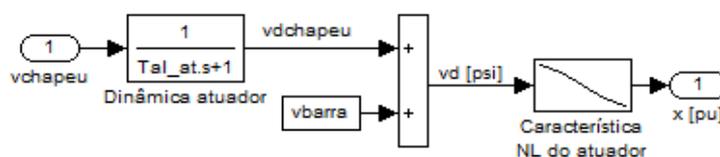


Figura 3.8 – Modelo do atuador da válvula de controle.

Fonte: Extraída e adaptada de Garcia (2006, p.574).

O modelo do corpo da válvula é apresentado na **Figura 3.9**:

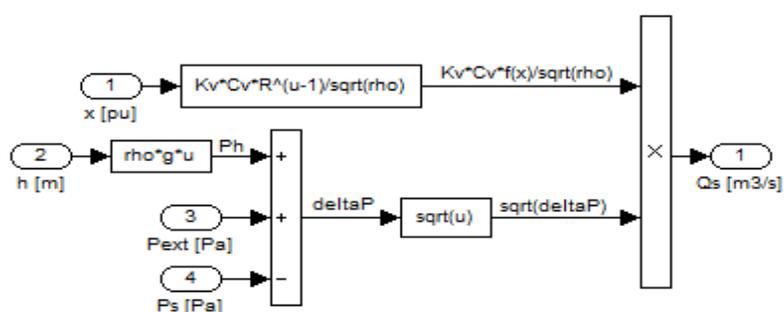


Figura 3.9 – Modelo do corpo da válvula de controle.

Fonte: Extraída e adaptada de Garcia (2006, p.574).

O autor apresenta na **Figura 3.10** o modelo do tanque com a presença de um elemento integrador limitando o valor do nível entre zero e a altura do tanque:

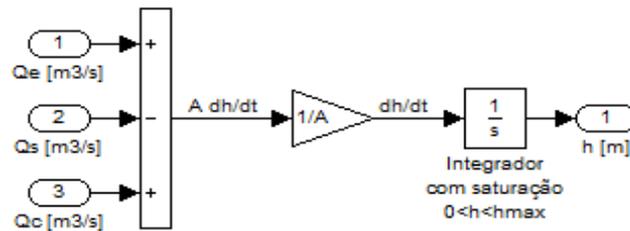


Figura 3.10 – Modelo do tanque.

Fonte: Extraída e adaptada de Garcia (2006, p.575).

Por fim, Garcia (2006) ilustra na **Figura 3.11** o modelo do transmissor de nível:

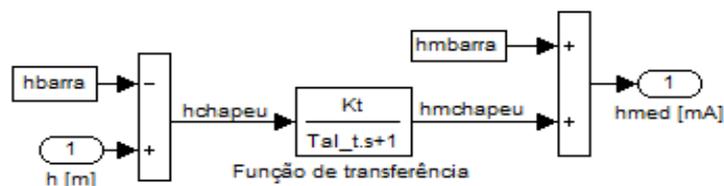


Figura 3.11 – Modelo do transmissor de nível.

Fonte: Extraída e adaptada de Garcia (2006, p.575).

O valor dos parâmetros, condições iniciais e variáveis de entrada são mostrados no Apêndice F, bem como as rotinas de programação para simulação da variação de nível na modelagem da planta-piloto que foi apresentada.

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO CONTROLADOR DE NÍVEL

Para desenvolver o comparativo de desempenho entre os controladores de nível de Garcia (2006, 2008) com a proposta do Controlador PID Digital Fuzzy, serão utilizados os indicadores propostos por Ogata (2010) e Bittar *et al* (2011).

As simulações para variação de nível na planta-piloto serão realizadas na modelagem matemática de cada um dos controladores que serão apresentados na sequência.

3.3.1 Modelagem matemática do Controlador PI Analógico

O diagrama de blocos da **Figura 3.12** ilustra o controlador PI analógico proposto por Garcia (2006):

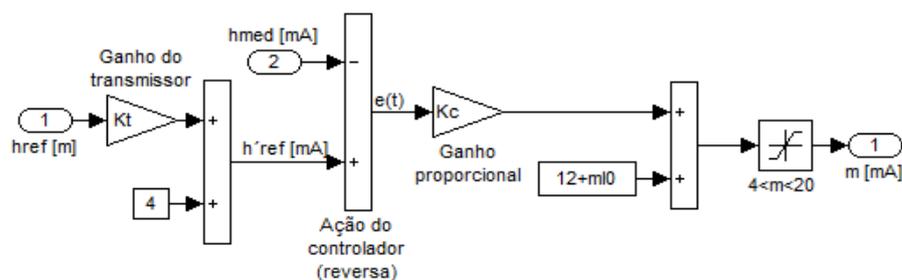


Figura 3.12 – Diagrama de blocos do Controlador PI Analógico.
Fonte: Extraída e adaptada de Garcia (2006, p.581).

onde:

h_{ref} : é a referência de nível (m);

K_T : é a relação entre a referência de nível e o nível medido (m);

h'_{ref} : é a referência de nível após atuação do transmissor de nível (m);

$e(t)$: é o erro do controlador PI analógico;

K_C : é o coeficiente de ganho proporcional;

mI_0 : é o sinal de saída equivalente à parte integral do controlador PI;

m : é a referência de nível na saída do controlador PI analógico (mA).

Garcia (2006) adotou a aplicação de um elemento saturador na saída do controlador PI analógico para manter a faixa de operação de 4 a 20mA, com base na curva de resposta estática do atuador da válvula de controle apresentado na **Tabela 3.1** e no ganho do conversor I/P estabelecido pela equação **(3.10)**.

O elemento saturador proposto por Garcia (2006) na saída do controlador PI analógico, será aplicado com a mesma finalidade na modelagem dos controladores PID digital e PID Digital Fuzzy que serão apresentados.

Segundo Guimarães *et al* (2014), “o controlador PI apresenta na saída uma resposta proporcional à amplitude do desvio em relação ao tempo de resposta.” e, segundo os autores, isto deve-se ao fato da ação integral somar todos os valores instantâneos do erro e multiplicar pelo ganho proporcional.

Ogata (2010), Nise (2012) e Dorf e Bishop (2013) relatam que, em geral, o controlador integral não é utilizado isoladamente, pois causaria maior instabilidade ao sistema, uma vez que necessita do erro para integrá-lo. Bittar *et al* (2011) e Guimarães *et al* (2014) relatam que a desvantagem da ação integral está relacionada às respostas oscilatórias que tendem a ser produzidas e que podem reduzir a estabilidade da planta.

Tannuri e Cruz (2007) relatam que, para minimizar a instabilidade em controladores PI analógico, recorre-se às técnicas para sintonia de controladores tais como o método da curva de reação por Ziegler-Nichols (1942), adotada como técnica de apoio para este trabalho de pesquisa.

3.3.2 Modelagem matemática do Controlador PID Digital

Em um sistema linear de controle em tempo discreto, uma equação de diferenças caracteriza a dinâmica do sistema e com o método da Transformada Z, a solução das equações de diferenças torna-se um problema de natureza algébrica (BITTAR, A., CASTRUCCI, P.L., SALES, R.M., 2011).

Tomando esta abordagem, Garcia (2008) adotou como método de aproximação dos domínios discretizado (plano z) e contínuo (plano s), a regra trapezoidal, conforme a orientação do fabricante que utiliza este método no processo de integração do controlador PID digital.

Segundo Garcia (2008) e Bittar *et al* (2011), em uma malha de controle digital o sinal do processo é amostrado através de ADC's (conversores analógico-digital), discretizado por meio de DAC's (conversores digital-analógico) e processado pelo controlador digital em formato binário e enviado à saída como um sinal do tempo contínuo por meio de um ZOH (segurador de ordem zero) para um EFC (elemento final de controle).

A Figura 3.13 ilustra o diagrama de blocos de um sistema de controle digital típico:

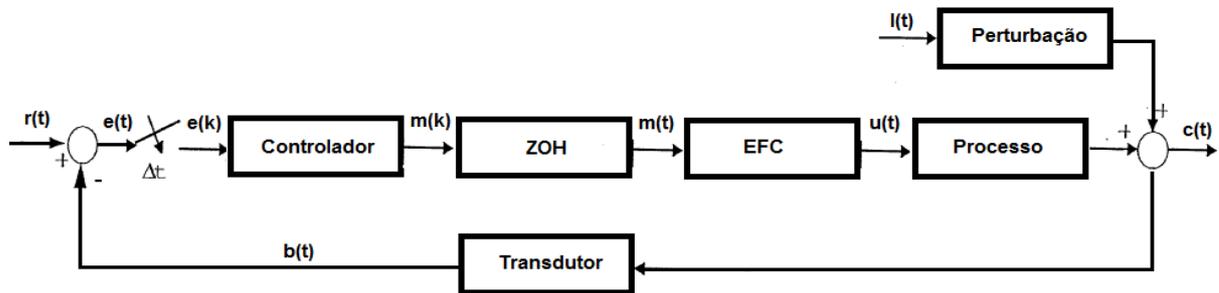


Figura 3.13 – Diagrama de blocos de um sistema de controle digital típico.
Fonte: Extraída e adaptada de Garcia (2008, p.12).

onde:

r(t): é o sinal de referência;

e(t): é o erro do sistema em malha fechada em tempo contínuo;

e(k): é o erro do sistema em malha fechada discretizado;

m(k): é o sinal de saída amostrado pelo controlador;

m(t) : é o sinal de saída em tempo contínuo enviado ao EFC;

u(t) : é o sinal de saída em tempo contínuo enviado ao processo;

l(t) : é o sinal de perturbação no processo;

c(t): é a saída do processo em malha fechada;

b(t): é o sinal de retorno do processo em malha fechada.

O ZOH gera na saída uma forma de onda com patamares, e comercialmente é a forma mais simples e mais comum de reconstruir o sinal original da entrada. Muito embora seguradores de ordem mais alta tecnologia possam ser concebidos e implementados como DAC de propósitos especiais, esses dispositivos mais complicados não oferecem vantagens significativas para a maioria dos problemas de controle de processos (GARCIA, C., 2006).

O exemplo da **Figura 3.14** ilustra o sinal $m(t)$ reconstruído por um ZOH antes de ser enviado a um EFC:

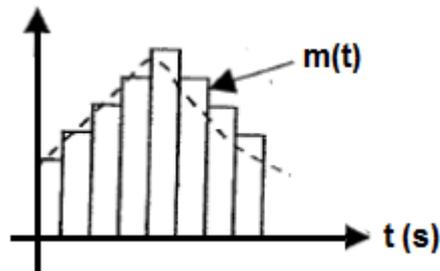


Figura 3.14 – Exemplo de sinal reconstruído por um ZOH.
Fonte: Extraída e adaptada de Garcia (2008, p.14).

A equação **(3.13)** descreve a função de transferência do controlador PID digital do PAC Modicon M340® (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012):

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = Yp(s) + Yi(s) + Yd(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + \frac{T_D \cdot s}{1 + T_D \text{ _lag} \cdot s} \right) \quad (3.13)$$

onde:

K_c : é o coeficiente de ganho proporcional;

T_i : é o tempo integral (s);

T_D : é o tempo derivativo (s);

T_D_lag : é o tempo de atraso da componente derivativa (s);

s : é a variável no domínio transformado de Laplace.

A regra trapezoidal ou aproximação por Tustin utilizada por Garcia (2008) e Costa (2012) para obter as equações do controlador PID digital no domínio discretizado, é descrita na equação **(3.14)**:

$$\frac{U(z)}{X(z)} = \frac{T}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1} \leftrightarrow \frac{1}{s} = \frac{T}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1} \leftrightarrow s = \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1} \quad (3.14)$$

Com base na equação (3.13), Garcia (2008) descreve o grupo de equações que serão utilizadas para obter o modelo para implementação em diagrama de blocos no ambiente *Matlab/Simulink*[®]:

$$Yp(s) = K_C \cdot E(s) \leftrightarrow Yp(z) = K_C \cdot E(z) \quad (3.15)$$

$$Yi(s) = \frac{K_C \cdot E(s)}{T_I \cdot s} \leftrightarrow Yi(z) = Yi(k-1) + K_C \cdot \frac{dt}{T_I} \left[\frac{E(k) + E(k-1)}{2} \right] \quad (3.16)$$

$$Yd + Yd \cdot T_D \cdot \text{lag} \cdot s = K_C \cdot E(s) \leftrightarrow Yd(z) = \frac{K_C \cdot T_D \cdot (1 - z^{-1})}{dt + T_D \cdot \text{lag} \cdot z^{-1}} \quad (3.17)$$

A partir das equações (3.15), (3.16) e (3.17), a representação do Controlador PID Digital do PAC Modicon M340[®] para simulação por diagrama de blocos adotada por Garcia (2008) é ilustrada na Figura 3.15:

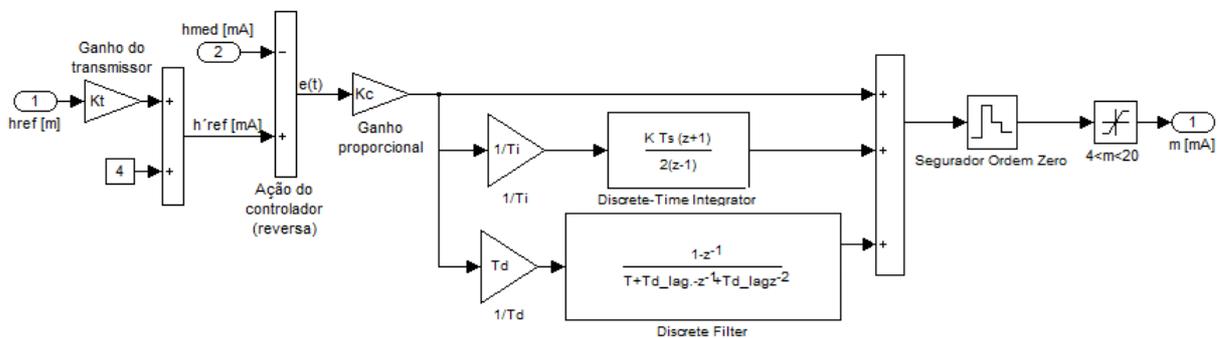


Figura 3.15 – Diagrama de blocos do Controlador PID Digital.

onde:

K_C: é o coeficiente de ganho proporcional;

T_I: é o tempo integral (s);

T_D: é o tempo derivativo (s);

T_{D_lag}: é o tempo de atraso da componente derivativa (s);

z: é a variável no domínio discretizado.

3.3.3 Modelagem matemática do Controlador PID Digital Fuzzy

Para estabelecer o Controlador PID Digital Fuzzy proposto para este trabalho de pesquisa, em série à modelagem do controlador PID digital do PAC Modicon M340[®], foi utilizado um sistema de inferência *fuzzy* com duas variáveis de entrada: a saída e a variação da saída do controlador PID digital; e uma variável de saída: o resultado do sistema de inferência (valor *crisp*) referente ao sinal de corrente (em mA) que passa pelo conversor I/P para a válvula de controle.

Baseado na modelagem do Controlador PID digital apresentada na **Figura 3.15**, o diagrama de blocos do Controlador PID Digital Fuzzy é ilustrado na **Figura 3.16**:

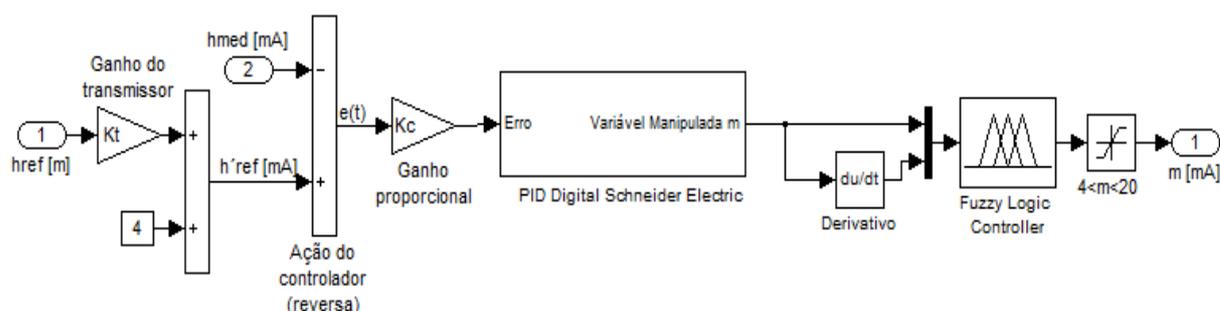


Figura 3.16 – Diagrama de blocos do Controlador PID Digital Fuzzy.

Segundo Nascimento Júnior e Yoneyama (2010), o sistema de inferência deve receber as informações sobre a saída do controlador PID digital, já convertidas em termos associados a variáveis linguísticas, especificamente graus de pertinência a conjuntos nebulosos e gerar a partir de regras, uma saída também do tipo linguístico, na forma de funções de pertinência, que deve ser, posteriormente, convertido para uma variável numérica (*crisp*) correspondente ao resultado da inferência.

As regras de inferência para o Controlador PID Digital Fuzzy foram concebidas considerando as características da biblioteca *fuzzy* do ambiente *UnityPro*[®], que realiza a fuzzificação de até 9 variáveis linguísticas por meio de funções de associação triangulares entre o primeiro e último termo e rampas para a primeira e a última função de associação (SCHNEIDER ELECTRIC, 2009).

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os procedimentos e as etapas de simulações empregadas na proposta do Controlador PID Digital Fuzzy para controle de nível de um tanque vertical cilíndrico aberto em um processo de neutralização de pH.

As macro etapas das simulações do Controlador PID Digital Fuzzy são mostradas na **Figura 4.1**, onde a principal divisão é entre as simulações no ambiente *Matlab/Simulink*[®] e a transcrição equivalente para o ambiente de programação do PAC visando testes de campo.

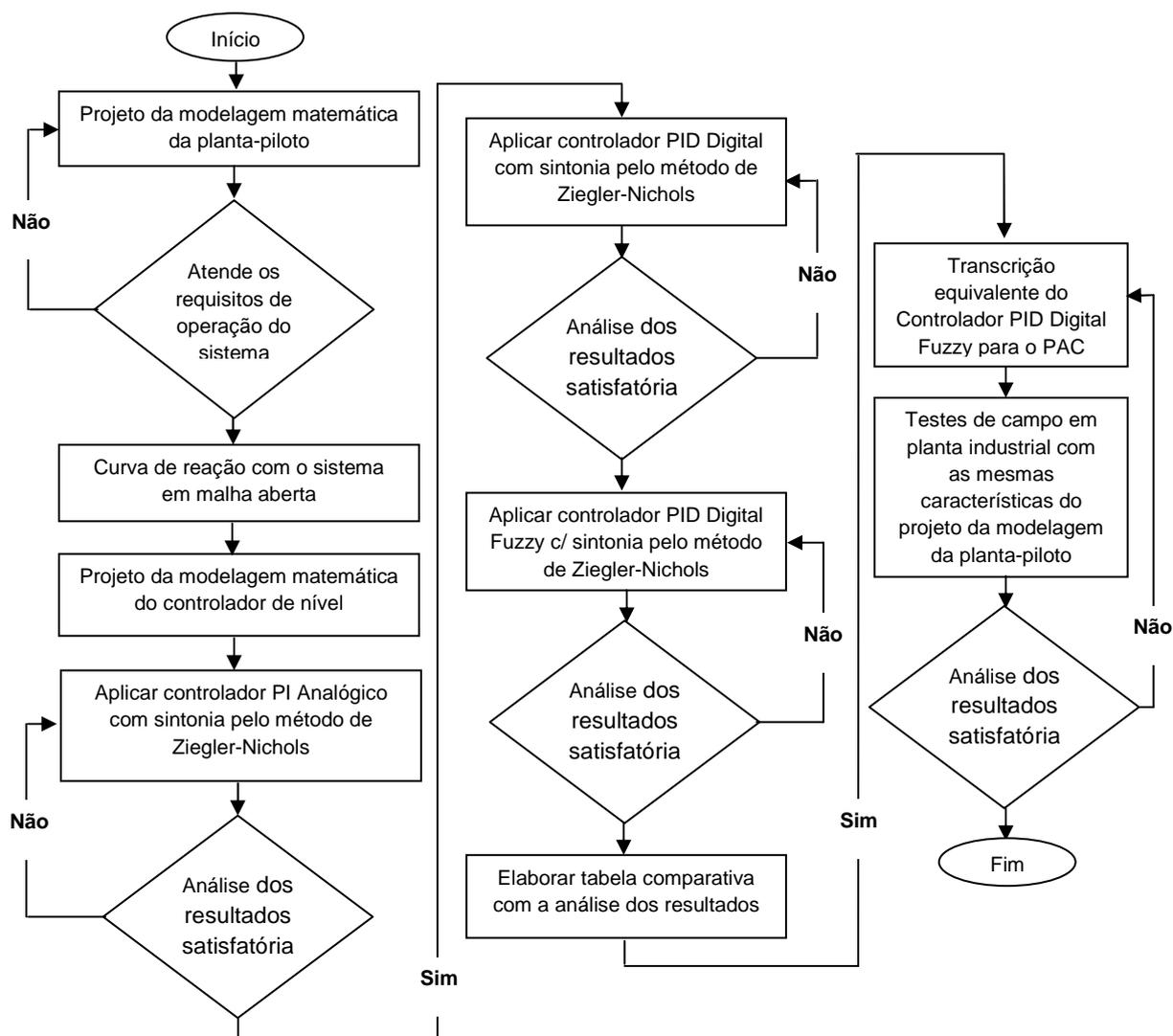


Figura 4.1 – Fluxograma de simulações do Controlador PID Digital Fuzzy.

4.2 SIMULAÇÕES DO CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY

As simulações foram desenvolvidas no ambiente *Matlab/Simulink*[®] com o objetivo de observar o comportamento da modelagem matemática da planta-piloto e do controlador de nível. Através de análises dos resultados obtidos, foi elaborada uma tabela comparativa com os indicadores para medidas de desempenho empregados nas especificações de projetos para sistemas de controle subamortecidos relatadas por Ogata (2010) e Bittar *et al* (2011).

As etapas de simulação consistem em:

- a) determinar a curva de reação do sistema em malha aberta e observar se a resposta atende os requisitos de operação do sistema;
- b) aplicar a sintonia pelo método da curva de reação proposto por Ziegler-Nichols (1942) no controlador de nível e observar se a metodologia proposta proporciona resultados satisfatórios;
- c) transcrever para o ambiente de programação do PAC, a programação correspondente com o sistema de inferência *fuzzy*, visando testes de campo em planta industrial com as mesmas características.

