

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ELAINE DE ALBUQUERQUE HUSS

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE EM  
UMA MALHA DE VAZÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2017

ELAINE DE ALBUQUERQUE HUSS

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE EM  
UMA MALHA DE VAZÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina , do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Endo

Coorientador: Prof. Dr. Emerson Ravazzi Pires da Silva

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2017



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Elaine de Albuquerque Huss**

### **Desenvolvimento e aplicação de estratégias de controle adaptativo em uma malha de vazão**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:20hs do dia 09/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Emerson Ravazzi Pires da Silva - (Coorientador)

---

Prof(a). Dr(a). Kleber Romero Felizardo - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Paulo Rogério Scalassara - (Membro)

À minha família.

Em memória de minhas avós Lúcia e Constância.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me aberto as melhores portas e conduzido meus passos para que chegasse até aqui, por me iluminar nos momentos difíceis e sempre me dar conforto para continuar.

Aos meus pais Libia e Mauro, por todos os sacrifícios que sempre fizeram ao longo da minha caminhada, nunca poupando esforços para me ajudar a seguir meus sonhos e por me darem toda a confiança e amor incondicional. Mãe, seu cuidado e sua dedicação foram o que me deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinha.

Aos meus irmãos Débora e Eduardo pelo suporte e pela compreensão com os momentos de estresse e por todos os eventos familiares importantes aos quais não pude estar presente.

Às minhas queridas amigas de infância Mariane, Carolline e Bruna, por compartilharem comigo as alegrias e tristezas e por toda a paciência e incentivo nos momentos de desânimo.

Aos meus queridos amigos de Cornélio Procópio, principalmente Gabriel, Paula, Jackeline, Guilherme e Luana, pela amizade, carinho e por sempre me segurarem nos momentos difíceis, tornando esses anos os mais felizes da minha vida.

Aos professores Dr. Wagner Endo e Dr. Emerson Ravazzi pela dedicação e prontidão durante a orientação deste trabalho.

Aos professores Dr. Danilo Spatti e Dra. Maria Eugenia Dajer pelas valiosas e imprescindíveis dicas de projeto e correção ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores que contribuíram de alguma forma para meu desenvolvimento ao longo do curso.

*Well you only need the light when it's burning low, only miss the sun when it starts to snow... only know you've been high when you're feeling low, only hate the road when you're missing home (Passenger).*

## RESUMO

HUSS, Elaine de Albuquerque. **Desenvolvimento e aplicação de estratégias de controle em uma malha de vazão.** 2017. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

O controle adaptativo é um método adequado nos processos em que ocorrem variações e oscilações inesperadas, já que na medida em que os dados disponíveis para identificação aumentam, os parâmetros do controlador são ajustados durante a operação do sistema. O objeto de estudo do trabalho é a malha de vazão do processo de mistura da Planta didática industrial SMAR presente na Universidade, na qual foram identificadas variações de temperatura e vazão. Um controle adaptativo PID *Fuzzy* por Escalonamento de Ganho, que soma a facilidade de modelagem da lógica *Fuzzy* com a funcionalidade do controlador PID é proposto para solucionar o problema e otimizar o processo. As validações e resultados se deram a partir do ambiente do *Simulink*® utilizando função de transferência e dados reais da Planta coletados via Matlab.

**Palavras-chave:** Planta didática Industrial. Lógica Fuzzy. Controle PID. Controle Adaptativo.

## ABSTRACT

HUSS, Elaine de Albuquerque. **Development and application of control strategies in a flow control loop.** 2017. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2017.

Adaptive control is a suitable method for the type of process that suffers unexpected variations and oscillations, because as the available data for identification increases, the parameters of the controller are adjusted during the operation of the system. The object of study in this paper is the flow control loop of the mixing process in a Industrial Didactic Plant from SMAR that is in the University, in which temperature and flow variations were identify. An Adaptive PID Fuzzy control by Gain Scheduling, that adds the facility of modeling the Fuzzy Logic with the functionality of the PID controller is proposed to solve the problem and optimize the process. Validations and results were obtained from the Simulink environment using the transfer function and actual data of the Pant collected with Matlab.