4.2.1 Análise da curva de reação do sistema em malha aberta

Tannuri e Cruz (2008, p.18) relatam que o método da curva de reação proposto por Ziegler-Nichols (1942) é destinado para sintonia em tempo real de controladores. Baseia-se em um único teste experimental que deve ser realizado com o sistema em malha aberta (controlador em modo manual).

Segundo os autores, produz-se um sinal do tipo degrau com amplitude definida na saída do controlador e a resposta do sistema é registrada. O gráfico desta resposta a degrau é chamada a curva de reação do sistema.

Baseado neste conceito, para realizar a análise da curva de reação do sistema, Garcia (2006) apresenta na **Figura 4.2** a associação do conversor I/P, da válvula de controle, do tanque e do transmissor de nível, sem a realimentação do sistema com

o controlador de nível, representando o diagrama de blocos da planta-piloto em malha aberta:

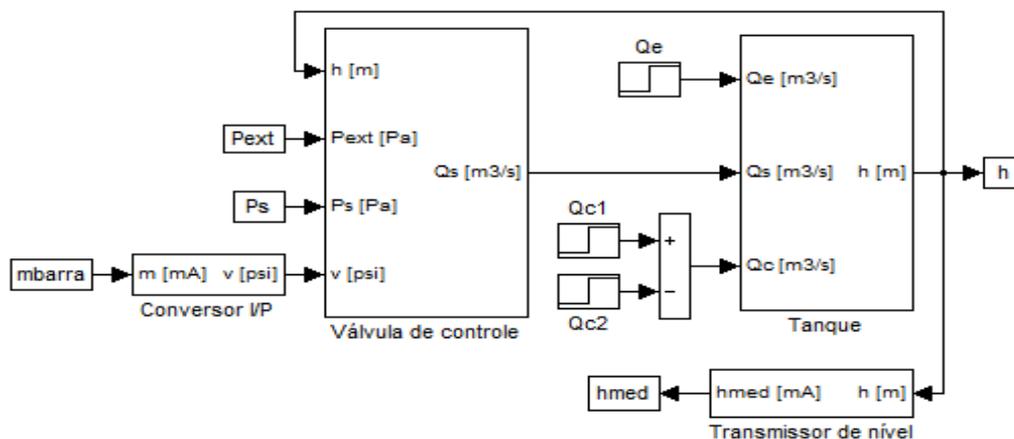


Figura 4.2 – Diagrama de blocos do sistema em malha aberta.
Fonte: Extraída de Garcia (2006, p.573).

A **Figura 4.3** ilustra a resposta do sistema em malha aberta:

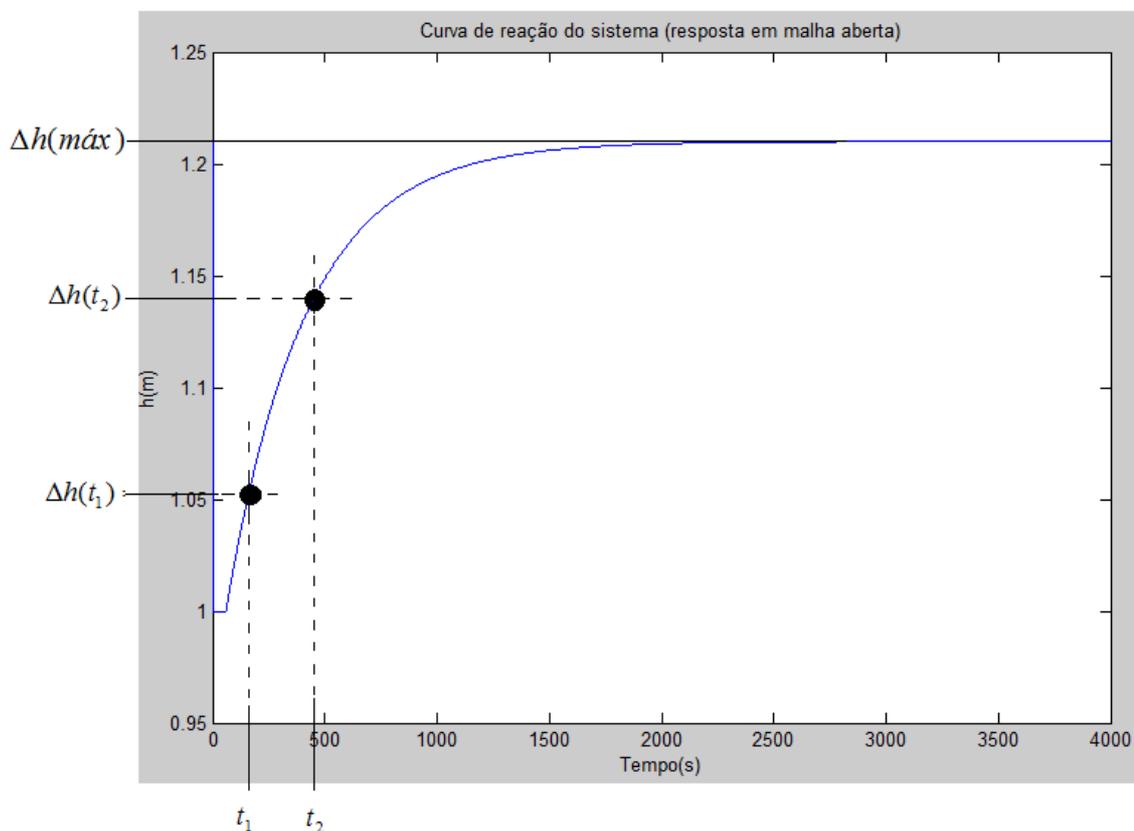


Figura 4.3 – Curva de reação do sistema (resposta em malha aberta).

Tomando esta abordagem, a análise do ganho em malha aberta foi estabelecida a partir da variação do nível representada pela equação (4.1):

$$\Delta h(m) = h_{final} - h_{inicial} = \Delta h(máx) - h_{inicial} = 1,21 - 1,00 = 0,21m \quad (4.1)$$

A variação do nível $h(m)$ e os intervalos de tempo t_1 e t_2 para 28,3% e 63,2% do ganho do processo foram obtidas a partir do gráfico de resposta do sistema em malha aberta ilustrada pela **Figura 4.3** e são representadas pelas equações (4.2) e (4.3):

$$\Delta h(t_1) = 1 + 0,283 \cdot 0,21 = 1,059m \Rightarrow t_1 = 176,30s \quad (4.2)$$

$$\Delta h(t_2) = 1 + 0,632 \cdot 0,21 = 1,132m \Rightarrow t_2 = 403,70s \quad (4.3)$$

Para obter os coeficientes de ganho para os controladores PI e PID pelo método da curva de reação de Ziegler-Nichols (1942) representados na **Tabela 2.1**, os parâmetros τ e θ foram obtidos a partir dos intervalos de tempo t_1 e t_2 .

4.2.2 Simulações com o Controlador PI Analógico

Segundo Garcia (2006), para se ter erro nulo com o sistema operando nas condições nominais, é necessário que o controlador de nível gera na saída 11,6520mA, conforme descrito pela equação (3.9), de forma que torne a vazão de saída idêntica à vazão nominal de entrada.

Sendo assim, o autor propôs adotar para $h_{ref} = 1m$ e simular sua variação em 10% ajustando o ganho proporcional $K_c = 10$ e tempo integral $T_I = 180s$, para que seja o valor nominal da saída do controlador que mantém o nível em seu valor de referência quando a vazão de entrada está em seu valor nominal e não está chovendo.

Os indicadores de desempenho e a resposta do sistema para variação de 10% em h_{ref} no Controlador PI Analógico para a proposta de Garcia (2006) é ilustrada na **Figura 4.4**:

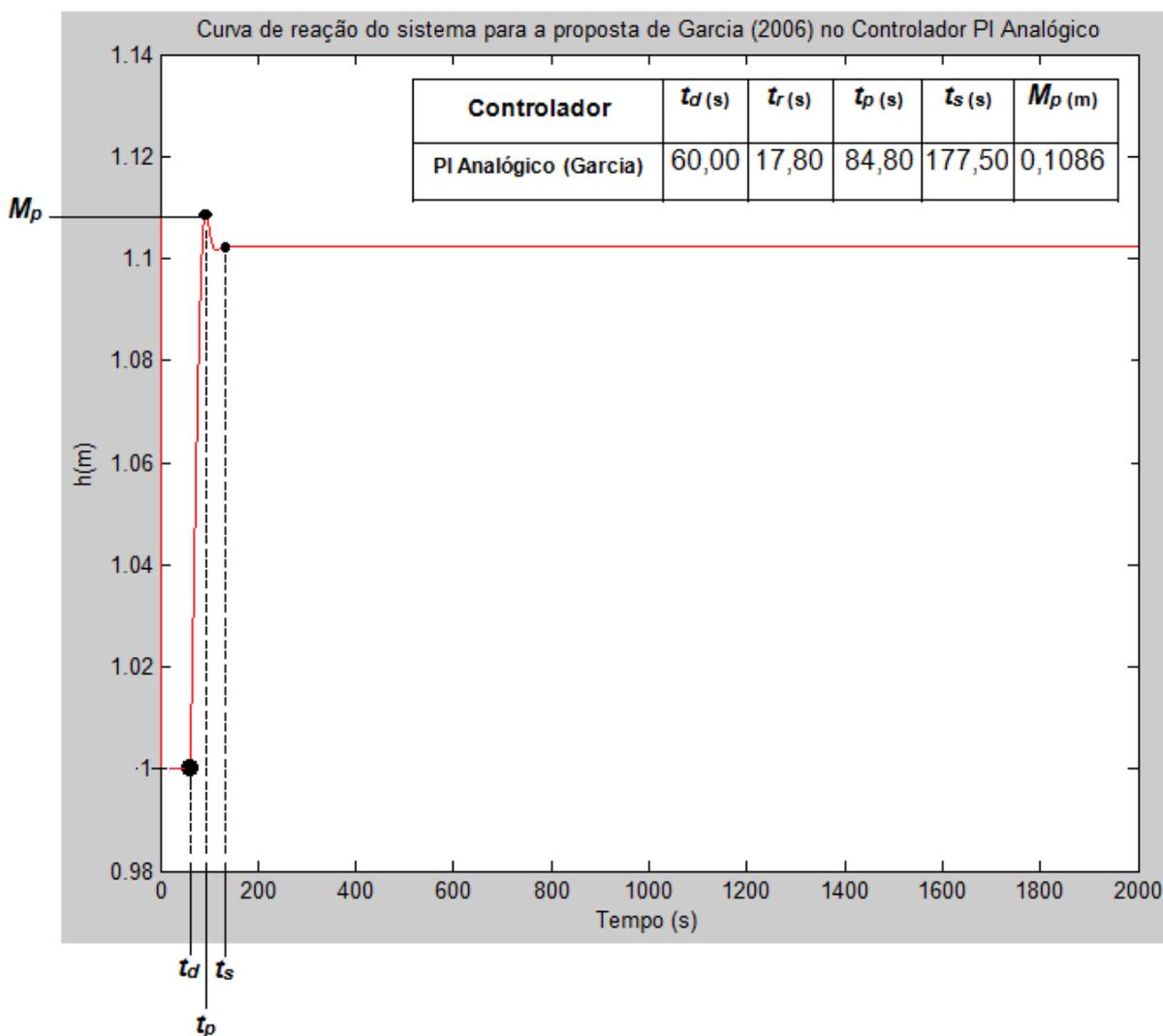


Figura 4.4 – Curva de reação do sistema para a proposta de Garcia (2006) no Controlador PI Analógico.

A simulação da proposta de Garcia (2006) apresentada na **Figura 4.4** não considerou o método de sintonia por Ziegler-Nichols (1942) proposto para o trabalho. Para aplicar a metodologia proposta de sintonia pelo método da curva de reação de Ziegler-Nichols (1942), utilizou-se as equações (2.3) e (2.4) para obter os coeficientes de ganho para controlador PI apresentados na **Tabela 2.1**.

Os parâmetros que foram obtidos após a aplicação desta metodologia são descritos na **Tabela 4.1**:

Tabela 4.1 – Parâmetros para simulação do Controlador PI Analógico.

τ (s)	θ (s)	K_C (adimensional)	T_I (s)
341,10	62,60	6,53	208,66

Baseado nos parâmetros da **Tabela 4.1**, os indicadores de desempenho e a resposta do sistema para variação de 10% em h_{ref} é ilustrada na **Figura 4.5**:

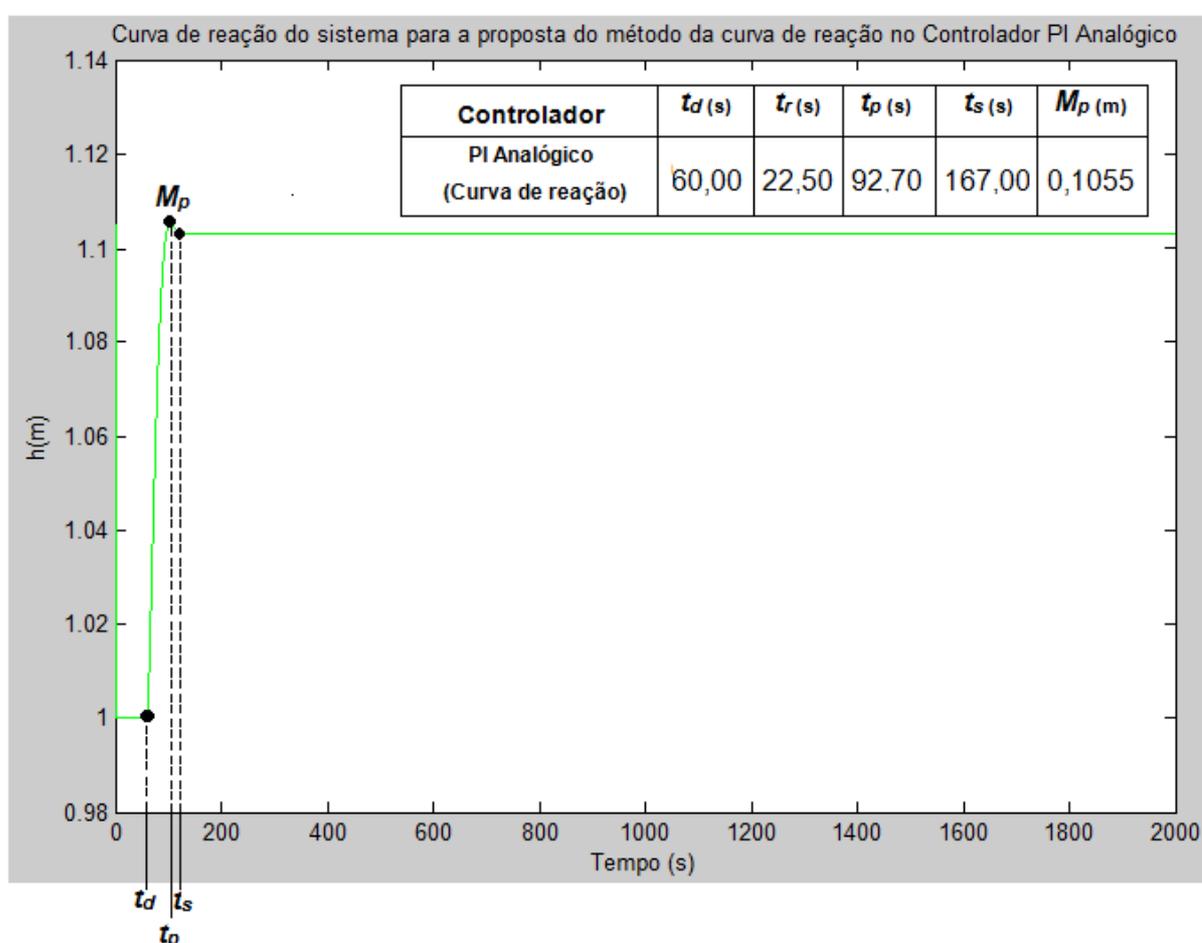


Figura 4.5 – Curva de reação do sistema para o Controlador PI Analógico.

A simulação do Controlador PI Analógico proposto por Garcia (2006) com método de sintonia por Ziegler-Nichols (1942) apresentada na **Figura 4.5** reduziu o tempo de acomodação e o sobressinal em relação à proposta inicial da **Figura 4.4**.

4.2.3 Simulações com o Controlador PID Digital

Seguindo a metodologia aplicada para o Controlador PI Analógico, no Controlador PID Digital aplicaram-se as equações (2.3) e (2.4) para obter os parâmetros τ e θ respectivamente e utilizaram-se do formulário dos coeficientes de ganho para controlador PID apresentados na Tabela 2.1.

Os parâmetros que foram obtidos após a aplicação desta metodologia são descritos na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Parâmetros para simulação do Controlador PID Digital.

τ (s)	θ (s)	K_C (adimensional)	T_I (s)	T_D (s)
341,10	62,60	8,71	125,20 s	31,30

Baseado nos parâmetros da Tabela 4.2, os indicadores de desempenho e a resposta do sistema para variação de 10% em h_{ref} é ilustrada na Figura 4.6:

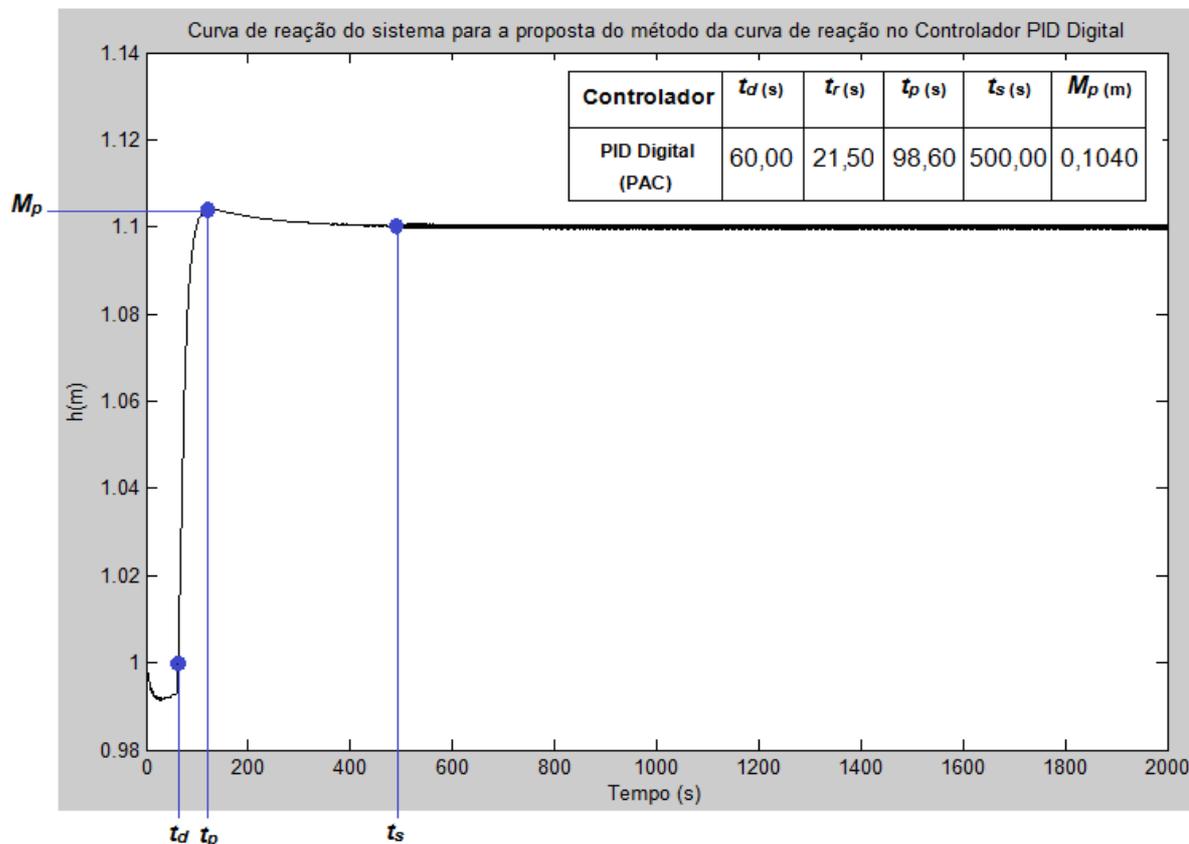


Figura 4.6 – Curva de reação do sistema para o Controlador PID Digital.

A simulação do Controlador PID Digital apresentado na **Figura 4.6** apresentou uma queda da referência durante o tempo de atraso, reduziu o tempo de subida, o sobressinal e aumentou o tempo de pico e de acomodação em relação ao Controlador PI Analógico da **Figura 4.5**.

4.2.4 Simulações com o Controlador PID Digital Fuzzy

O sistema de inferência do Controlador PID Digital Fuzzy é composto de duas entradas: **e** (saída do controlador PID digital) e **edt** (variação da saída do controlador PID digital); e do resultado da inferência na forma de funções de pertinência. Para unir os graus de pertinência às proposições, foi utilizado o operador máximo. As regras de inferência são apresentadas na **Tabela 4.3**:

Tabela 4.3 – Regras de inferência para o Controlador PID Digital Fuzzy.

		e				
		NM	NG	QZ	PM	PG
edt	N	PM	PG	QZ	NM	NG
	QZ	PM	PM	QZ	NM	NM
	P	QZ	QZ	QZ	NM	NG

Onde: N = negativo, QZ = quase zero, G = grande, NM = negativo médio, NG = negativo grande, PM = positivo médio, PG = positivo grande.

A superfície de controle para as regras de inferência apresentadas na **Tabela 4.3** é ilustrada na **Figura 4.7**:

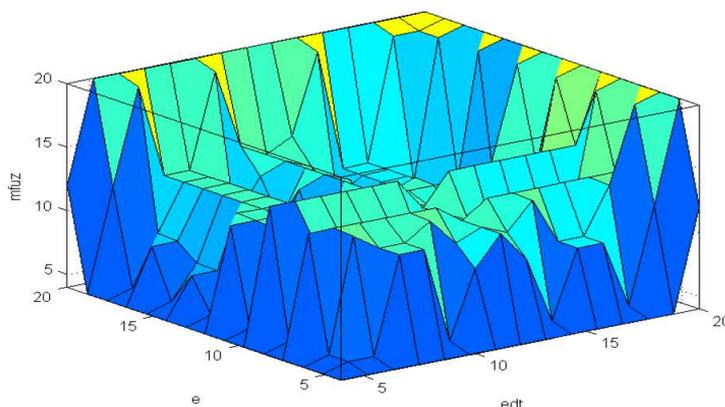


Figura 4.7 – Superfície de controle.

As regras de inferência e a superfície de controle foram desenvolvidas no *FIS* (THE MATHWORKS, INC., 2010) para simulação no ambiente *Matlab/Simulink*[®] e adotadas também para a transcrição equivalente no ambiente *UnityPro*[®] com base na abordagem pelas características de respostas transitórias apresentadas no Capítulo 2.

Seguindo a metodologia aplicada para o Controlador PI Analógico e no Controlador PID Digital, para o Controlador PID Digital Fuzzy, aplicaram-se as equações (2.3) e (2.4) para obter os parâmetros τ e θ respectivamente e utilizaram-se dos valores de coeficientes de ganho para controlador PID apresentados na Tabela 4.2.

Após a aplicação desta metodologia, os indicadores de desempenho e a resposta do sistema para variação de 10% em h_{ref} é ilustrada na Figura 4.8:

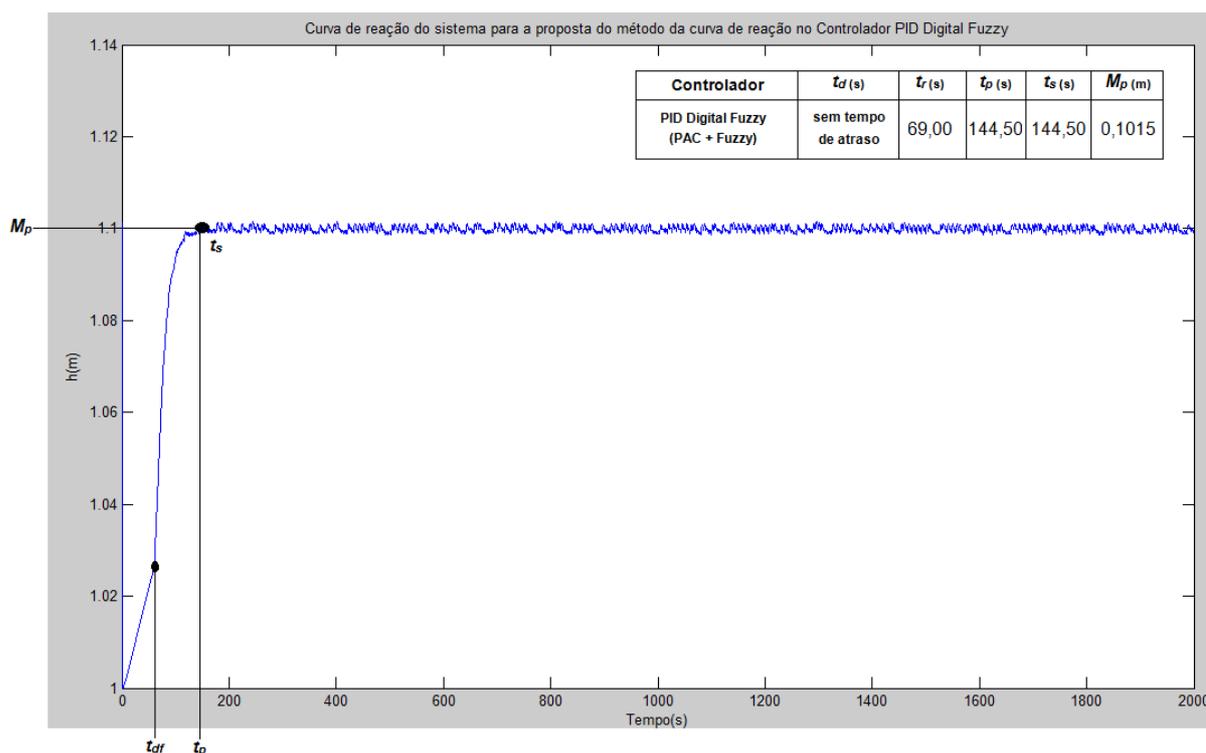


Figura 4.8 – Curva de reação do sistema para o Controlador PID Digital Fuzzy.

A simulação do Controlador PID Digital Fuzzy apresentado na Figura 4.8 eliminou o tempo de atraso e reduziu o sobressinal em relação ao Controlador PI Analógico da Figura 4.5. Observou-se também, que os tempos de pico e de subida ocorrem no mesmo instante de tempo.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO ENTRE OS CONTROLADORES DE NÍVEL

A **Figura 4.9** ilustra o comparativo das curvas de resposta entre os controladores de nível sem a ilustração dos indicadores para medidas de desempenho em sistemas de controle subamortecidos relatados por Ogata (2010) e Bittar *et al* (2011) para variação de 10% em h_{ref} :

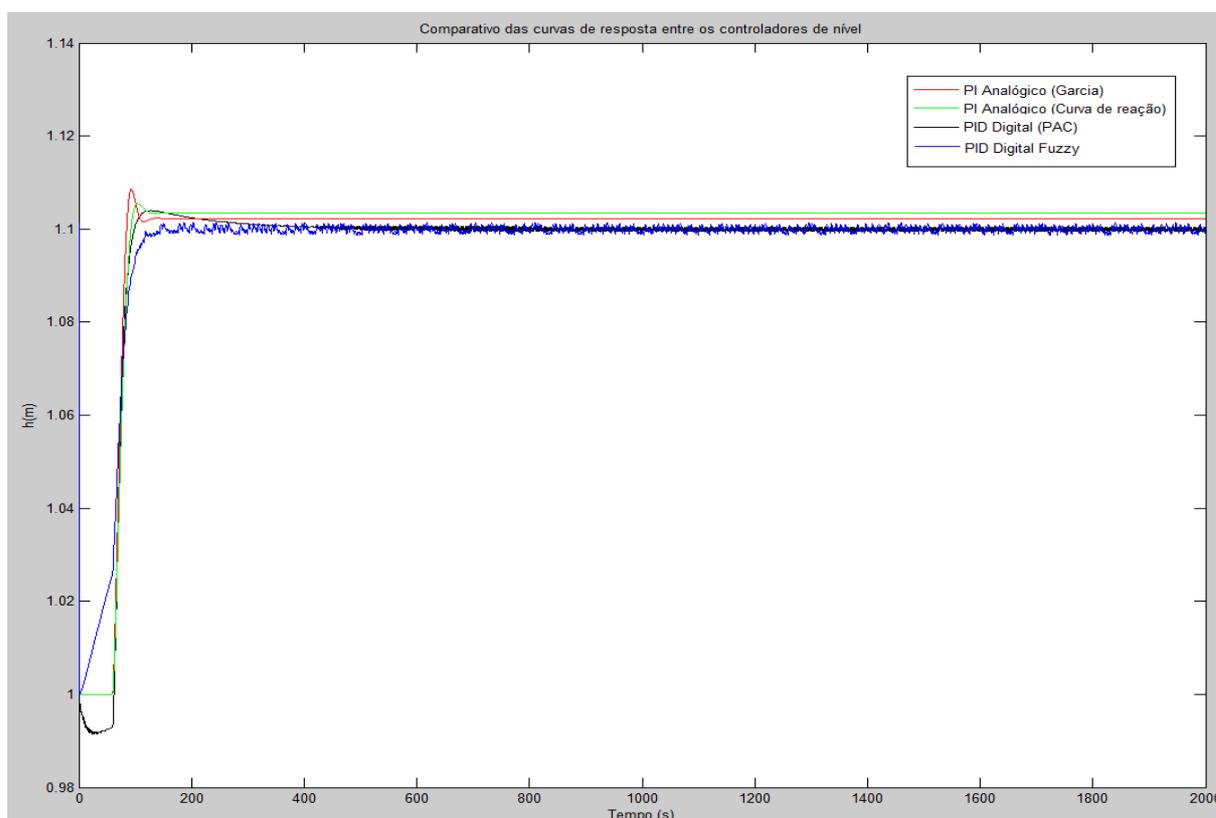


Figura 4.9 – Comparativo das curvas de resposta entre os controladores de nível.

A **Figura 4.9** ilustra também entre as curvas de resposta entre os controladores de nível o quanto a proposta do Controlador PID Digital Fuzzy contribuiu como uma solução de controlador não-convencional eficiente para atuação em não-linearidades, eliminação de tempo de atraso e redução do sobressinal.

Na curva de resposta do Controlador PID Digital Fuzzy observou-se uma variação inferior a 0,5% próximo da referência de nível após a ter atingido o tempo de acomodação em função da frequência de amostragem definida para os

conversores ADC e DAC durante as simulações (Apêndice F). Em caso de aumento na frequência de amostragem dos conversores ADC e DAC, o ruído gerado pelos conversores é maior, variação de cerca de 1% em torno da referência de nível.

Em geral, como procedimento de boas práticas, a frequência de amostragem é definida em função de um intervalo de tempo múltiplo do ciclo de processamento de uma seção de programa. Para este trabalho, esta boa prática foi adotada e contribuiu nos resultados ilustrados pela **Tabela 4.4** nas simulações dos controladores de nível:

Tabela 4.4 – Comparativo das medidas de desempenho entre os controladores de nível.

Controlador	t_d (s)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	M_p (m)
PI Analógico (Garcia)	60,00	17,80	84,80	177,50	0,1086
PI Analógico (Curva de reação)	60,00	22,50	92,70	167,00	0,1055
PID Digital (PAC)	60,00	21,50	98,60	500,00	0,1040
PID Digital Fuzzy (PAC + Fuzzy)	sem tempo de atraso	69,00	144,50	144,50	0,1015

O controladores PI Analógico (Curva de reação) e PID digital (PAC) mantiveram t_d em 60 segundos, reduziram t_s e M_p em relação à proposta do Controlador PI Analógico (Garcia) contribuindo na estabilidade e na diminuição do erro em regime conforme ilustrado e apresentado na **Figura 4.9** e na **Tabela 4.4**, respectivamente.

Ogata (2010) e Bittar *et al* (2011) ressaltam que, mesmo após a aplicação da técnica de sintonia por Ziegler-Nichols (1942), pode-se buscar através de métodos empíricos ou “tentativa-erro”, realizar a sintonia fina do controlador acrescentando a experiência humana ao processo.

Considerando a possibilidade de ocorrência desta necessidade, o Controlador PI Analógico (Curva de reação) foi adotado como referência na análise comparativa

envolvendo os principais indicadores de desempenho e também para o cálculo do erro relativo representado pela equação (4.4):

$$Erro (\%) = \frac{|V_{Exp} - V_{Ref}|}{V_{Exp}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

onde:

V_{Exp} : é o valor experimental;

V_{Ref} : é o valor de referência.

4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM O CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY

Após serem executadas as simulações no ambiente *Matlab/Simulink*[®], as mesmas foram analisadas com base nos resultados apresentados na **Tabela 4.4** com auxílio do cálculo do erro da equação (4.4). Os resultados dessas análises para realização da transcrição equivalente da programação em linguagem FBD no ambiente *UnityPro*[®], foram os seguintes:

- aperfeiçoamento dos controladores de nível utilizados por Garcia (2006, 2008) a partir da aplicação de um método de controle não-convencional utilizando o método da curva de reação por Ziegler-Nichols (1942) como técnica de apoio na sintonia dos controladores;
- o método da curva de reação por Ziegler-Nichols (1942) serviu como motivação durante a aplicação desta metodologia devido à simplicidade na obtenção de seus parâmetros;
- aumento do tempo de pico (t_p) em 55,87% e redução do tempo de acomodação (t_s) em 13,47% e do sobressinal (M_p) em 3,79%, baseado na equação (4.4);

- as regras de inferência da **Tabela 4.3** mudaram o comportamento do tempo de atraso (t_d) com a com a variação de nível de 0,026m em 60 segundos (t_{df}) ilustrada na **Figura 4.8**;
- a proposta permite que o usuário final do sistema automatizado tenha opções de escolha para o controlador de nível (CARDOSO, L.A Z., 2014), ou seja, um sistema de controle inteligente flexível;
- conforme relatado por Yenikomochian (2011), não há um controlador que tenha características ideais para todas as aplicações. Portanto, o Controlador PID Digital Fuzzy é uma proposta de controlador de nível *fuzzy* baseado nas características da biblioteca de controle não-convencional para o *UnityPro*[®] e com o uso de um controlador PAC.

4.5 TRANSCRIÇÃO EQUIVALENTE DO CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY PARA TESTES EM CAMPO

Para que a proposta de elaboração da arquitetura de programa baseada na linguagem gráfica FBD, em conformidade à norma IEC61131-3, pudesse ser atingida, foi considerada a transcrição para o ambiente de programação do PAC, o *UnityPro*[®], a programação visando testes de campo em planta industrial com as mesmas características baseado nos métodos utilizados na biblioteca computacional para lógica *fuzzy* do fabricante.

A programação que será apresentada foi desenvolvida e testada utilizando o simulador incorporado ao aplicativo computacional o *UnityPro*[®] para testar a lógica de programação equivalente do Controlador PID Digital Fuzzy. Para testes em plataformas industriais de tempo real com o PAC, será necessário realizar as devidas adequações e percepções com relação ao comportamento dinâmico do sistema.

A programação para testes de campo não foi testada em condições de ambientes industriais. Sendo assim, o profissional que utilizar esta programação como referência para aplicação em planta industrial com as mesmas características,

deve considerar que é necessário a compreensão desta metodologia e certificar-se que esteja preparado para aplicá-la na íntegra.

Para isto, o profissional de campo deverá estar familiarizado com o ambiente de programação *UnityPro*[®] e aprofundar seu entendimento sobre a biblioteca para lógica *fuzzy* para a necessidade de alterações na programação em tempo real durante os testes de campo.

Nas condições de ambientes industriais, o profissional deverá ainda, avaliar as condições de instalação do sistema, revisar os esquemas elétricos e diagramas de interligação entre o painel de automação e o campo, realizar medições prévias para identificar possíveis problemas de conexões e interferências com instrumentos adequados e aferidos para que seja garantida sua segurança e integridade durante a aplicação da metodologia apresentada neste trabalho de pesquisa.

4.5.1 Estrutura de programa do Controlador PID Digital

No PAC foi necessária a instalação de um módulo de entradas e saídas analógicas, sendo o canal de entrada utilizado para leitura do nível (proveniente do transmissor de nível) e o canal de saída utilizado para o envio do valor de referência de nível (em mA) para o conversor I/P.

A **Figura 4.10** ilustra a configuração dos canais de entrada e saída analógicas no ambiente *UnityPro*[®]:

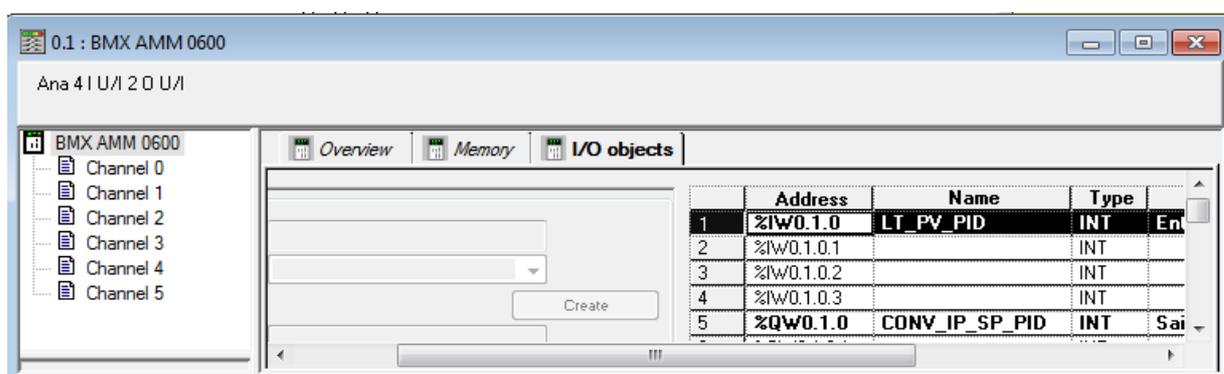


Figura 4.10 - Configuração dos canais de entrada e saída analógicas no ambiente *UnityPro*[®].

O navegador de projeto do ambiente *UnityPro*[®] permite que o projeto do PAC seja organizado através do modo de visualização estrutural, ou seja, cada estrutura que compõe a aplicação é organizada em pastas no projeto.

A **Figura 4.11** ilustra o navegador de projeto no ambiente *UnityPro*[®]:

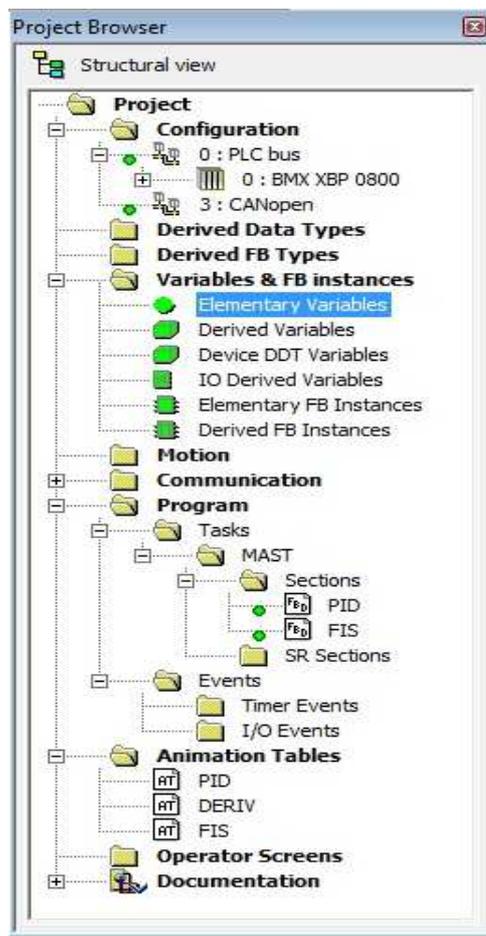


Figura 4.11 - Navegador de projeto no ambiente *UnityPro*[®].

Desta maneira, a localização de cada recurso de programação tais como: a configuração do equipamento; bibliotecas; blocos de função de usuário; controle de movimentos (*motion*); redes de comunicação industrial; seções de programa; tarefas de evento e tabela de visualização de variáveis torna-se prática durante o desenvolvimento da programação e monitoração em tempo real no PAC.

A organização no navegador de projeto em modo de visualização estrutural e os recursos necessários que utilizados para desenvolvimento da programação para testes de campo desta metodologia são relacionadas na **Tabela 4.5**:

Tabela 4.5 – Recursos necessários do navegador de projeto para programação.

Recurso	Descrição da funcionalidade
Configuração do equipamento <i>(Configuration)</i>	Definição e configuração dos módulos de entrada e saída, CPU e de comunicação.
Declaração de variáveis <i>(Variables & FB instances)</i>	Definição das variáveis dos blocos de função e de programação da aplicação.
Seções de programa <i>(Sections)</i>	Programação na linguagem escolhida pelo programador conforme a norma IEC61131-3.
Tabela de visualização de variáveis <i>(Animation Tables)</i>	Inserir as variáveis da programação para monitoração e alteração de valores em tempo real.

A norma IEC61131-3 caracteriza os blocos de função como programações de operações definidas para realização uma determinada operação. Assim, a associação destes blocos de função na linguagem FBD definem a programação do sistema (SCHNEIDER ELECTRIC, 2013).

Tomando esta abordagem, a **Figura 4.12** ilustra a estrutura de programa do Controlador PID Digital, baseado nos blocos de função utilizados na seção de programa **PID**:

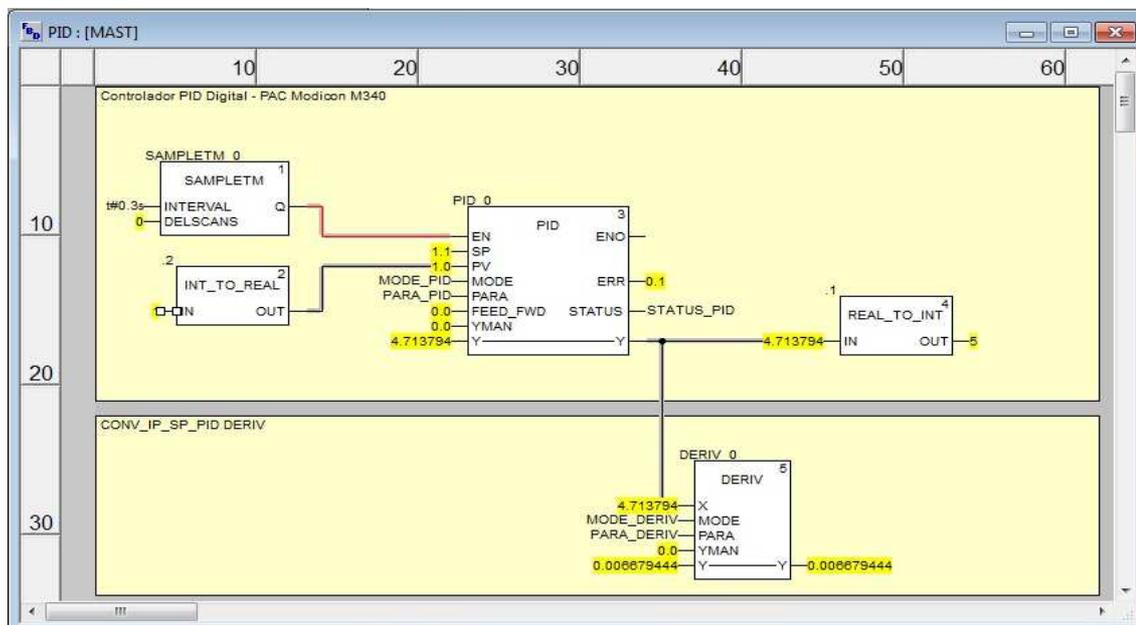


Figura 4.12 - Controlador PID Digital no ambiente *UnityPro*[®].

A **Tabela 4.6** detalha os blocos de função da seção de programa **PID**:

Tabela 4.6 – Blocos de função para aplicação do Controlador PID Digital no ambiente *UnityPro*[®].

Operação	Bloco de função	Descrição
Amostragem	SAMPLETM	Amostrador periódico.
Controle	PID	Controlador PID Digital.
Conversão de tipo de dado	INT_TO_REAL	Conversão na variável do valor numérico inteiro para real.
Conversão de tipo de dado	REAL_TO_INT	Conversão na variável do valor numérico real para inteiro.
Derivada	DERIV	Valor diferencial na variável de entrada.