**Keywords:** Industrial Didactic Plant. Fuzzy Logic. PID Control. Adaptive Control.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de blocos de um controle adaptativo por escalonamento do ganho .....	22
Figura 2 - Diagrama de blocos de um controle adaptativo por <i>Self-tuning</i> .....	22
Figura 3 - Diagrama de blocos de um controle adaptativo por Modelo de referência	23
Figura 4 - Controlador PID com topologia em paralelo .....	24
Figura 5 - Gráfico que representa uma função pertinência .....	277
Figura 6 - Funções de pertinência Triangular, Trapezoidal e Gaussiana .....	28
Figura 7 - Estrutura do Sistema Fuzzy .....	288
Figura 8 - Representação da fuzzificação .....	29
Figura 9 - Análise geométrica do método de implicação de Mamdani .....	300
Figura 10 - Exemplificação da implicação de Mamdani na base de regras .....	311
Figura 11 - Representação da saída final do Método de Mamdani .. <b>Error! Bookmark not defined.</b>	1
Figura 12 - Planta didática Industrial SMAR presente na UTFPR .....	333
Figura 13 - Diagrama de tubulação e instrumentação da Planta didática .....	344
Figura 14 - Diagrama de tubulação e instrumentação do processo de mistura da Planta didática .....	355
Figura 15 - Estrutura do controlador PID <i>Fuzzy</i> utilizando os valores de erro e derivada do erro da vazão como entrada para a lógica <i>Fuzzy</i> , que sintoniza os parâmetros do controlador PID, que aplica o controle no processo de mistura ....	3737
Figura 16 - Estrutura do bloco de lógica Fuzzy .....	38
Figura 17 - Funções de pertinência da entrada $e(t)$ .....	40
Figura 18 - Funções de pertinência da entrada $de(t)$ .....	40
Figura 19 - Funções de pertinência das saídas $Kp'$ e $Kd'$ .....	42
Figura 20 - Funções de pertinência da saída $\alpha$ .....	43
Figura 21 - Resposta degrau desejável para um processo .....	44
Figura 22 - Curva típica utilizada para o Método de Ziegler-Nichols .....	48
Figura 23 - resposta degrau do processo de mistura .....	49
Figura 24 - Diagrama de blocos utilizado na simulação do controle PID Fuzzy .....	51
Figura 25 - Resposta temporal do controle com <i>setpoint</i> de 30°C e entrada de água quente variando entre 40°C e 45°C .....	55

Figura 26 - Resposta temporal do controle com <i>setpoint</i> de 40°C e entrada de água quente variando entre 50°C e 55°C.....	56
Figura 27 - Resposta temporal do controle com <i>setpoint</i> de 50°C e entrada de água quente variando entre 60°C e 65°C.....	57
Figura 28 - Curva de temperatura de água quente obtida no teste .....	60
Figura 29 - Curva da temperatura do tanque de mistura obtida no teste .....	61
Figura 30 - Porcentagem de abertura da válvula de água fria enviada pela saída do controle PID Fuzzy .....	62
Figura 31 - Valores dos parâmetros do controlador PID ajustados pela lógica Fuzzy .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Siglas de instrumentação presentes na Planta.....	34
Tabela 2 - Influência dos parâmetros $K_p$ , $K_i$ e $K_d$ no controle PID.....	44
Tabela 3 - Regras de inferência <i>Fuzzy</i> para $K_p'$ .....	45
Tabela 4 - Regras de inferência <i>Fuzzy</i> para $K_d'$ .....	46
Tabela 5 - Regras de inferência <i>Fuzzy</i> para $\alpha$ .....	46
Tabela 6 - Parâmetros do PID conforme regra de ajuste de Ziegler-Nichols.....	49
Tabela 7 - Valores máximos e mínimos assumidos para os parâmetros do controlador.....	50
Tabela 8 - Valores de temperatura do Processo de Mistura simulados no <i>Simulink</i> ®.....	52
Tabela 9 - Valores das especificações no domínio do tempo observadas na curva de resposta dos controles PID e PID <i>Fuzzy</i> para <i>setpoint</i> igual à 30°C....	56
Tabela 10 - Valores das especificações no domínio do tempo observadas na curva de resposta dos controles PID e PID <i>Fuzzy</i> para <i>setpoint</i> igual à 40°C....	57
Tabela 11 - Valores das especificações no domínio do tempo observadas na curva de resposta dos controles PID e PID <i>Fuzzy</i> para <i>setpoint</i> igual à 50°C....	58

## LISTA DE SIGLAS

CLP	Controlador Lógico Programável
MRAS	<i>Model-reference adaptive system</i>
OLE	<i>Object Linking and Embedding for Process Control</i>
PD	Proporcional - Derivativo
PI	Proporcional - Integral
PID	Proporcional - Integral - Derivativo
REUNI	Programa de Reestruturação e Expansão das Universidades Federais
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>18</b>
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho.....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Controle Adaptativo.....</b>	<b>20</b>
2.1.1	Controle Adaptativo por Escalonamento de Ganho.....	21
2.1.2	Controle Adaptativo por <i>Self-Tuning</i> .....	22
2.1.3	Controle Adaptativo por Modelo de Referência.....	23
<b>2.2</b>	<b>Controlador PID.....</b>	<b>23</b>
2.2.1	Controlador Proporcional.....	25
2.2.2	Controlador Proporcional Integral.....	25
2.2.3	Controlador Proporcional Derivativo.....	26
2.2.4	Controlador Proporcional Integral Derivativo.....	26
<b>2.3</b>	<b>Lógica Fuzzy.....</b>	<b>26</b>
2.3.1	Fuzzificação.....	28
2.3.2	Inferência <i>Fuzzy</i> .....	29
2.3.3	Defuzzificação.....	31
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Planta Industrial.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Controlador PID <i>Fuzzy</i> Adaptativo.....</b>	<b>36</b>
3.2.1	Determinação das funções de pertinência das entradas e das saídas da Lógica <i>Fuzzy</i> .....	38
3.2.2	Definição da Base de Regras.....	43
3.2.3	Obtenção dos parâmetros do controlador PID.....	47
<b>3.3</b>	<b>Representação do controle PID <i>Fuzzy</i> via <i>Simulink</i>®.....</b>	<b>50</b>
<b>3.4</b>	<b>Procedimentos de testes para coleta de dados da Planta Industrial.....</b>	<b>53</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>55</b>

<b>4.1</b>	<b>Simulação com Função de Transferência.....</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulação com Dados Reais.....</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O controle automático se mostra essencial para qualquer campo da engenharia ou ciência, já que está presente em sistemas robóticos, sistemas de manufatura modernos e em sistemas industriais que envolvem controle de variáveis como temperatura, vazão, pressão, entre outros (OGATA, 2000). A principal função desse controle é regular o comportamento das variáveis de interesse em um sistema ou uma planta, onde estes normalmente possuem uma ou mais entradas (WOLOVICH, 1994). Controlar uma grandeza ou variável, é o ato de alterar seu valor de acordo com uma intenção ou até que se encontre no ponto de operação desejado (CASTRUCCI *et al*, 2011).

Os sistemas regulados pelos controles automáticos são denominados Sistemas de Controle, e são subsistemas ou processos (ou plantas) que controlam sua saída, assim, de acordo com uma entrada, uma saída é fornecida (NISE, 2002). Esses sistemas nada mais são do que combinação de processos, sensores, atuadores e sistemas de computadores projetados e ajustados para realizar uma operação segura e rentável.

Neste trabalho, é analisado processo do tanque de mistura da Planta Didática Industrial da SMAR, disponível no Laboratório Instrumentação e Processamento de Sinais da UTFPR (sala G103), Câmpus Cornélio Procopio. Essa Planta representa um sistema físico real em escala reduzida, fazendo com que as aplicações nela desenvolvidas emulem processos industriais reais. Dois processos são emulados, sendo um de mistura e um de aquecimento. A arquitetura dessa planta se baseia em um sistema de controle com rede de comunicação industrial, um Controlador Lógico Programável (CLP) e um controlador Profibus-PA.