4.5.2 Estrutura de programa do Controlador PID Digital Fuzzy

A estrutura de programa para o Controlador PID Digital Fuzzy no ambiente *UnityPro*[®] foi desenvolvida na seção de programa **FIS**, acrescentando na programação os blocos de função da biblioteca para controle não-convencional *fuzzy*.

A biblioteca *fuzzy* para o *UnityPro*[®] é comercializada como opcional e permite ao fabricante propor um sistema de controle inteligente flexível ao permitir que seja utilizado somente o controlador PID digital ou PID digital *fuzzy* (CARDOSO, L.A Z., 2014).

A **Tabela 4.7** detalha as descrições dos blocos de função utilizados na seção de programa **FIS**, referente ao Controlador PID Digital Fuzzy:

Tabela 4.7 – Blocos de função *fuzzy* no ambiente *UnityPro*[®].

Operação	Bloco de função	Descrição
Fuzzificação	FUZ_ATERM_REAL	Fuzzificação de até 9 termos.
Inferência	FUZ_MIN_REAL	Operador Máximo.
Defuzzificação	DEFUZ_REAL	Defuzzificação de até 9 termos.

No modelo *fuzzy* relatado Yenikomochian (2011), os operadores **E** e **OU** representam as funções de mínimo e máximo, respectivamente. No entanto na estrutura de programa do Controlador PID Digital Fuzzy no ambiente *UnityPro*[®], o bloco de função que representa o operador máximo para inferência possui o nome **FUZ_MIN_REAL** (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012).

Analogamente, o bloco de função que representa o operador mínimo para inferência no ambiente *UnityPro*[®] possui o nome **FUZ_MAX_REAL** e não será utilizado na transcrição equivalente proposta.

A **Figura 4.13** ilustra a estrutura de programa do Controlador PID Digital Fuzzy, baseado nos blocos de função *fuzzy* apresentados na **Tabela 4.7**:

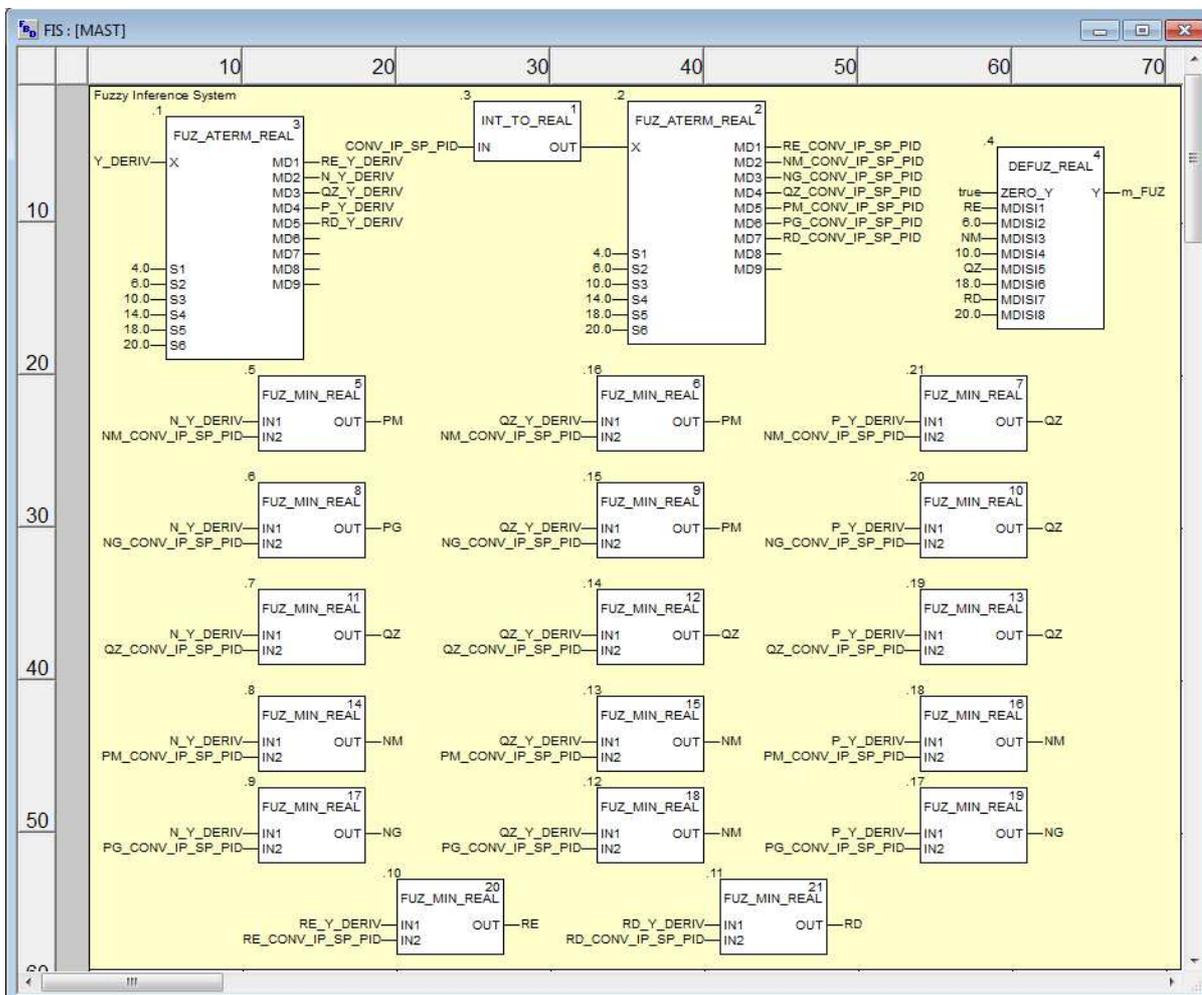
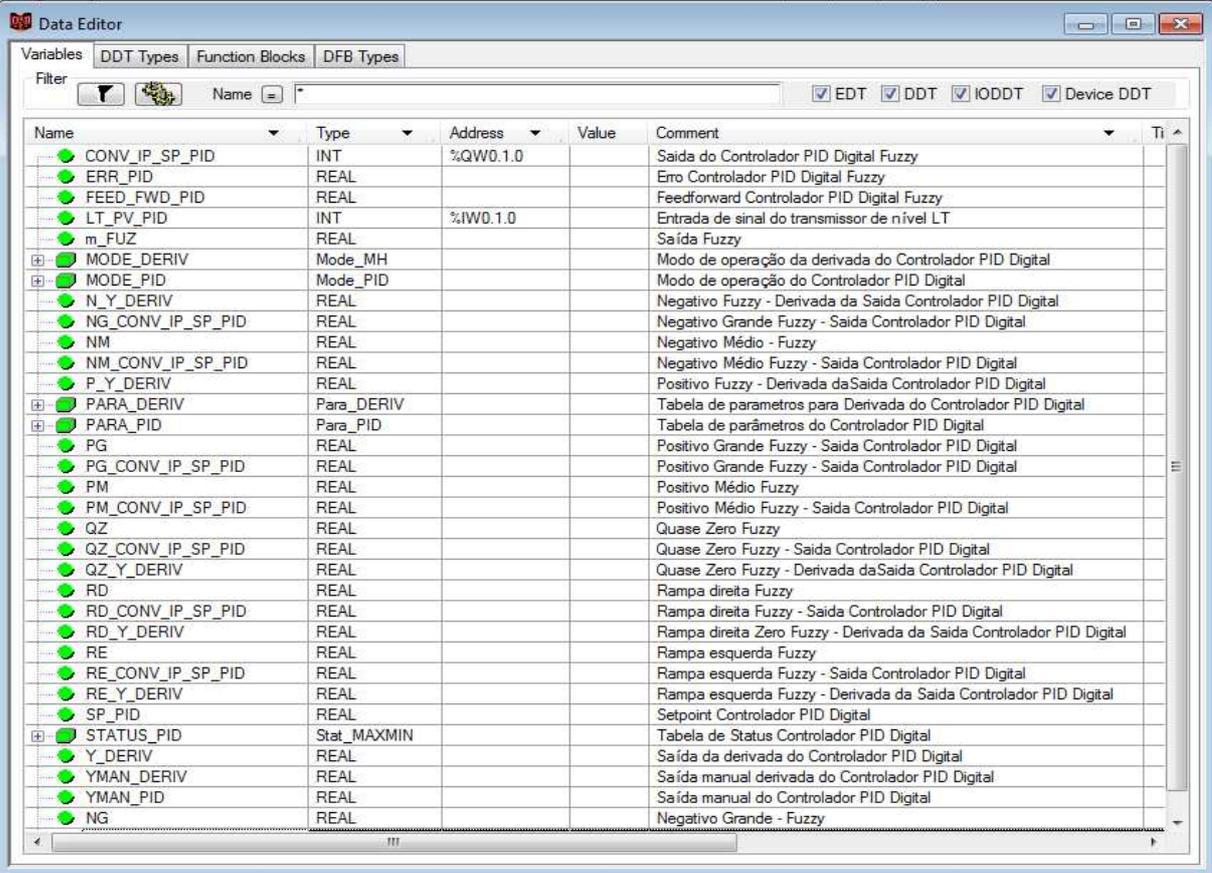


Figura 4.13 – Sistema de inferência *fuzzy* no ambiente *UnityPro*®.

4.5.3 Estrutura de dados dos Controladores PID Digital e PID Digital Fuzzy

Seguindo esta abordagem, durante o desenvolvimento das estruturas de programa para os Controladores PID Digital e PID Digital Fuzzy apresentados no ambiente *UnityPro*[®], foram declaradas as seguintes variáveis apresentadas na **Figura 4.14**:



Name	Type	Address	Value	Comment
CONV_IP_SP_PID	INT	%QW0.1.0		Saída do Controlador PID Digital Fuzzy
ERR_PID	REAL			Erro Controlador PID Digital Fuzzy
FEED_FWD_PID	REAL			Feedforward Controlador PID Digital Fuzzy
LT_PV_PID	INT	%IW0.1.0		Entrada de sinal do transmissor de nível LT
m_FUZZ	REAL			Saída Fuzzy
MODE_DERIV	Mode_MH			Modo de operação da derivada do Controlador PID Digital
MODE_PID	Mode_PID			Modo de operação do Controlador PID Digital
N_Y_DERIV	REAL			Negativo Fuzzy - Derivada da Saída Controlador PID Digital
NG_CONV_IP_SP_PID	REAL			Negativo Grande Fuzzy - Saída Controlador PID Digital
NM	REAL			Negativo Médio - Fuzzy
NM_CONV_IP_SP_PID	REAL			Negativo Médio Fuzzy - Saída Controlador PID Digital
P_Y_DERIV	REAL			Positivo Fuzzy - Derivada da Saída Controlador PID Digital
PARA_DERIV	Para_DERIV			Tabela de parâmetros para Derivada do Controlador PID Digital
PARA_PID	Para_PID			Tabela de parâmetros do Controlador PID Digital
PG	REAL			Positivo Grande Fuzzy - Saída Controlador PID Digital
PG_CONV_IP_SP_PID	REAL			Positivo Grande Fuzzy - Saída Controlador PID Digital
PM	REAL			Positivo Médio Fuzzy
PM_CONV_IP_SP_PID	REAL			Positivo Médio Fuzzy - Saída Controlador PID Digital
QZ	REAL			Quase Zero Fuzzy
QZ_CONV_IP_SP_PID	REAL			Quase Zero Fuzzy - Saída Controlador PID Digital
QZ_Y_DERIV	REAL			Quase Zero Fuzzy - Derivada da Saída Controlador PID Digital
RD	REAL			Rampa direita Fuzzy
RD_CONV_IP_SP_PID	REAL			Rampa direita Fuzzy - Saída Controlador PID Digital
RD_Y_DERIV	REAL			Rampa direita Zero Fuzzy - Derivada da Saída Controlador PID Digital
RE	REAL			Rampa esquerda Fuzzy
RE_CONV_IP_SP_PID	REAL			Rampa esquerda Fuzzy - Saída Controlador PID Digital
RE_Y_DERIV	REAL			Rampa esquerda Fuzzy - Derivada da Saída Controlador PID Digital
SP_PID	REAL			Setpoint Controlador PID Digital
STATUS_PID	Stat_MAXMIN			Tabela de Status Controlador PID Digital
Y_DERIV	REAL			Saída da derivada do Controlador PID Digital
YMAN_DERIV	REAL			Saída manual derivada do Controlador PID Digital
YMAN_PID	REAL			Saída manual do Controlador PID Digital
NG	REAL			Negativo Grande - Fuzzy

Figura 4.14 – Variáveis declaradas no ambiente *UnityPro*[®].

A metodologia de testes para simulação no ambiente *UnityPro*[®] são mostradas no Apêndice E.

4.6 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA A TRANSCRIÇÃO EQUIVALENTE DO CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY PARA TESTES EM CAMPO

Como critérios para a transcrição equivalente do Controlador PID Digital Fuzzy no ambiente *UnityPro*[®], foram adotados:

- aplicar na seção de programa **PID**, o bloco de função PID, o qual foi realizada a modelagem para o ambiente *Matlab/Simulink*[®] representado pelo diagrama de blocos da **Figura 3.15**;
- definir o mesmo intervalo de amostragem utilizado nas simulações no ambiente *Matlab/Simulink*[®], ou seja, $T = 0,3$ segundos (Apêndice F);
- aplicar na simulação do Controlador PID Digital os parâmetros obtidos através do método da curva de reação por Ziegler-Nichols (1942) que foram apresentados na **Tabela 4.2**;
- realizar os testes de lógica e de endereçamento de variáveis no simulador incorporado e no controlador em tempo real para estabelecer a lógica de operação do Controlador PID Digital;
- aplicar na seção de programa **FIS**, a especificação do fabricante para a fuzzificação e defuzzificação de até 9 variáveis linguísticas (SCHNEIDER ELECTRIC, 2009), com base nas regras de inferência apresentadas na **Tabela 4.3**;
- aplicar na simulação do Controlador PID Digital Fuzzy os parâmetros obtidos através do método da curva de reação por Ziegler-Nichols (1942) que foram apresentados na **Tabela 4.2**;
- realizar os testes de lógica e de endereçamento de variáveis no simulador incorporado e no controlador em tempo real para estabelecer a lógica de operação do Controlador PID Digital Fuzzy.

4.7 RESULTADOS DA TRANSCRIÇÃO EQUIVALENTE DO CONTROLADOR PID DIGITAL FUZZY PARA TESTES EM CAMPO

Após ser executada a transcrição equivalente do Controlador PID Digital Fuzzy no ambiente *UnityPro*[®], os mesmos foram analisados segundo os critérios estabelecidos no item 4.6. Os resultados dessas análises foram os seguintes:

- os recursos de monitoração e alteração da programação em tempo real permitiram agilidade durante os testes no simulador incorporado. Em plataformas industriais de tempo real, reduz a presença em campo durante o comissionamento e operação do sistema (*start-up*);
- a autodeclaração de variáveis permitiu durante o desenvolvimento das seções de programa **PID** e **FIS**, que as variáveis fossem declaradas automaticamente de acordo com seu tipo de dado em modo de desenvolvimento (*off-line*), de simulação e em tempo real (*on-line*).
- as tabelas de visualização animadas permitiram alteração em tempo real dos valores das variáveis declaradas apresentadas na **Figura 4.14** sem a necessidade de interromper o processamento e o controlador;
- através do monitoramento em tempo real, verificou-se com o auxílio do recurso da tabela de visualização das variáveis, que as variáveis declaradas em cada bloco de função atendem a lógica de operação para os Controlador PID Digital e PID Digital Fuzzy;
- observou-se que mesmo na operação do controlador em tempo real durante as simulações, em razão de não dispor das condições de instalação de campo com os instrumentos (transmissor de nível e a válvula de controle), não foi possível observar o comportamento e a curva de resposta dinâmica no controle de nível do tanque.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma proposta de Controlador PID Digital Fuzzy para controle de nível de um tanque em um processo de neutralização de pH. A metodologia apresentada não substitui nenhuma outra ferramenta ou técnica para controle *fuzzy* e é apresentada como um projeto de controlador de nível *fuzzy* para atender a demanda por sistemas de controle inteligentes eficientes em um processo caracterizado pela alta não-linearidade, tempo de atraso e possuir EFC não-linear.

Baseado nas características apresentadas por Bauchpiess *et al* (2005), Simões e Shaw (2007), Almeida *et al* (2010) e Yenikomochian (2011) para um sistema de controle inteligente, utilizou-se um PAC como controlador PID digital e com a aplicação da biblioteca para lógica *fuzzy* para o ambiente *UnityPro*[®], estabeleceu-se o Controlador PID Digital Fuzzy.

A aplicação do PAC como controlador PID Digital ofereceu a flexibilidade na escolha da linguagem de programação e em conjunto com o modo de visualização estrutural do ambiente *UnityPro*[®], agilidade durante o desenvolvimento da programação, testes de lógica, configuração do equipamento através do navegador de projeto ilustrado pela **Figura 4.11**.

A transcrição equivalente do ambiente *Matlab/Simulink*[®] para o ambiente *UnityPro*[®] foi desenvolvida sem a consideração da modelagem da planta-piloto, seguindo as estruturas de programação, testes de lógica em modo simulação e no controlador em tempo real, relatadas no Capítulo 4.

Considerando sob o ponto de vista técnico, a definição do procedimento mais adequado para transcrição na íntegra cabe ao programador. A escolha da linguagem FBD para este trabalho visou minimizar os impactos do programador durante o desenvolvimento e testes de lógica do Controlador PID Digital Fuzzy.

Alguns fabricantes, tais como ABB e National Instruments, possuem em alguns ambientes de programação para seus controladores programáveis industriais, módulos de integração entre as suas plataformas de desenvolvimento com o ambiente *Matlab/Simulink*[®], eliminando assim, o impacto ao programador para a transcrição equivalente do Controlador PID Digital Fuzzy para o PAC.

A transcrição equivalente e as simulações no ambiente *UnityPro*[®] apresentadas para testes em campo foram limitadas a testes de lógica e de endereçamento de variáveis e permitiram o uso da lógica *fuzzy* de forma dinâmica em seções de programa, de maneira que variáveis que possam perturbar o sistema, possam ter seu controlador *fuzzy* ajustado continuamente em termos de funções de associação ou rearranjo da base de regras sem interromper a malha de controle.

Para viabilizar os testes em campo, os instrumentos (transmissor de nível e a válvula de controle) precisariam encontrar-se nas condições de operação em campo e possuir as mesmas características dinâmicas pois a aplicação da técnica de sintonia do controlador por Ziegler-Nichols (1942) no PAC está associada diretamente à observação da dinâmica de resposta em tempo real do sistema. No ambiente *UnityPro*[®] seria necessária a utilização das tabelas animadas para as seções de programa **PID** e **FIS** com os endereços das variáveis referentes ao Controlador PID Digital Fuzzy para concretizar a aplicação desta metodologia durante os testes de campo.

Na etapa de modelagem no ambiente *Matlab/Simulink*[®] relatada no item 3.3.3 e de transcrição da programação no ambiente *UnityPro*[®] abordada no item 4.5, observou-se algumas vantagens e potenciais de aprimoramentos para o desenvolvimento em cooperação entre a MathWorks e a Schneider Electric.

Tomando esta abordagem, Lanfrey e Ning (2013) relatam os benefícios com relação à integração do ambiente *Matlab/Simulink*[®] com suas plataformas de desenvolvimento:

- redução de tempo de desenvolvimento através de um ambiente de desenvolvimento gráfico que realize a conversão automática de código compatível com as linguagens previstas pela norma IEC61131-3;
- desenvolvimento de sistemas de controle, otimização e sintonia de sistemas e sintonia automática de controladores e interação com *interfaces* de comunicação OPC ou sistemas SCADA;
- simulação de modelos físicos diversos, tais como sistemas eletrônicos, mecânicos, hidráulicos e de potência, baseado em suas características dinâmicas.

As simulações no ambiente *UnityPro*[®] foram mais simples em relação ao ambiente *Matlab/Simulink*[®] e esta observação está relacionada ao modo de visualização estrutural no ambiente do PAC, permitindo que através de um único ambiente gráfico, por meio da navegação entre as pastas dos objetos, fosse possível realizar os testes de lógica e de endereçamento.

Para as simulações no ambiente *Matlab/Simulink*[®], foi necessária a utilização de três ambientes: o código M, o Simulink e o FIS. A metodologia de testes do ambiente *Matlab/Simulink*[®] é ilustrada em detalhes na **Figura E.1** (Apêndice E).

Nas simulações dos controladores de nível, o tempo de amostragem foi definido em $T = 0,3$ segundos, pois observou-se no ambiente *Matlab/Simulink*[®] que nesta taxa de atualização, os efeitos de ruído gerados pelos conversores ADC e DAC eram atenuados. O mesmo tempo de amostragem foi adotado também na transcrição equivalente no bloco de função **SAMPLETM** apresentado na **Figura 4.12**.

Os resultados das simulações mostraram que no Controlador PID Digital Fuzzy, para uma referência de nível de 1m, houve a eliminação do tempo de atraso (t_d), redução no tempo de acomodação (t_s) em 13,47% e do sobressinal (M_p) em 3,79%. Apesar do aumento do tempo de pico (t_p) em 55,87%, as regras de inferência da **Tabela 4.3** mudaram o comportamento do tempo de atraso (t_d) com a com a variação de nível de 0,026m em 60 segundos (t_{df}).

Observou-se também que a aplicação de lógica *fuzzy* como método de controle não-convencional nos sistemas de controle de nível apresentados, mesmo considerando dinâmicas de resposta dos processos diferentes, produzem resultados similares no tocante à atuação em não-linearidades e na redução do tempo de atraso relatadas por Garcia *et al* (2013).

A análise comparativa das medidas de desempenho entre os controladores de nível e as simulações do Controlador PID Digital Fuzzy na planta-piloto apresentadas nos itens 4.3 e 4.4, permitiram observar que a metodologia apresentada atendeu as premissas estabelecidas inicialmente no desenvolvimento deste trabalho.

Os resultados mostraram que a aplicação da lógica *fuzzy* como um método de controle não-convencional na proposta do Controlador PID Digital Fuzzy aperfeiçoou os resultados dos controladores convencionais propostos por Garcia (2006, 2008) em um processo caracterizado pela alta não-linearidade, tempo de atraso e possuir EFC não-linear.

A proposta do Controlador PID Digital Fuzzy apresentou também uma transcrição equivalente através de um programa em linguagem gráfica FBD para aplicação em um sistema automatizado de tempo real com as mesmas características da planta-piloto adotada durante as simulações.