No tanque de mistura ocorre a mistura entre a água quente proveniente do tanque de aquecimento e a água fria do reservatório, assim, o controle desse processo responde às variações do tanque de aquecimento, mantendo a temperatura da água no tanque de mistura em um valor desejado. Desse modo, o controle automático utilizado é de extrema importância no processo, já que é responsável por receber como *setpoint* a temperatura requerida no tanque de mistura, relacionar com a temperatura da água proveniente do tanque de aquecimento, e através disso, agir na abertura ou fechamento da válvula de controle, causando o aumento ou diminuição da vazão de água fria no tanque.

É possível perceber, então, que um instrumento de grande importância no desenvolvimento do trabalho é a malha de controle de vazão e do controle de mistura. Qualquer problema na malha de vazão afeta a saída do processo, já que ela é responsável por regular o fluxo necessário da variável manipulada para manter o valor da variável de interesse no *setpoint* desejado.

## 1.1 Motivação

As técnicas convencionais de controle são amplamente utilizadas em aplicações industriais devido à sua simplicidade, robustez e familiaridade com o operador de campo. Normalmente, um sistema prático apresenta características não-lineares, que muitas vezes são representados por modelos linearizados em torno do ponto de operação. Contudo, ocasionalmente, a sintonia dos controladores para esses pontos de operação não apresenta um resultado satisfatório, devido, por exemplo, às variações nos parâmetros do processo. Frente à isso, a solução encontrada é continuamente ajustar os parâmetros dos controladores (FONSECA,2012).

Tendo em vista as técnicas de controle existentes, o controle adaptativo se mostra uma ótima alternativa para solucionar esse ajuste, já que realiza a adequação dos parâmetros do controlador para variações que não podem ser previstas devido aos distúrbios, se tornando importante no sistema em que ocorrem alterações imprevisíveis na operação (ASTRÖM; WITTENMARK, 2008). É caracterizado pela existência de duas malhas de realimentação, sendo elas a malha de controle convencional e a malha de adaptação, que monitora o desempenho e ajusta os parâmetros do controlador de acordo com o ponto de operação desejado (FERREIRA, 2009).

A relevância desse controle vem sendo discutida ao longo dos últimos anos, com diversas pesquisas relacionadas. ZHOU *et al.* (2003) apresenta uma técnica de controle adaptativo para uma válvula pneumática levando em consideração distúrbios como a fricção e outras características envolvidas na ação do atuador; MUNASINGHE *et al.* (2005) utilizou um controlador *Neuro-fuzzy* para o controle de nível de água em usinas nucleares; XIAO *et al.* (2010) propôs uma técnica de controle baseada em controle adaptativo PID *Fuzzy* para controle de tanque de



nível; e CHU *et al.* (2013) realizou um estudo de controle PID *Fuzzy* aplicado em sistemas de potência, a fim de melhorar sua estabilidade.

Seguindo essa linha de pesquisa, observou-se que a técnica apresentada por ZHAO *et al.* (1993) em que propõe uma aplicação da lógica *Fuzzy* por escalonamento de ganho em controladores PID, seria uma opção interessante como controle adaptativo para o tanque de mistura da Planta Industrial. Devido à sua simplicidade de implementação e seus resultados satisfatórios, os controladores PID são os mais escolhidos pelas indústrias e se mostram como a melhor escolha para agir em conjunto com o controle adaptativo. Sua ação no controle automático dos processos se dá através da combinação das ações de controle proporcional, integral e derivativa. Utiliza as vantagens das três para resultar em uma maior precisão na saída do processo, já que a ação integral anula o erro do sistema e o efeito desestabilizador dessa ação é regulada pela ação derivativa, que melhora estabilidade (MATAS, 2012).

Porém, o principal obstáculo que pode ser observado na utilização do controlador PID é a sintonia dos seus parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$ , e  $K_d$  para que a resposta produzida seja rápida e sem sobressinal. Várias abordagens clássicas são utilizadas para a sintonia desses controladores e esses métodos normalmente dependem de uma obtenção de um modelo matemático do processo, que por muitas vezes pode ser impreciso e variável de acordo com o ponto de operação (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

Uma alternativa para a sintonia de controladores é o uso de técnicas que contornam a etapa da modelagem matemática dos processos, como a lógica *Fuzzy*, que oferece a modelagem do sistema baseada no conhecimento experimental dos controladores humanos que conhecem o sistema e já sabem quais ações devem ser tomadas frente a certas condições, dispensando um modelo matemático, facilitando a implementação (SIMÕES; SHAW 2007). Tendo esse conhecimento, torna-se possível a utilização dessa lógica para realizar a sintonia do controlador PID, tornando-se um controlador PID *Fuzzy*. Esse método apresenta vantagens sobre aqueles com parâmetros fixos, pois se mostra capaz de se adaptar às condições e peculiaridades da planta.

Após uma observação do comportamento das curvas de resposta de temperatura do processo de mistura da Planta Industrial, aplica-se um controle PID *Fuzzy* adaptativo nesse sistema, que reconhece as mudanças no sistema e altera os

parâmetros do controlador PID de modo a compensar as variações presentes no processo, como o valor de entrada de água quente proveniente do tanque de aquecimento. Desse modo, um desempenho aceitável é mantido através da modelagem apropriada da lógica *Fuzzy*.

A coleta dos dados dos processos e a implementação do controle foram realizadas através do Software Matlab como cliente OPC (OLE - *Object Linking and Embedding for Process Control*). A partir dessa ferramenta foi possível ter acesso aos dados dos processos em malha aberta e malha fechada, para todas as topologias de controle da Planta Didática.

## 1.2 Objetivos

Esse tópico é responsável por mostrar os objetivos que este estudo pretende alcançar.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor e elaborar uma estratégia de controle PID *Fuzzy* adaptativo, a fim de melhorar e otimizar as técnicas de controle já aplicadas previamente no processo de mistura da Planta didática. A implementação do controle será feita através do Software Matlab como cliente OPC.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para garantir que o objetivo geral do trabalho seja alcançado, elaborou-se uma relação de objetivos específicos que deverão ser alcançados ao longo do estudo. Estes objetivos são:

- Escolher a técnica adaptativa existente (escalonamento do ganho, *self-tuning* ou modelo de referência) que melhor soluciona o problema;
- Realizar a modelagem do sistema pela lógica *Fuzzy*;
- Verificar a sintonia do controlador PID;
- Realizar simulações via *Simulink*® do controle PID *Fuzzy* aplicado em funções de transferência que representam o processo de mistura;

- Estudar a aplicação da técnica adaptativa desenvolvida no processo de mistura da Planta didática.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

A estrutura desse Trabalho de Conclusão de Curso é composta da maneira como segue: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica e conceitual sobre os principais assuntos relacionados ao trabalho como Controle Adaptativo, Controlador PID, Lógica *Fuzzy* e Válvula de Controle; no Capítulo 3 é realizado um estudo sobre os processos envolvidos na Planta Industrial e descreve-se a metodologia e implementação envolvida no trabalho; no Capítulo 4 os resultados obtidos com o uso do controle PID *Fuzzy* Adaptativo são apresentados e discutidos; No Capítulo 5 são efetuadas as considerações finais; e por fim, no Capítulo 6 são apresentados as recomendações para Trabalhos Futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será realizada uma revisão dos conceitos utilizados para realização do trabalho, sendo eles Controle Adaptativo, Controlador PID, Lógica *Fuzzy* e Válvula de Controle.

### 2.1 Controle Adaptativo

Enquanto o controle convencional trabalha com aproximações de sistemas lineares que possuem parâmetros constantes, o controle não linear lida com casos onde as variações são amplas, sendo capaz de atender as especificações necessárias. Nesse âmbito surge o controle adaptativo, que realiza a adequação dos parâmetros de um controlador para variações que não podem ser previstas devido aos distúrbios. Esse tipo de controle possui parâmetros ajustáveis e mecanismos que permitem que estes possam ser ajustados (ASTRÖM; WITTENMARK, 2008).