Portanto, este trabalho de pesquisa atingiu os objetivos iniciais e contribuiu com a proposta de Controlador PID Digital com execução de lógica *fuzzy* estilo Mamdani em modos de simulação e de tempo real para um sistema de controle de nível que utiliza controle convencional e o método da curva de reação de Ziegler-Nichols (1942) como técnica de apoio na sintonia dos controladores.

5.1 Trabalhos futuros

Durante a realização deste estudo, outros questionamentos foram apontados que requerem futuros aprimoramentos, destacam-se:

- Implementação da proposta apresentada em plataforma de automação industrial de tempo real com características semelhantes;
- Pesquisa em novas técnicas de sintonia de controladores e/ou a aplicação de métodos empíricos ou de “tentativa-erro” relatados por Ogata (2010) e Bittar *et al* (2011) na proposta apresentada, para melhorar o nível de sintonia do sistema em testes de campo;
- Melhoria da *interface* para a transcrição equivalente entre os ambientes *Matlab/Simulink*[®] e *UnityPro*[®] por meio do desenvolvimento em cooperação entre a MathWorks e a Schneider Electric, eliminando assim, a responsabilidade atribuída ao programador em buscar estabelecer uma metodologia para realizar esta transcrição na íntegra;

- Implementação de novas tecnologias para instrumentação industrial através de redes de comunicação industrial determinísticas em substituição aos modelos convencionais analógicos, permitindo que a manutenção e diagnóstico de operação possam ser exibidos e integrados em sistemas SCADA e de gerenciamento de ativos;
- Aplicação do Controlador PID Digital Fuzzy em um controlador do tipo e-PAC e observar se a taxa de transferência através do barramento de comunicação *ethernet* entre a CPU e os módulos analógicos sofre influência na metodologia proposta.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, A., DHARAMNIWAS, GUPTA, U., REDHU, V., **Liquid level control by using Fuzzy Logic Controller**. International Journal of Advances in Engineering & Technology, Vol.4, Issue: 1, July 2012, p.537-538; 541; 544; 547.

AKKAYA, A.V., ÇETIN, S., **Simulation and hybrid fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system**. Springer Science Business Media B.V., Turquia, February 2010, p.468-472.

ALMEIDA, O.M., BRAGA, A.P.S., OLIVEIRA, D.N., **Fuzzy implementado em Ladder com funções de pertinência descontínuas**. In: XVII Congresso Brasileiro de Automática. Mato Grosso do Sul, Setembro, 2010. p.1-6.

AMARAL, J.L.M., BIONDI NETO, L., COELHO, P.H.G., MELLO, M.H.C.S., **Minicurso de sistema especialista nebuloso**. In: XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Goiânia, Setembro, 2006. p.1-19.

ANDRADE, A.A., **Desenvolvimento de sistema especialista com operacionalidade de aprendizado para operar em tempo real com sistemas industriais automatizados**. Tese (Doutorado em Engenharia de Automação). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2007.

ANDRADE, A.A., YAMAGUCHI, M.Y., **Apostila da disciplina ATI-003 – Controladores Lógicos Programáveis**. Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da USP – PECE, 2008.

AL-ODIENAT, A., AL-LAWAMA, A.A., **The Advantages of PID Fuzzy Controllers over the Conventional Types**. American Journal of Applied Sciences, Mutah University, May 2008, p.653-654; 658.

ALTAS, I. H., MENGI, O. O., **Fuzzy logic control for a wind/battery renewable energy production system**. Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.20, Nº 2, April 2012, p.187-198.

ARAÚJO, F.M.U., FERNANDES JÚNIOR, F.G., LOPES, J.S.B., MAITELLI, A.L., OLIVEIRA, L.A.H.G. **Implementação de controladores PID utilizando Lógica Fuzzy e Instrumentação Industrial**. In: VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São Luís, Setembro 2005, p.1-7.

BALAKRISHMAN, P.A, RAVI, S., **Temperature response control of Plastic Extrusion Plant using Matlab/Simulink®**. International J. Of Recent Trends in Engineering and Technology, India, May 2010, p.135-139.

BARBOSA, P.R., **Notas de aula da disciplina IMNCC – Métodos não convencionais para controle**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP, São Paulo, 2013.

BAUCHPIESS, A., LUNA FILHO, F.M., GOSMANN, H.L., **Controle Fuzzy para sistema de nível de líquidos**. In: XIV Congresso Brasileiro de Automática. Rio Grande do Norte, Setembro, 2002. p.3017-3022.

BHASKAR, P., IMMANUEL, J., PARVATHI, C.S., SHRIMATH, S., **MATLAB Graphical User Interface based Fuzzy Logic Controllers for Liquid Level Control System**. Department of Instrumentation Technology, Gulbarga University P.G. Centre, India, January 2013, p. 52-59.

BITTAR, A., CASTRUCCI, P.L., SALES, R.M., **Controle Automático**. Editora LTC, São Paulo: 1ª Edição, 2011.

BOTTURA FILHO, J.A., **Benefícios da norma IEC 61131-3 aplicada a CLP`s**. ATOS Automação Industrial, São Paulo, 2004, p.1-16.

BRANDL, A., **Technical Note — Introduction to Fuzzy Control in UnityPro®**. Schneider Electric – Doc. Number 0000374279, North Andover, United States, April 2008, p4-13.

CAMPO, A.B., **Notas de aula da disciplina IMCTR – Tópicos de Controle**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP, São Paulo, 2012.

CARDOSO, L.A.Z., **O poder do consumidor está na sua liberdade de escolha**, São Paulo, Abril 2014. Disponível em: < <https://www.acontecendoaqui.com.br/o-poder-consumidor-esta-na-sua-liberdade-de-escolha>>. Acesso em: 15/04/14.

CASTRUCCI, P.L., MORAES, C.C., **Engenharia de Automação Industrial**. Editora LTC, São Paulo: 2ª edição, 2007.

COSTA, E.A., **Notas de aula da disciplina IMRNL – Sistemas Lineares**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP, São Paulo, 2012.

DORF, R.C.; BISHOP, R.H. **Sistemas de controle modernos**. Editora LTC, Rio de Janeiro: 12ª edição, 2013.

FAUSTINO, M.R., **Norma IEC61131-3: Aspectos históricos, técnicos e um exemplo de aplicação**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sistemas de Potência). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2005.

FERNANDES, A.M.R., **Inteligência Artificial – Noções gerais**. Editora Visual Books, Florianópolis: 3ª edição, 2008.

FIALHO, A.B., **Instrumentação industrial – Conceitos, Aplicações e Análises**. Editora Érica, São Paulo: 7ª edição, 2011.

GARCIA, C., **Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos**. EDUSP, São Paulo: 2ª edição, 2006.

GARCIA, C., **Apostila da disciplina ATI-008 – Sistemas de controle digital**. Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da USP – PECE, 2008.

GARCIA, C., LOURENÇO, L., MORALES, C., **Controle preditivo aplicado a uma planta piloto de neutralização de pH**. In: XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Fortaleza, Outubro, 2013. p.1-5.

GONÇALVES, C.A., **Aquisição e Representação do Conhecimento para Sistemas Especialistas**. Faculdade de Economia e Administração da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

GUIMARÃES, F.M., THAIS DO NASCIMENTO, N., LUGLI, A.B., MASSELLI, Y.M.C., **Controle de nível utilizando algoritmo PID implementado em CLP**. Controle & Instrumentação, São Paulo, Fevereiro 2014, p.64-68.

HADDAD, E., **Emergências com corrosivos: diluição ou neutralização?**, São Paulo, Março 2014. Disponível em:
<http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/artigos/artigos/emerg_dil_neut.pdf>.
Acesso em: 11/03/14.

KANAGARAJ, N., KUMAR, R., SIVASHANMUGAM, P., **A Robust Intelligent PID-Type Fuzzy Control Structure for Pressure Control**. Department of Chemical Engineering, National Institute of Technology, India, September 2009, p.291-296.

LANFREY, J.B., NING, DF., **Mathworks capabilities for solution providers**, The Mathworks, Inc., Grenoble, France, December 2013, p; 1-32.

LATHI, B.P. , **Sinais e Sistemas Lineares**, Bookman, Porto Alegre: 2ª edição, 2007.

NASCIMENTO JÚNIOR, C.L., YONEYAMA, T., **Inteligência Artificial em Controle e Automação**. São Paulo: Blucher, 2010.

NISE, N.S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. Editora LTC, São Paulo: 6ª edição, 2012.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Editora Pearson, São Paulo: 5ª edição, 2010.

PIZZOLANTE, V.H., **Medição de nível – aplicações para controles visuais e indicação remota, através dos transmissores**. Controle & Instrumentação, São Paulo, Dezembro 2012, p.74-75.

PLC OPEN[®], **IEC61131-3 Standards**, Netherlands, January 2014. Disponível em:
<http://www.plcopen.org/pages/tc1_standards/>. Acesso em: 22/01/14.

SCHNEIDER ELECTRIC, **UnityPro – Fuzzy Control Library**. Schneider Electric – 33004219.02, Carros, France, February 2009, p.1-114.

SCHNEIDER ELECTRIC, **UnityPro – Control Block Library**. Schneider Electric – 33002535.10, Carros, France, July 2012, p.1-406.

SCHNEIDER ELECTRIC, **Modicon M340 Automation Platform**. Schneider Electric – DIA6ED2110104EN, Carros, France, September 2013, p.1-234.

SCHNEIDER ELECTRIC, **UnityPro – Program Languages and Structure Reference Manual**. Schneider Electric – 35006144.13, Carros, France, October 2013, p.1-470.

SCHNEIDER ELECTRIC, **CANopen – Hardware Setup Manual**. Schneider Electric – 35010857.04, Carros, France, May 2010, p.1-64.

SCHUTTENBERG, R.M.C., REIS, D.F.G., SILVA, H.O.F., FÉLIX JÚNIOR, S.B., **Métodos de identificação e estruturas pid aplicadas a um sistema de içamento de cargas**. Controle & Instrumentação, São Paulo, Julho 2014, p.59-63.

SIMÕES, M.G., SHAW, I.S., **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: Blucher, 2007.

TANNURI, E.A., CRUZ, J.J., **Apostila da disciplina ATI-007 – Entendendo e ajustando malhas de controle**. Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da USP – PECE, 2008.

THE MATHWORKS, INC. **Fuzzy Logic Toolbox™** – User’s Guide – USA, 2010.

THE MATHWORKS, INC. **What is the Sugeno-Type Fuzzy Inference?**, USA, June 2014. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-sugeno-type-fuzzy-inference.html>>. Acesso em 13/06/14.

TUSSET, A.M., **Controle ótimo aplicado em modelo de suspensão veicular não-linear controlada através de amortecedor magneto-reológico**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

YENIKOMOCHIAN, B.C.. **Implementação em linguagem gráfica de algoritmo para Lógica Fuzzy adaptativa**. Dissertação (Mestrado em Automação e Controle de Processos). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP, São Paulo, 2011.

ZAMBON, J.P.G., **Evolução da válvula globo de controle**. Petro & Química, São Paulo, Agosto 2014, p.52-53.

ZUBEN, V., **Notas de aula da disciplina EA616 – Identificação de Sistemas Dinâmicos**, UNICAMP, São Paulo, 2014.

Na modelagem da planta-piloto e dos controladores de nível apresentados no Capítulo 3 e nas simulações do Capítulo 4, utilizou-se o ambiente *Simulink*[®] para representar o sistema de controle de nível de um tanque em um processo de neutralização de pH em diagrama de blocos.

A **Figura A.1.2** ilustra o ambiente Simulink do *Matlab/Simulink*[®]:

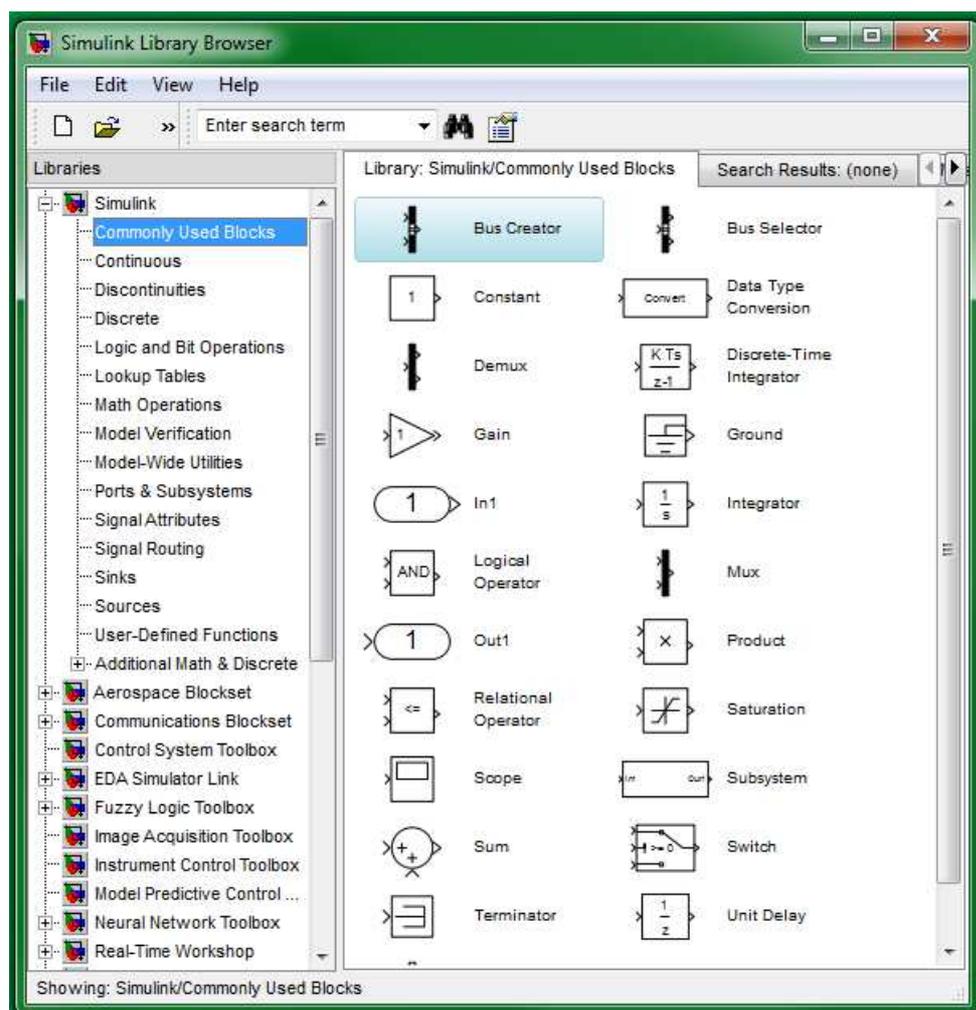


Figura A.1.2 - Ambiente Simulink no *Matlab/Simulink*[®].

A construção da modelagem do sistema ocorre de maneira análoga ao previsto pela norma IEC61131-3, que caracteriza os blocos de função como programações de operações definidas para realização uma determinada operação. Portanto, a associação destes blocos de função definem a modelagem do sistema.

Para definir as regras de inferência *fuzzy*, as funções de associação e o método de defuzzificação no ambiente *Simulink*[®] utiliza-se o FIS (*fuzzy inference system*). A **Figura A.1.3** ilustra o ambiente FIS do *Matlab/Simulink*[®]:

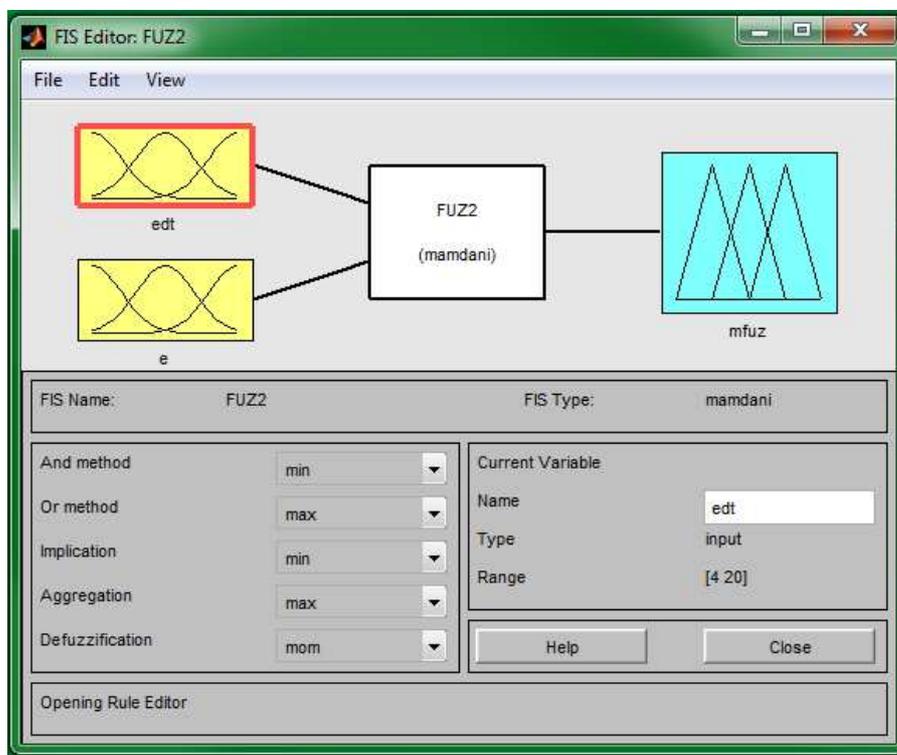


Figura A.1.3 – Ambiente FIS no *Matlab/Simulink*[®].

A.2 UnityPro[®]

O *UnityPro*[®] da Schneider Electric é um ambiente de desenvolvimento de aplicações para controladores programáveis de automação que proporciona alta produtividade associando um ambiente gráfico interativo com navegador de projeto e simulador incorporado com a flexibilidade na escolha das linguagens de programação.

Os projetos de controladores no *UnityPro*[®] podem ser desenvolvidos simultaneamente (sistema multi-tarefa) com as 5 linguagens de programação, em total conformidade com a norma IEC61131-3, permitindo a escolha da linguagem mais adequada para cada etapa do processo.

A navegação pelo ambiente computacional *UnityPro*[®] permite ainda maior integração com usuário, pois proporciona ao usuário uma visualização da estrutura funcional da aplicação orientada ao processo, verificação de consistência da arquitetura em relação ao consumo de fonte e recursos da CPU e suporte à flexibilidade de recursos de programação no desenvolvimento de blocos de função personalizados nas seções de programa.

Durante a execução deste trabalho, alguns estudos práticos foram realizados e na abordagem do Capítulo 4, observou-se a contribuição do uso de uma linguagem gráfica durante a transcrição equivalente do sistema de inferência *fuzzy* do ambiente *UnityPro*[®] para o *Matlab/Simulink*[®], destacando como principal vantagem o desenvolvimento de um programa por meio de conexão e associação entre blocos de função.

Durante as simulações, observou-se alguns diferenciais do ambiente *UnityPro*[®] em relação ao ambiente *Matlab/Simulink*[®], tais como a monitoração e alteração da programação em tempo real, a autodeclaração de variáveis e as tabelas de visualização animadas.

A **Figura A.2.1** ilustra o ambiente *UnityPro*[®] em modo de monitoração para observar os recursos comentados anteriormente:

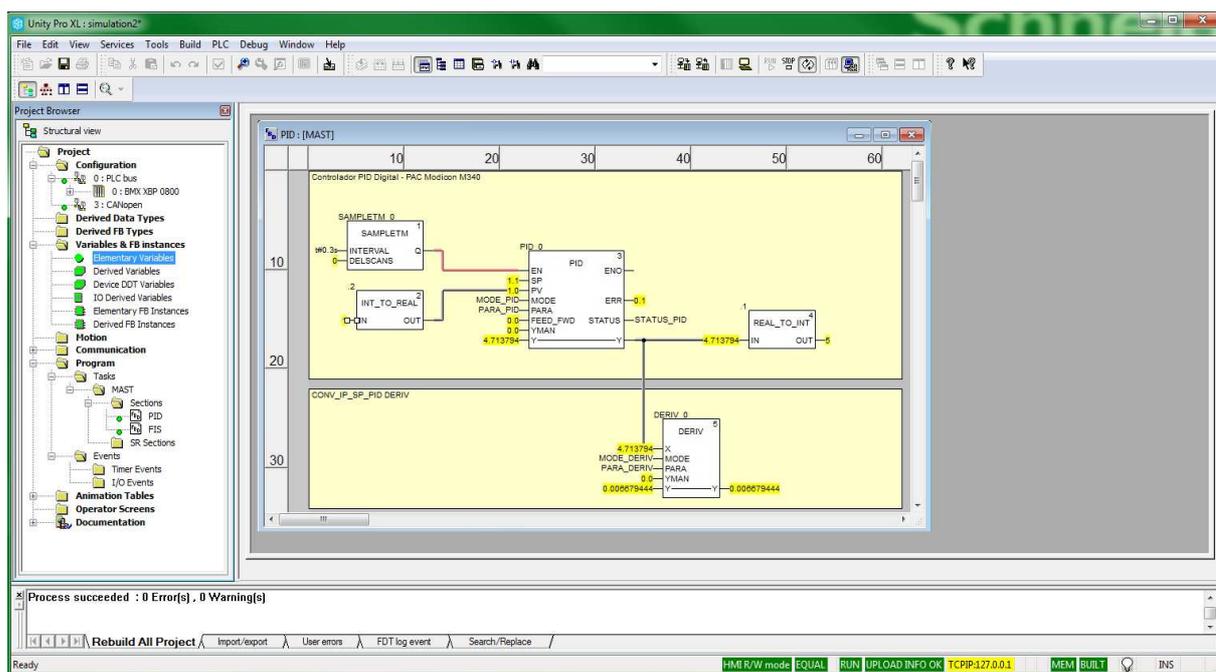


Figura A.2.1 – Ambiente *UnityPro*[®] em modo de monitoração.

O *UnityPro*[®] possui suporte também à PLC Open[®] na padronização dos blocos de função relacionados ao controle de movimentos e acionamentos MFB (*motion function block*) por meio de inversores de frequência e servo-acionamentos via rede de comunicação industrial *CanOpen*[®].

A **Figura A.2.2** ilustra um exemplo de seção de programa em FBD com blocos de função MFB:

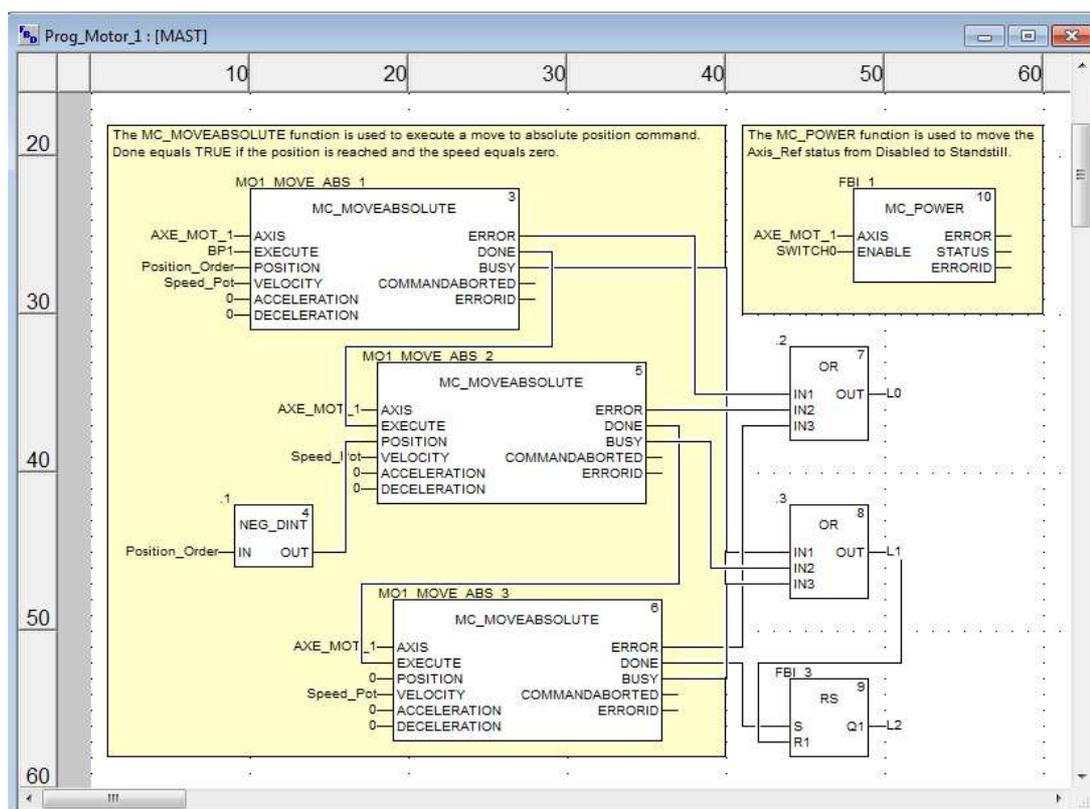


Figura A.2.2 – Seção de programa em FBD com blocos de função MFB.

A rede de comunicação industrial *CanOpen*[®], foi desenvolvida em 1983 pela Bosch e tornou-se um protocolo aberto, permitindo que fosse estabelecido como um protocolo para diferentes aplicações de automação em função da especificação dos perfis de dispositivos. Os perfis de comunicação para sistemas de automação industrial mais comuns são para módulos de entradas e saídas (DSP-401) e para acionamentos de motores (DSP-402) (SCHNEIDER ELECTRIC, 2010).

APÊNDICE B: Teoria do controle *fuzzy*

Tusset (2008) relata que a teoria do controle *fuzzy* foi desenvolvida a partir de 1965 com os trabalhos de Lofti Zadeh, professor na Universidade da Califórnia em Berkeley. Segundo o autor, o controle *fuzzy* que é uma técnica moderna de controle onde não é necessário o conhecimento preciso dos modelos matemáticos.

B.1 Comparação entre os métodos Takagi-Sugeno e Mamdani

Yenikomochian (2011, p.36) relata que o sistema de inferência proposto por Mamdani baseia-se na “sintetização de um conjunto de regras linguísticas obtidas da experiência de especialistas do processo a ser controlado.”.

O método proposto por Ebrahim Mamdani em 1975 foi um dos primeiros construídos usando a teoria dos conjuntos *fuzzy* e foi aplicado como tentativa de controlar um sistema que combinava uma máquina a vapor e uma caldeira, sintetizando um conjunto de regras de controle linguísticos obtidos a partir de experientes operadores humanos (THE MATHWORKS, INC., 2010).

Baseado na estrutura típica do controlador nebuloso apresentada por Nascimento Júnior e Yoneyama (2010) na **Figura 2.2**, o método de Mamdani é considerado eficiente na etapa de defuzzificação ao adotar nas funções de associação a morfologia monotônica (*singleton*).

Segundo Brandl (2008), as funções de associação com morfologia monotônica (*singleton*) para as variáveis do PAC otimizam o tempo de cálculo do controlador sem alterar a forma simplificada da determinação da resposta final do controlador.

A biblioteca de controle não-convencional *fuzzy* para o *UnityPro*[®] utiliza este método, caracterizado também pelo cálculo da saída através da média ponderada envolvendo valores singulares obtidos a partir de alguns pontos, tornando-o assim, consideravelmente mais rápido que o cálculo de agregação das funções de associação com outras morfologias (SCHNEIDER ELECTRIC, 2009; YENIKOMOCHIAN, B.C., 2011; THE MATHWORKS, INC., 2014).

A **Figura B.1.1** ilustra a representação por valor exato $\lambda_{(x)}$ (*crisp*) para função de associação $\mu_A(x)$ com morfologia monotônica (*singleton*):

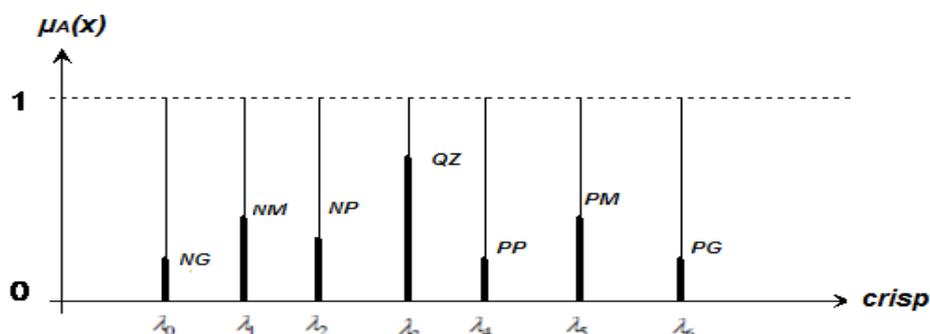


Figura B.1.1 – Morfologia monotônica (*singleton*).

Fonte: Extraída e adaptada de Brandl (2008, p.8).

O sistema de inferência proposto por Takagi-Sugeno assemelha-se ao método Mamdani na etapa de fuzzificação e diferencia-se na etapa de defuzzificação, onde as funções de associação na saída são lineares ou constantes (THE MATHWORKS, INC., 2014).

A equação **(2.6)** representa o método de defuzzificação de controlador *fuzzy* Takagi-Sugeno, cuja a regra típica pode ser representada na equação **(B.1.1)** na seguinte forma:

SE entrada 1 = x **E** entrada 2 = y, **ENTÃO** saída = z.

onde:

$$z = a.x + b.y + c \quad (\text{B.1.1})$$

Na equação **(B.1.1)**, o operador lógico “**E**” está presente na elaboração das regras de produção do tipo “**SE-ENTÃO**” relatadas por Nascimento Júnior e Yoneyama (2010) e, segundo Yenikomochian (2011), as regras de produção são caracterizadas como “cláusulas”.

Yenikomochian (2011, p.36) relata que:

[...] a cláusula “SE”, composta por um ou mais antecedentes, refere-se a uma ou mais variáveis de entrada expressas por termos linguísticos; a cláusula “Então”, com uma ou mais consequências, se refere à uma ou mais variáveis de saída, expressas por termos linguísticos. As saídas estão relacionadas às ações de controle para um determinado processo ou sistema de controle. Assim, tanto os antecedentes como as consequências são representados por funções de associação.

B.2 Funções de associação fuzzy

Simões e Shaw (2008, *apud* TUSSET, A.M., 2008, p.143), relatam que a função de associação ou função de pertinência, é definida como uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso.

O universo de discurso é definido também como o espaço *fuzzy*, que representa a quantidade de valores que a variável linguística pode assumir durante a inferência. A quantidade de funções de pertinência dentro de um universo de discurso para uma variável linguística e o seu formato são definidos com base na experiência que se tem do processo (AMARAL *et al.*, 2006; SIMÕES, M.G., SHAW, I.S., 2007; TUSSET, A.M., 2008). Segundo os autores, outro fator importante é o grau de superposição entre as funções de associação, sendo normalmente aplicadas superposições entre 25% e 75%, utilizando-se com maior frequência 50%.

B.3 Fuzzificação

Tusset (2008, p.126), relata que a fuzzificação trata o mapeamento dos números reais para o domínio *fuzzy*, representando que há atribuição de valores linguísticos definidos por funções de associação, e, caracteriza a fuzzificação como “uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo grandemente o número de valores a serem processados.”.

As funções de associação comumente utilizadas na literatura (triangular, trapezoidal e gaussiana) serão indicadas nas Figuras B.3.1 a B.3.6. A **Figura B.3.1**

indica a função trapezoidal triangular, definida pelo limite inferior a , superior b e valor modal m , tal que $a < m < b$:

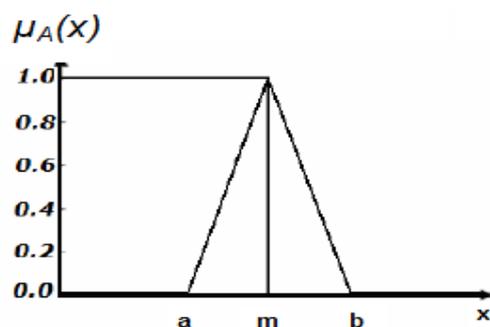


Figura B.3.1 – Função de associação triangular $\mu_A(x)$.
Fonte: Extraída e adaptada de Tusset (2008, p.126).

A equação **(B.3.1)** define a função triangular como:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x - a}{m - a} & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b - x}{b - m} & \text{se } x \in [m, b] \\ 0 & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (\text{B.3.1})$$

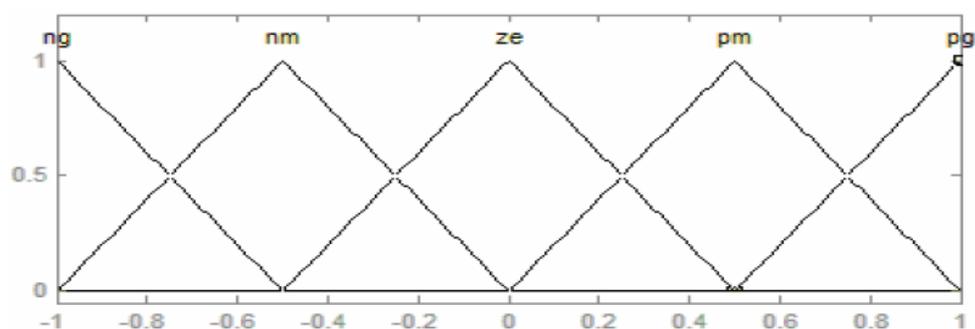


Figura B.3.2 – Fuzzificação por função triangular com 50% de superposição.
Fonte: Extraída de Tusset (2008, p.126).

A **Figura B.3.3** indica a função trapezoidal, definida pelo limite inferior a , superior b e pelos limites de seu suporte m (inferior) e n (superior), tal que $a < m < n < b$:

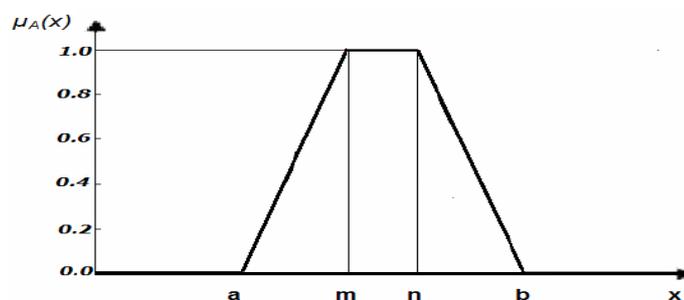


Figura B.3.3 – Função de associação trapezoidal $\mu_A(x)$.
Fonte: Extraída de Tusset (2008, p.127).

A equação **(B.3.2)** define a função trapezoidal como:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x - a}{m - a} & \text{se } x \in [a, m] \\ 1 & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b - x}{b - m} & \text{se } x \in [n, b] \\ 0 & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (\text{B.3.2})$$

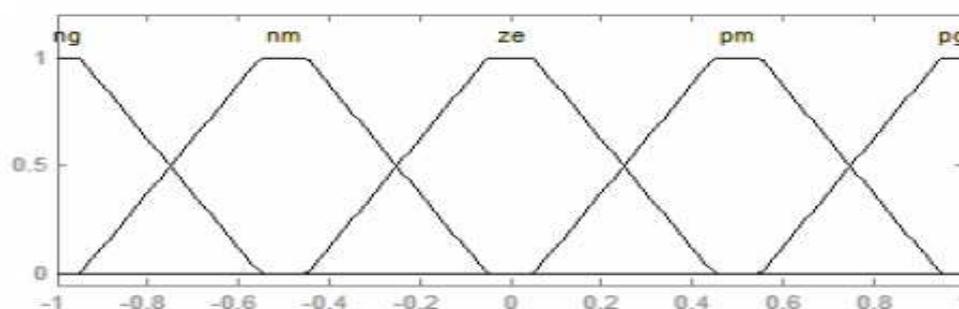


Figura B.3.4 – Função de associação trapezoidal com 50% de superposição.
Fonte: Extraída de Tusset (2008, p.126).

A **Figura B.3.5** indica a função gaussiana, definida pelo seu valor médio m e pelo parâmetro $k > 0$. Esta função é típica em forma de sino, onde quanto maior é o valor de k , mais estreito é o sino delineado pela função.

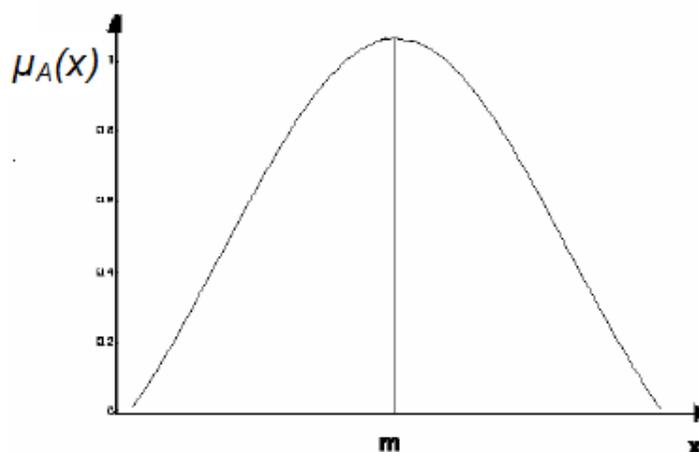


Figura B.3.5 – Função de associação gaussiana $\mu_A(x)$.
Fonte: Extraída e adaptada de Tusset (2008, p.126).

A equação **(B.3.3)** define a função gaussiana como:

$$\mu(x) = e^{-k(x-m)^2} \quad \text{para} \quad K > 0 \quad \text{(B.3.3)}$$

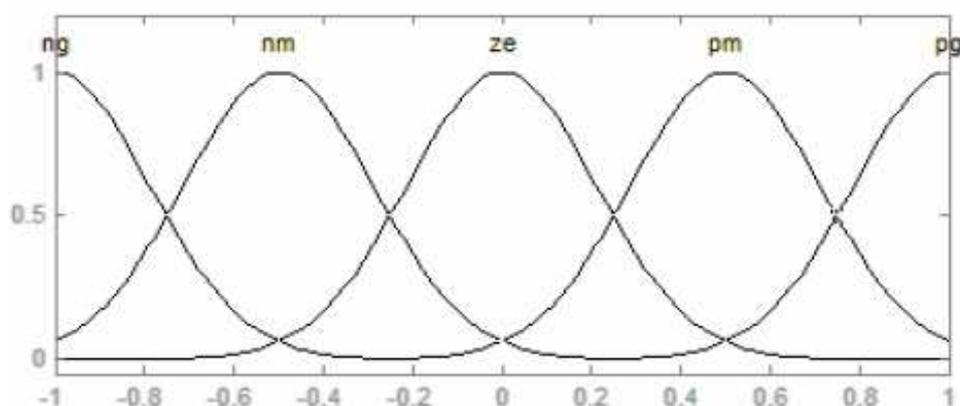


Figura B.3.6 – Função de associação trapezoidal com 50% de superposição.
Fonte: Extraída de Tusset (2008, p.128).

B.4 Defuzzificação

Simões e Shaw (2007), Tusset (2008) e Nascimento Júnior e Yoneyama (2010) caracterizam a defuzzificação como uma transformação inversa que traduz a saída do domínio fuzzy para o domínio discreto.

Simões e Shaw (2007, *apud* YENIKOMOCHIAN, B.C., 2011, p.46) relatam que “um conceito considerado na defuzzificação é o da continuidade, ou seja, quando uma pequena variação em uma das variáveis de entrada não causar uma mudança abrupta em nenhuma das variáveis de saída”. Segundo os autores, este conceito é válido para os métodos de centro de área e centro dos máximos, mas não para o método média da associação máxima, pois este é descontínuo.

A equação (2.1), representa o método da média da associação máxima. Segundo Tusset (2008), em casos em que a função de associação tenha mais de um máximo, este método não é aplicável. A **Figura B.4.1** ilustra o método de defuzzificação pela média da associação máxima:

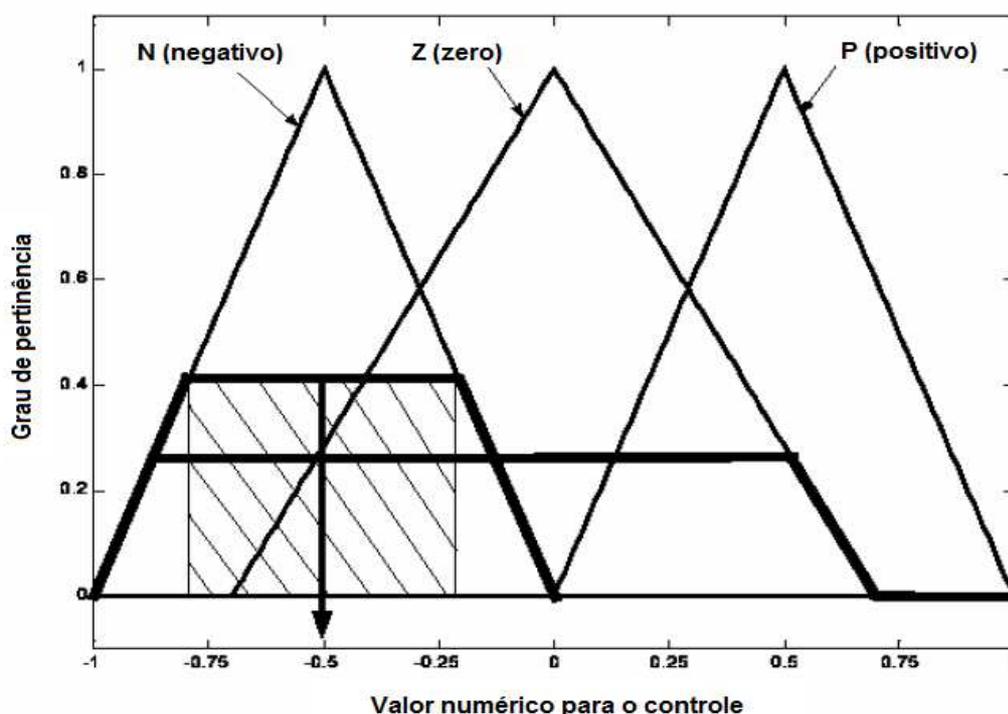


Figura B.4.1 – Método de defuzzificação pela média da associação máxima.
Fonte: Extraída e adaptada de Tusset (2008, p.132).

Na equação (2.7), o método do centro da área é calculado a partir da contribuição de duas funções. Segundo Simões e Shaw (2007), este método apresenta alguns problemas, como, quando mais de uma regra tiver a mesma saída *fuzzy* haverá uma superposição de áreas que não será contabilizada corretamente, e quando o método necessitar de integração numérica necessitará de esforço computacional para o cálculo. A **Figura B.4.2** ilustra o método de defuzzificação pelo centro da área:

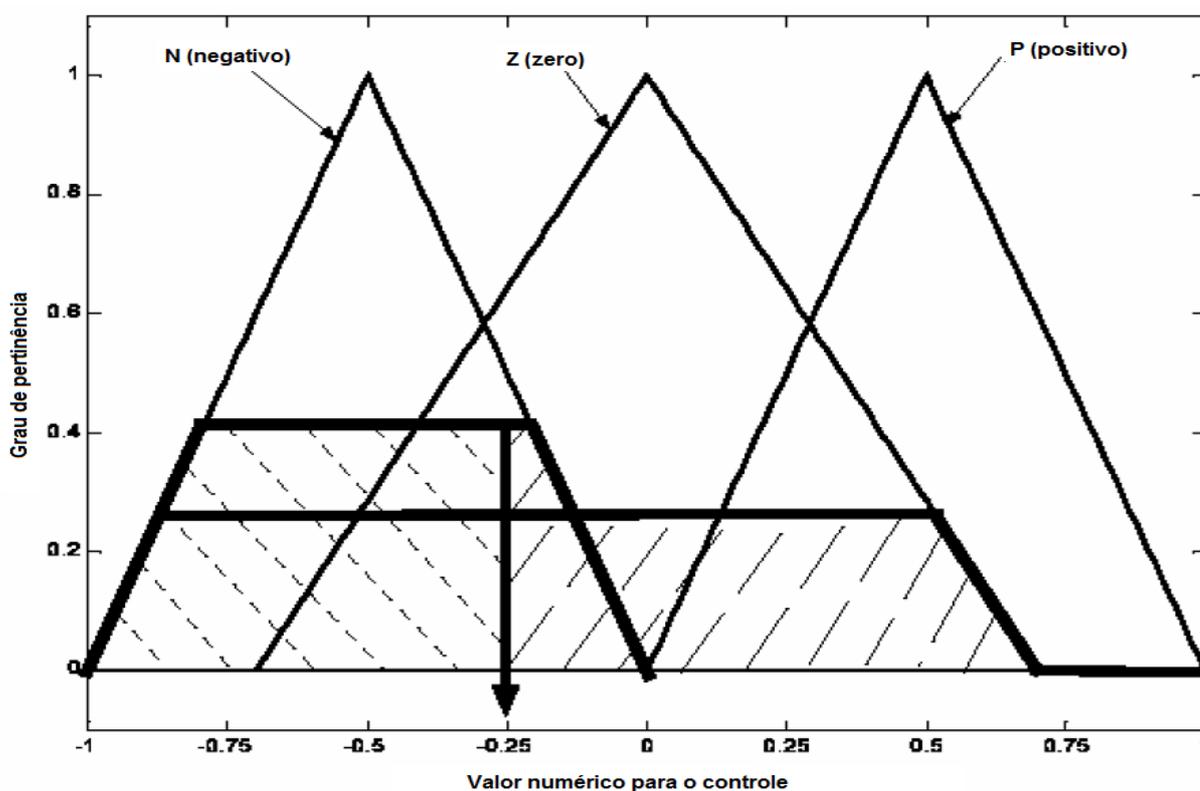


Figura B.4.2 – Método de defuzzificação pelo centro da área.
Fonte: Extraída e adaptada de Tusset (2008, p.130).

O método de defuzzificação por centro do máximo, comumente utilizado na literatura, segundo Tusset (2008), os picos das funções de associação representados no universo de discurso são usados ignorando-se as áreas das funções de pertinência, os valores não-nulos 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.

Segundo o autor, desta forma, as áreas das funções de associação não são utilizadas, apenas os máximos e a saída discreta é calculada como uma média ponderada dos máximos, conforme a equação (B.4.1):

$$\mu_{com} = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i \cdot \sum_{k=1}^n \mu_{o,k}(\mu_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{o,k}(\mu_i)} \quad (\text{B.4.1})$$

onde:

$\mu_{o,k}(\mu_i)$: são os pontos onde ocorrem os máximos das funções de associação;

N : é o número total de elementos para todas as regras n .

A Figura B.4.3 ilustra o método de defuzzificação pelo centro do máximo:

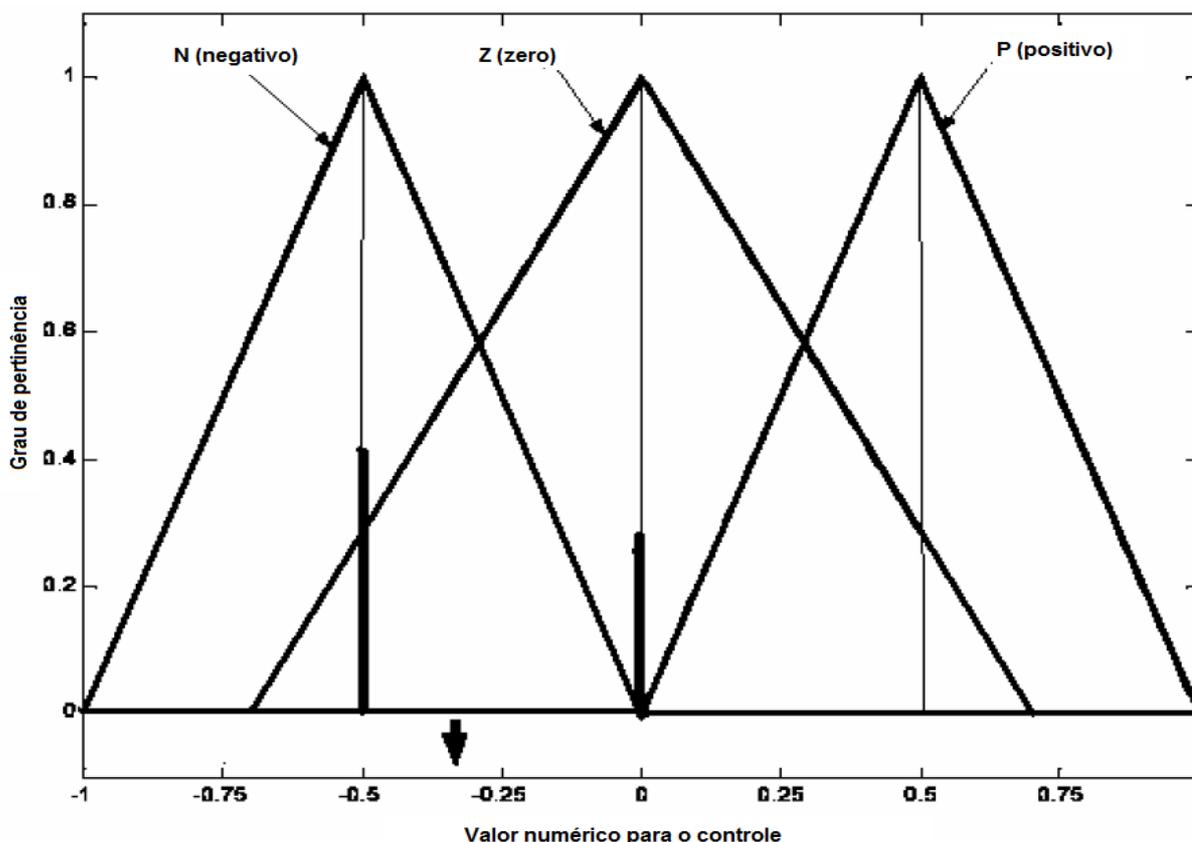


Figura B.4.3 – Método de defuzzificação pelo centro do máximo.
Fonte: Extraída e adaptada de Tusset (2008, p.131).

APÊNDICE C: Instrumentação Industrial

Segundo Araújo *et al* (2005), o controle do tipo analógico desenvolveu-se, inicialmente, com o surgimento dos amplificadores operacionais, por meio das malhas específicas de ação de controle e evoluíram juntamente com a microeletrônica, passando a utilizar circuitos mais complexos, microprocessados, que exigiram o uso de ações de controle diversas, tais como PID, PID adaptativo (não linear), lógica *fuzzy*, preditiva, entre outros.

Na visão de Araújo *et al* (2005), os equipamentos que incluem a manipulação com variáveis analógicas são muitas vezes chamados de controladores programáveis, pois a terminologia adotada para o CLP está associada, em geral, ao controle discreto em razão da lógica de programação ser oriunda dos diagramas elétricos a relés. Mesmo assim, são adicionados diversos recursos aos controladores programáveis para sistemas automatizados (CLP, SDCD, PAC, e-PAC), tais como a comunicação entre operadores sistemas (IHM, SCADA e MES, ERP) como na comunicação entre máquinas (redes de campo). (CASTRUCCI, P.L., MORAES, C.C., 2007).

Em um sistema de controle, quando as informações dos sensores, atuadores e de quaisquer dispositivo indicador de *status* são tratadas por meio de um processamento de dados feito por um sistema SCADA, banco de dados e todos os níveis acima, como o de coordenação, planejamento e gerenciamento, são beneficiados para melhor coordenar a programação e o controle de produção, planejando o processo de fabricação como um todo e estabelecendo uma nova gestão de gerenciamento dos negócios (ARAÚJO *et al.*, 2005; ANDRADE, A.A., 2007).

Araújo *et al* (2005) e Castrucci e Moares (2007) relatam que uma das formas teóricas de classificar o grau de automação ou nível de integração de um sistema industrial é a pirâmide da automação industrial. A classificação segundo Andrade (2007) é composta por 5 níveis: Nível 1 – Máquina, Nível 2 – Estação, Nível 3 – Célula, Nível 4 – Central, Nível 5 – Planta.

A **Figura C.1** ilustra os níveis de automação industrial segundo a classificação adotada por Andrade (2007):

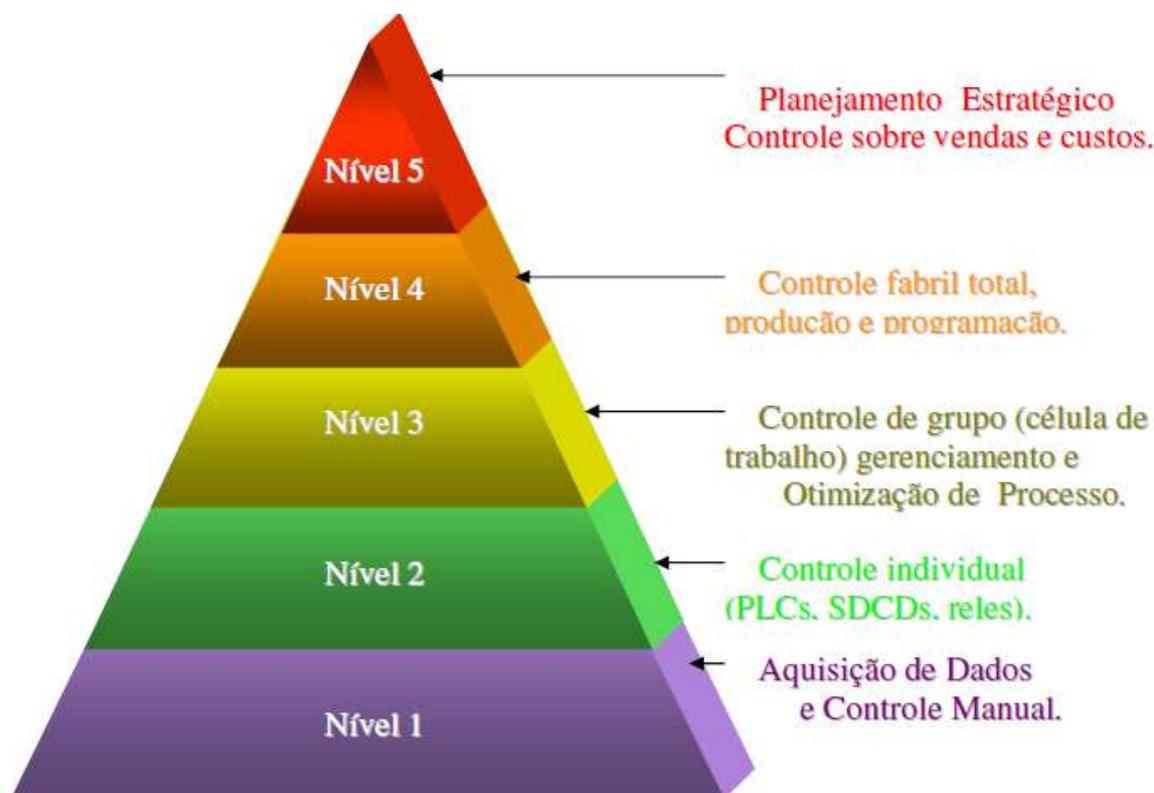


Figura C.1 – Método de defuzzificação pelo centro do máximo.
Fonte: Extraída de Andrade (2007, p.3).

Andrade e Yamaguchi (2008) relatam que o grau de automação ou o nível integração de um sistema industrial pode ser observado, por exemplo, em um Centro de Controle de Motores (CCM). É característico ter um conjunto de acionamentos de motores agrupados em um mesmo painel elétrico compostos por várias colunas e gavetas, podendo ter módulos de comunicação ou entradas e saídas físicas para troca de dados.

Ainda, também é típico nestas instalações, o uso de relés de proteção inteligentes para monitoração e controle do sistema de energia elétrica. Com este tipo de equipamento, podem ser monitoradas grandezas elétricas de barramentos, alimentadores, disjuntores, transformadores e motores elétricos (CASTRUCCI, P.L., MORAES, C.C., 2007; ANDRADE, A.A., YAMAGUCHI, M.Y., 2008).

A **Tabela C.1** apresenta alguns exemplos de dispositivos e de produtos de aplicação nos diversos níveis:

Tabela C.1 – Exemplos de dispositivos constituintes nos níveis de controle industrial.

Nível	Exemplos de dispositivos
1	Chaves de emergência, fim-de-curso; Botões, Sensores de temperatura, pressão, nível, umidade, pH, movimento; medidores de vazão etc.
2	CLP; Controladores digitais do tipo “single-loop”; SDCD; Inversores de frequência, Servoacionamentos e demais drivers de acionamento.
3	SCADA, Simuladores de processos, Sistemas de operação por batelada, IHM, etc.
4	É definido pela exploração de sistemas <i>Just-in-time</i> e de planejamento de requisição de materiais e de planejamento de manufatura.
5	Sistemas ERP, Gestão de recursos corporativos, SAP, etc.

Fonte: Extraída e adaptada de Andrade (2007, p.2).

Na classificação adotada por Andrade (2007), a instrumentação industrial opera no nível máquina, estabelecendo uma *interface* com o campo com a finalidade de prover aos controladores programáveis as informações de funcionamento e de status do processo.

Tomando esta abordagem, para estabelecer a *interface* com o campo com alto nível de confiabilidade e determinismo, Pizzolante (2012, p. 74) relata que “a escolha da tecnologia a ser empregada na medição de nível deve definida com base na exigência metrológica da medição do processo.”. Ainda, segundo o autor, alguns segmentos da indústria seguem critérios pré-estabelecidos com relação às medições em ambientes industriais.

Na equação (3.11), Garcia (2006) considerou o transmissor de nível **LT** como linear e modelada através de um sistema de primeira ordem com constante de tempo de 0,5 segundos, porém o autor não faz menção do tipo de transmissor de nível aplicado.

Tomando esta abordagem, Pizzolante (2012, p.74), relata que “na maioria das literaturas técnicas, a medição de nível é classificada como direta ou indireta. Esta classificação é dada pela forma como o nível é medido.”. O autor classifica a medição direta por meio da comparação da distância entre o nível do produto a ser medido e um referencial pré-definido e a medição indireta como sendo determinada através de outra grandeza física.

Na visão de Fialho (2011, p.162), medir a variável nível:

[...] em processos industriais é quantificar referenciais por meio de monitoramento direto ou indireto com o objetivo de avaliar e controle volumes de estocagens em tanques ou recipientes de armazenamento. São chamados monitoramento de nível direto quando resultam da leitura da magnitude mediante o uso de instrumentos de medida como régua graduada em unidade específica (m^3 , litros, galões, etc.), amperímetros ou apenas indicadores de limites máximo e mínimo, fornecendo uma saída proporcional ao nível que se deseja medir, e indireto quando resultam da aplicação de uma relação matemática que vincula a grandeza a ser medida com outras diretamente mensuráveis.

Pizzolante (2012) relata que em tanques de petróleo, por exemplo, o medidor mais usual ainda é a trena, mas devido às incertezas deste tipo de medição, que está sempre associada à sensibilidade do operador, a migração para os indicadores de nível tipo *bypass* acoplados com transmissores de nível com indicação remota vem sendo cada vez mais constantes.

O autor afirma ainda, que para a indústria de petróleo, as medições seguem os critérios estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo onde são requeridas precisões de 6mm para medição operacional e de 12 mm para transferência de custódia (medição usada para compra e venda de um determinado produto).

Com base nesta realidade de mercado, Fialho (2011) apresenta na **Tabela C.2**, a classificação das tecnologias que podem ser aplicadas para medição de nível direta de substâncias sólidas ou líquidas em geral:

Tabela C.2 – Classificação das medidas de nível.

	Tecnologia aplicada	Líquidos	Sólidos
Medida direta	Medição por visores de nível	x	x
	Medição por boias e flutuadores	x	
	Medição por contatos de eletrodos	x	
	Medição por sensor por contato	x	
	Medição por unidade de grade		x
	Medição por capacitância	x	x
	Medição por empuxo	x	
	Medição por pressão hidrostática	x	
	Medição por célula d/p CELL		
	Medição por caixa de diafragma		
	Medição por tubo em U		
	Medição por borbulhamento		
	Medição por radioatividade	x	x
	Medição por ultrassom	x	x
	Medição por vibração	x	x
	Medição por pesagem	x	x

Fonte: Extraída de Fialho (2011, p.162).

Na modelagem matemática da planta-piloto apresentada no Capítulo 3, além do transmissor de nível **LT**, foi utilizada a válvula de controle **LV** (válvula globo de sede simples de 6 polegadas) com característica inerente de vazão tipo igual-percentagem com rangeabilidade R de 30:1.

Segundo Zambon (2014), a característica de vazão inerente é definida como sendo a relação existente entre a vazão que escoar através da válvula e a variação percentual do curso, quando se mantém constante a pressão diferencial através da válvula. Portanto, a característica de vazão inerente é a teórica, pois os fabricantes não possuem condições de simular toda e qualquer aplicação da válvula de controle.

Zambon (2014, p.52) relata que:

[...] a idéia da válvula de controle nasceu com a válvula globo e isto se tornou um fato devido extamente pelas características mecânicas e construtivas desse equipamento. A perda de carga provocada pela passagem sinuosa a que o fluido controlado é submetido faceia as necessidades de controle de vazão e gera as condições ideais de controle. Iguamente, o deslocamento do obturador em relação à sede, sendo linear, possibilita o cálculo preciso do volume de fluido que passa por esta restrição.

Zambon (2014) relata que a recomendação para instalação das válvulas de sede simples é de de tal forma que a vazão tende a abrir, resultando em operações suave e silenciosa com máxima capacidade. Caso a válvula de sede simples seja instalada de forma que a vazão tende a fechar, é possível o martelamento da sede pelo obturador fenômeno conhecido como *chattering*, ou seja, a força de desequilíbrio é relativamente alta em comparação com a força de posicionamento do obturador.

O autor relata ainda que, não somente esses aspectos que fazem com que os internos de uma válvula globo de controle sejam ideais para o fim a que se destina. O desenho e a usinagem simples, a possibilidade de diversos perfis, a facilidade na obtenção de materiais de construção, revestimento e de polimento, permitem atender diversos processos industriais com alta eficiência.

Segundo Garcia (2006), uma válvula de controle consiste de dois conjuntos principais: atuador e corpo. O autor relata que o atuador fornece a força motriz necessária para o funcionamento e proporciona meios de operacionalidade estáveis e suaves, contra a ação variável de forças dinâmicas e estáticas originadas através da ação do fluido de processo.

Tomando esta abordagem, Garcia (2006) e Zambon (2014) caracterizam o corpo como a parte da válvula que executa a ação de controle permitindo maior ou menor passagem do fluido no seu interior, conforme a necessidade do processo.

Portanto, a válvula de controle **LV**, caracteriza-se por uma válvula de deslocamento linear, na qual a peça móvel vedante descreve, um movimento retilíneo, acionada por uma haste deslizante.

A **Figura C.2** ilustra uma válvula globo simples reversível, onde o obturador é guiado na base, no topo e/ou em sua saia e sua montagem faz com que a válvula feche ao descer da haste:

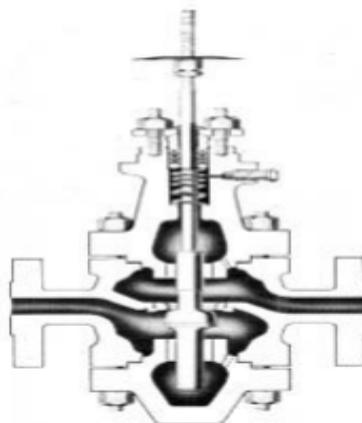


Figura C.2 – Válvula globo sede simples.

Fonte: Extraída de Fialho (2012, p.162).

O estilo de corpo é chamado reversível em razão de poder ser montado utilizando exatamente as mesmas peças. O tipo de ação mais desejável para uma aplicação específica é determinado pelos outros elementos da cadeia de controle e sobretudo pela possibilidade de perda de potência do atuador (GARCIA, 2006; FIALHO, A.B., 2011).

Zambon (2014) relata que tanto os obturadores do tipo contorno quanto os conjuntos internos do tipo gaiola contribuem na flexibilidade, precisão e eficiência pois suas características físicas e mecânicas são facilmente usináveis. Assim, as possibilidades de obtenção de uma curva característica precisa ou um coeficiente de vazão (C_v) com alto grau de precisão e confiabilidade são infinitas e como resultado, obtém-se maior rangeabilidade e repetibilidade da válvula.

Segundo Zambon (2014, p.53):

Define-se a rangeabilidade como a razão obtida pelos limites da curva característica da válvula onde se observa condições ideais de controle. Ou seja: a relação entre os valores máximos e mínimos da curva característica, onde a válvula de controle atua com absoluta precisão. E repetibilidade é definida basicamente como a propriedade de uma válvula de controle de se posicionar exatamente no mesmo lugar para um dado sinal de controle.

A **Figura C.3** ilustra as curvas características de válvula de controle:

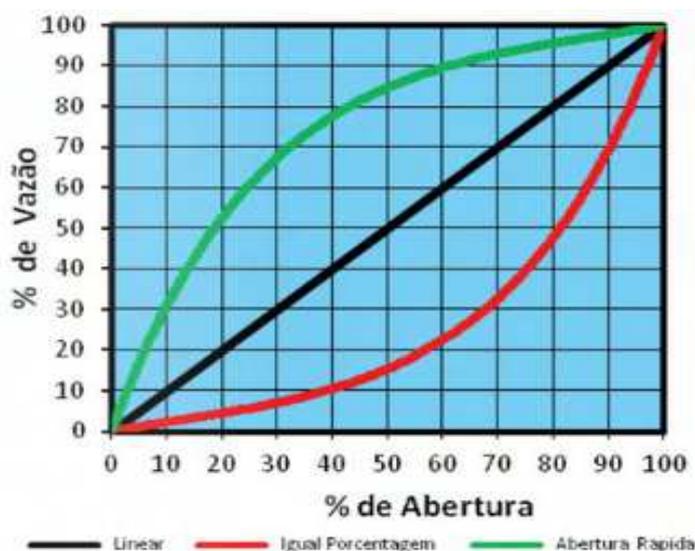


Figura C.3 – Curvas características de válvula de controle.

Fonte: Extraída de Zambon (2014, p.53).

A instrumentação industrial analógica relatada por Araújo *et al* (2005) tem sofrido evoluções no tocante à integração com os níveis de controle industrial relatados por Andrade (2007). Os instrumentos citados neste trabalho de pesquisa também têm acompanhado este processo de evolução, onde, dados e sinais de campo por meio de redes de comunicação industriais, navegam entre os mais diferentes níveis hierárquicos dentro de uma indústria minimizando custos de fabricação, aumentando a eficiência na manipulação do produto e a produtividade.

Baseado neste conceito, os fabricantes de transdutores, atuadores e instrumentos em geral para sistemas automatizados disponibilizam para a integração entre os níveis de controle industrial, seguindo classificação da pirâmide de automação adotada por Andrade (2007), portas de comunicação em conformidade aos padrões *RS-232*, *RS-485* e *ethernet* com protocolos Modbus RTU, Modbus TCP/IP, HART, Profibus-PA, entre outros para substituir o controle realizado através das entradas e saídas analógicas nos controladores programáveis, minimizando os custos de instalação, cablagem e tempo de comissionamento no campo.

APÊNDICE D: A norma IEC61131-3 e os benefícios da PLC Open®

Segundo Faustino (2005), em 1979 a International Electrotechnical Commission iniciou seus trabalhos para definição de uma norma relativa a controladores programáveis abrangendo assuntos relacionados à instalação, testes, documentação e programação. Para discutir e escrever a norma, o comitê técnico desta organização, ligado à medição e ao controle de processos industriais (TC75, ou seja, *Technical Committee 75*), criou o grupo de trabalho (WG7, ou seja, *Working Group 7*).

Em razão da complexidade de tratar todos os assuntos relacionados CLP's, algumas forças-tarefas de especialistas foram estabelecidas para desenvolver diferentes partes do padrão. A força-tarefa 3 foi designada para desenvolver um novo padrão de linguagens de programação, tornando-se a parte 3, chamada IEC1131 (ou IEC1131-3). Em 1994, foi publicada a norma IEC61131-3, estabelecendo a partir de então sintaxes e semânticas bem definidas, eliminando a chance de dialetos, aplicável independente de qualquer fabricante (BOTTURA FILHO, 2004; (FAUSTINO, M.R., 2005; ANDRADE, A.A., YAMAGUCHI, M.Y., 2008).

Andrade e Yamaguchi (2008) destacam as características inovadoras da norma IEC61131-3:

- a norma encoraja o desenvolvimento da estruturação de programa “*top-down*” ou “*down-top*”, ou seja, considera a visão geral do processo ou em pequenas partes que em conjunto constituem o processo total;
- forte definição de tipo de variável;
- suporta controle completo da execução do programa através do controle da execução de diferentes partes do programa com diferentes eventos e taxas de varredura;
- suporte completo para a descrição de um processo com comportamento sequencial complexo através das linguagens gráficas;
- seleção da linguagem mais adequada ao processo.

As 8 partes que compõem a norma IEC61131-3 são mostrados na **Figura D.1**, reproduzida do material desenvolvido por Andrade e Yamaguchi (2008):

Parte	Título	Conteúdo	Publicação
Part 1	<i>General Information</i>	Definição da terminologia e conceitos	2003 (2ª ed.)
Part 2	<i>Equipment Requirements and Tests</i>	Testes de verificação e fabricação eletrônica e mecânica	2003 (2ª ed.)
Part 3	<i>Programming Languages</i>	Estrutura do software do Controlador Programável (CP), linguagens e execução de programas	2003 (2ª ed.)
Part 4	<i>User Guidelines</i>	Orientações para seleção, instalação e manutenção de CPs	2004 (2ª ed.)
Part 5	<i>Communications</i>	Funcionalidades para comunicação com outros dispositivos	2000 (1ª ed.)
Part 6	<i>Reservada</i>		
Part 7	<i>Fuzzy Control Programming</i>	Funcionalidades de software, incluindo blocos funcionais padrões para tratamento de lógica nebulosa dentro de CPs	2000 (1ª ed.)
Part 8	<i>Guidelines for the Application and Implementation of Programming Languages</i>	Orientações para implementação das linguagens IEC 61131-3	2003 (2ª ed.)

Figura D.1 – Composição da norma IEC61131.

Fonte: Extraída de Andrade e Yamaguchi (2008, p.43).

Na visão de John *et al* (2001, FAUSTINO, M.R., 2005, p.30) “a IEC61131-3 é um guia para a programação de CLP e não um conjunto rígido de regras”. Devido ao número enorme de detalhes, deseja-se que os controladores programáveis estejam em total conformidade com a norma e por isto, a IEC fornece um conjunto de 62 tabelas de requisitos que devem ser declarados implementados ou não pelo fabricante do controlador.

Segundo Andrade e Yamaguchi (2008), a norma IEC61131-3 pode ser dividida em duas partes: Elementos comuns e Linguagens de programação conforme organização apresentada na **Figura D.2**:

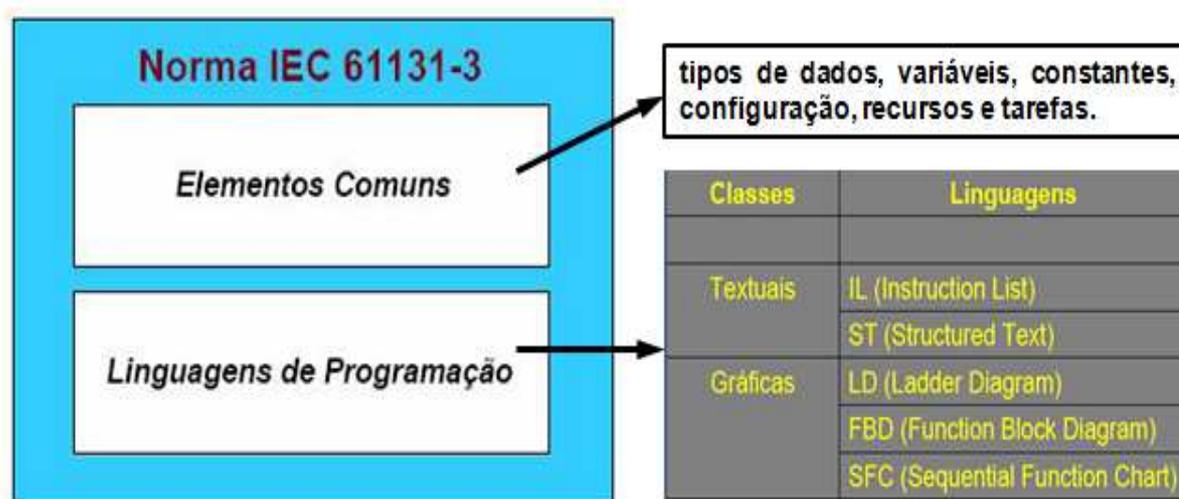


Figura D.2 – Definições da norma IEC61131-3.

Fonte: Extraída e adaptada de Andrade e Yamaguchi (2008, p.45;48).

Lewis (1995, *apud* FAUSTINO, M.R., 2005, p.31) relata que um fabricante pode declarar que atende à norma IEC61131-3 implementando apenas algumas características simples nas linguagens de programação. Para impedir que estes requisitos fracos de conformidade inviabilizem a portabilidade entre as plataformas computacionais de programação de controladores programáveis, foi criado um órgão chamado *PLC Open*[®].

Segundo a *PLC Open*[®] (2014), suas atividades são baseadas na norma IEC61131-3, único padrão global para programação, que compatibiliza a forma de projetar e operar controladores programáveis por meio de uma *interface* padrão que permite que profissionais com diferentes formações e habilidades possam criar diferentes elementos de um programa durante as fases de vida de um aplicativo computacional: especificação, projeto, implementação, teste, instalação e manutenção.

A norma inclui a definição da linguagem SFC para estruturar a sequência de execução de um programa e das demais quatro linguagens: IL , LD , FBD e ST . Através da decomposição em elementos lógicos, modularização e técnicas modernas para aplicativos computacionais, cada programa é estruturado aumentando sua reutilização, reduzindo erros e aumentando a eficiência do usuário na programação. (FAUSTINO, M.R., 2005; PLC Open[®], 2014).

A *PLC Open*[®] (2014), afirma proporcionar maior eficiência em automação industrial, compatibilizando bibliotecas computacionais para desenvolvimento de lógica, controle de movimento, segurança e comunicação para controladores programáveis e permite reduzir custos através de:

- redução de tempo no desenvolvimento de aplicações;
- tempo de comissionamento reduzido;
- melhorias operacionais contínuas nas bibliotecas;
- redução no ciclo de vida na execução do projeto.

Para este trabalho de pesquisa, observou-se no Capítulo 4 os benefícios de utilização da norma IEC61131-3 com relação à aplicação de uma linguagem de programação padronizada (FBD) para a transcrição equivalente do sistema de inferência *fuzzy* do ambiente *UnityPro*[®] para o ambiente *Matlab/Simulink*[®].

Como parte de contribuição futura do trabalho, adicionalmente pode-se propor a transcrição equivalente do programa do ambiente *UnityPro*[®] para uma plataforma de programação de outro fabricante que esteja na mesma condição de conformidade à norma IEC61131-3 e também pode-se propor para o controle, ao invés do uso via entradas e saídas analógicas, o uso de rede de comunicação industrial para aplicação da biblioteca PLC Open[®] para controle de movimentos (*motion control*).

APÊNDICE E: Metodologia de simulações

E.1 Simulações no ambiente Matlab/Simulink®

Os testes foram feitos da seguinte maneira:

E.1.1) No projeto da modelagem da planta-piloto, inseriu-se via código de programa (arquivo .m) para o ambiente *Matlab/Simulink®* os dados do tanque, do conversor I/P, da válvula de controle e do transmissor de nível;

E.1.2) Em código de programa (arquivo .m), inseriu-se também os dados de entrada e as condições iniciais para o modelo do tanque e o valor das variáveis da malha nas condições iniciais de operação para levantar a curva de reação do sistema em malha aberta;

E.1.3) Rodou-se a simulação do sistema em malha aberta e obteve-se a curva de reação;

E.1.4) Aplicou-se com o sistema em malha fechada a metodologia proposta do trabalho para o Controlador PID Digital Fuzzy com apoio do método da curva de reação proposto por Ziegler-Nichols (1942);

E.1.5) Inseriu-se via código de programa (arquivo .m) a simulação de variação em 10% de h_{ref} ;

E.1.6) Rodou-se a simulação do sistema em malha fechada e desenvolveu-se uma análise dos critérios de aprovação das simulações com o auxílio de uma tabela comparativa dos indicadores de desempenho para sistemas de controle subamortecidos;

E.1.7) Comparou-se os resultados obtidos e verificou-se a eficiência da metodologia proposta, estabelecendo-se assim, a transcrição equivalente da programação em ambiente *UnityPro®* visando testes em campo em planta industrial com as mesmas características.

A metodologia de testes descrita nos itens de E.1.1 a E.1.7 está representada na **Figura E.1**:

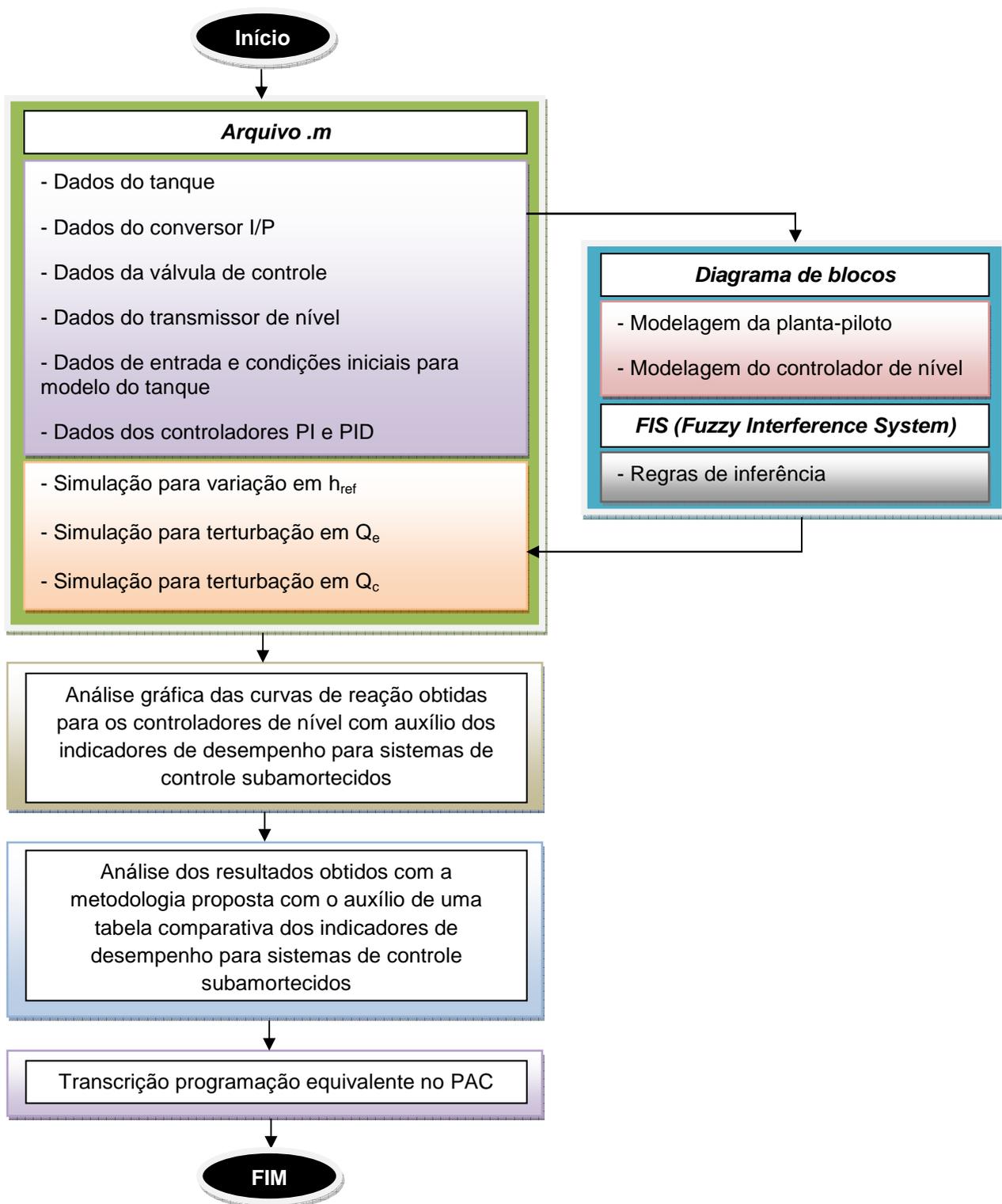


Figura E.1 – Metodologia utilizada para testes da planta-piloto no ambiente *Matlab/Simulink*[®].

E.2 Simulações no ambiente UnityPro®

Os testes foram feitos da seguinte maneira:

E.2.1) No projeto do controlador (arquivo .stu) para o ambiente *UnityPro*®, foi realizada a configuração do equipamento, informando ao aplicativo computacional o modelo da CPU e do módulo de entradas e saídas analógicas;

E.2.2) A estrutura de programa do Controlador PID Digital, foi desenvolvida na seção de programa **PID**, baseado nos blocos de função utilizados na **Tabela 4.6**;

E.2.3) A estrutura de programa do Controlador PID Digital Fuzzy, foi desenvolvida na seção de programa **FIS**, baseado nos blocos de função *fuzzy* utilizados na **Tabela 4.7** e nas regras de inferência estabelecidas na **Tabela 4.3**;

E.2.4) Aplicou-se para a simulação dos Controladores PID Digital e PID Digital Fuzzy os parâmetros obtidos através do método da curva de reação por Ziegler-Nichols (1942) que foram apresentados na **Tabela 4.2**;

E.2.5) Testes de lógica e endereçamento das variáveis no simulador incorporado e no controlador em tempo real para estabelecer a lógica de operação do Controlador PID Digital Fuzzy.

A metodologia de testes descrita nos itens de E.2.1 a E.2.5 está representada na **Figura E.2**:

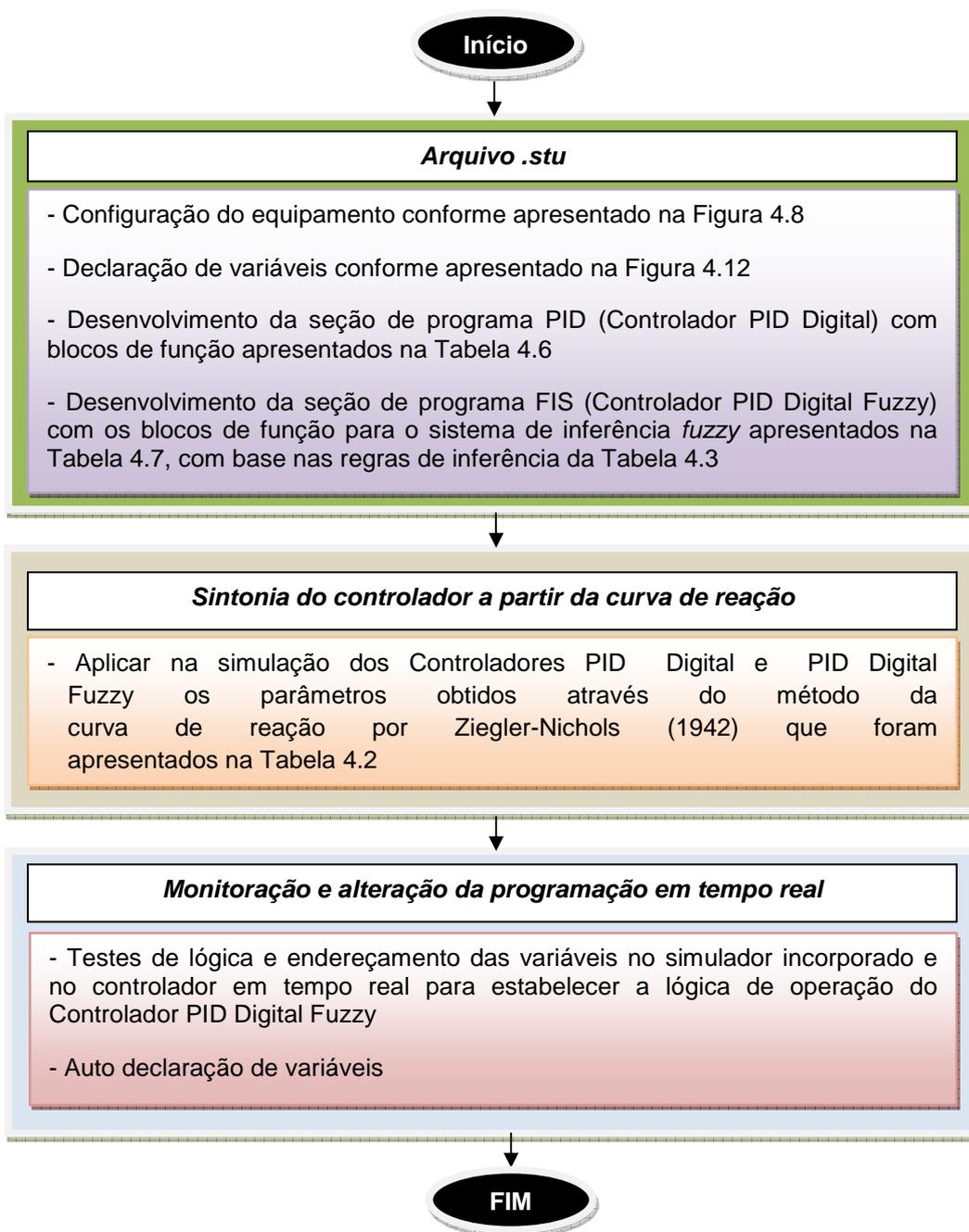


Figura E.2 – Metodologia utilizada para testes de lógica e de endereçamento no ambiente *UnityPro*[®].

APÊNDICE F: Programa em ambiente *Matlab/Simulink*[®] elaborado para as simulações

```

% Dados do tanque

A = 1;           % [m2] Area da base do tanque
hmax = 2;       % [m] Altura maxima do tanque
g = 9.8;       % [m/s2] Aceleracao normal da gravidade
rho = 1000;    % [kg/m3] Massa especifica da agua

% Dados do conversor I/P

Kip = 0.75;     % [psi/mA] Ganho do conversor I/P

% Dados da valvula de controle

Kv = 2.40153e-5;% [adim] Cte p/ ajuste de un. calculo de vazao pela valvula
Cv = 400;      % [gpm/sqrt(Psi)] Coeficiente de vazao da valvula
R = 30;       % [adim] Rangeabilidade da valvula
Tal_at = 5;   % [s] Constante de tempo do atuador da valvula

% Dados do transmissor de nivel

Kt = 8;       % [mA/m] Ganho do transmissor de nivel
Tal_t = 0.5;  % [s] Constante de tempo do transmissor

%Dados de entrada para o modelo do tanque

t_deg = 60;   % [s] Instante de aplicacao do degrau
Pext = 100000;% [Pa] Pressao externa atuando sobre o fluido no tanque
Ps = 100000;% [Pa] Pressao na saida da valvula (suposta atmosferica)
mbarra = 11.6520;% [mA] Sinal de saida manual do controlador
Qebarra = 6e-3;% [m3/s] Vazao nominal de entrada
Qc = 1e-4;   % [m3/s] Vazao de eventual chuva
Tsim = 1000; % [s] Tempo de simulacao
href = hbarra;% [m] Valor de referencia para o nivel

% Valor das variaveis da malha nas condicoes nominais de operacao

vbarra = 8.7390;% [psi] Saida nominal da valvula de controle
hbarra = 1;    % [m] Nivel nominal no tanque
hmbarra = 12;% [mA] Saida nominal do transmissor de nivel
mbarra = 12;% [mA] Sinal de saida nominal do controlador

% Condicoes iniciais para o modelo do tanque

h0 = hbarra;% [m] Nivel inicial do tanque
v0 = vbarra;% [psi] Sinal de saida inicial do conversor I/P
hm0 = Kt*h0;% [mA] Sinal de saida inicial do LT s/ o bias de 4 mA
mI0 = -0.3480;% [mA] Sinal parte integral de saida do controlador PI

```

```

% Parametros do Controlador PI ZN:

Kc=6.53;
Ti=208.66;

% Parametros do Controlador PID ZN:

Kc=8.71;
Ti=125.20;
Td=31.30;
T = 0.3;
Td_lag = Td/6.5;

% Simulação para variação em href

Tsim = 500;          % [s] Tempo de simulacao
Qc_deg = 0;
href_deg = 1.1*href;

% Simulação para perturbação em Qe

Tsim = 1000;        % [s] Tempo de simulacao
Qebarra_deg=1.1*Qebarra;
Qc_deg = 0;
href_deg = href;

% Simulação para perturbação em Qc

Tsim = 1600;        % [s] Tempo de simulacao
Qebarra_deg=Qebarra;
Qc_deg = Qc;

% Batch para geração dos gráficos

plot(t,m_PI_ANL_G,'r') % Gráfico de resposta Controlador PI (Garcia)
hold on
plot(t,PI_ANL_ZN,'g') Gráfico de resposta Controlador PI (Curva de reação)
hold on
plot(t,PID_PAC,'k') Gráfico de resposta Controlador PID Digital (PAC)
hold on
plot(t,PID_FUZ,'b') Gráfico de resposta Controlador PID Digital Fuzzy
hold off

```