Basicamente, o sistema adaptativo identifica a resposta do sistema, compara com a resposta desejada e após isso, é feita a regulagem para a obtenção de uma saída com um menor erro. Na medida em que os dados disponíveis para identificação aumentam, os parâmetros do controlador são ajustados durante a operação da planta (SASTRY; BODSON, 1989).

Sua estrutura é composta por duas malhas, onde uma contém uma realimentação normal, com um processo e um controlador. O parâmetro responsável para ajustar o sistema se encontra na segunda malha, e por muitas vezes é mais lento do que a malha de realimentação (ASTRÖM; WITTENMARK, 2008).

Existem atualmente três tipos conhecidos e aplicáveis de Controle adaptativo, sendo eles Controle adaptativo por Escalonamento do Ganho, por *Self-tuning* e por Modelo de referência.

### 2.1.1 Controle Adaptativo por Escalonamento do Ganho

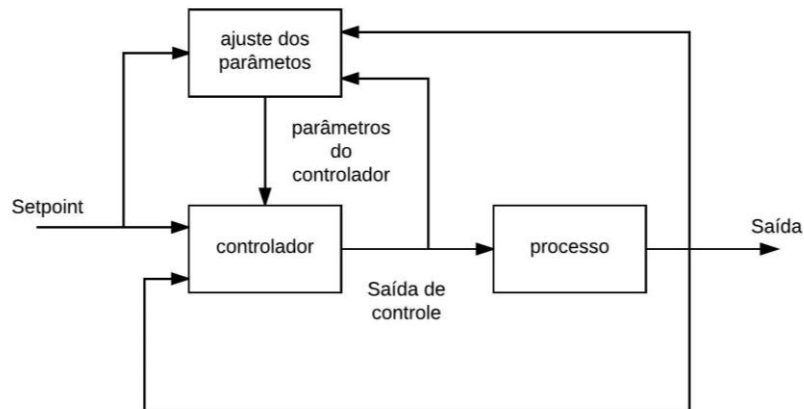
Também conhecido como *Gain Scheduling*, esse modelo é o mais intuitivo e utiliza de variáveis independentes e que estejam em sintonia com alterações da dinâmica do processo (ASTRÖM; WITTENMARK, 2008).

Encontra-se uma variável auxiliar do processo, e através dela, é realizada uma compensação da variação dos parâmetros da planta. Tipicamente os parâmetros do controlador são variados de forma discreta dentro de um conjunto pré-definido. Ou seja, são projetados controladores fixos para diversas regiões de operação da planta e o algoritmo de controle adaptativo consiste em selecionar, em função das variáveis auxiliares, qual destes controladores é o mais adequado em um dado instante de tempo (LAGES, 2007).

Sua maior vantagem é a rapidez com que esses parâmetros podem ser alterados, sendo uma boa escolha para quando a relação entre a dinâmica da planta e a variável auxiliar é conhecida (ASSIS, 1996). Porém, esse método é conveniente apenas se a dinâmica da planta varia de forma bem conhecida em função de poucas variáveis facilmente medidas. Apesar de ser um método bastante utilizado na prática, o escalonamento de ganho tem a desvantagem de ser um mecanismo de adaptação em malha aberta. Adicionalmente, se o número de regiões de operação da planta for elevado, o esforço necessário para projeto pode ser muito grande, pois é necessário projetar-se um controlador para cada uma destas regiões. Outra dificuldade inerente a este método é a prova de estabilidade do controlador resultante. Mesmo que se possa provar a estabilidade para todos os controladores associados a cada uma das regiões de operação, não há garantias de que ao se chavear entre eles o sistema resultante continuará estável (LAGES, 2007).

Na Figura 1 pode-se observar o diagrama de blocos onde o controle adaptativo por escalonamento do ganho é representado.

**Figura 1: Diagrama de blocos de um controle adaptativo por escalonamento do ganho**



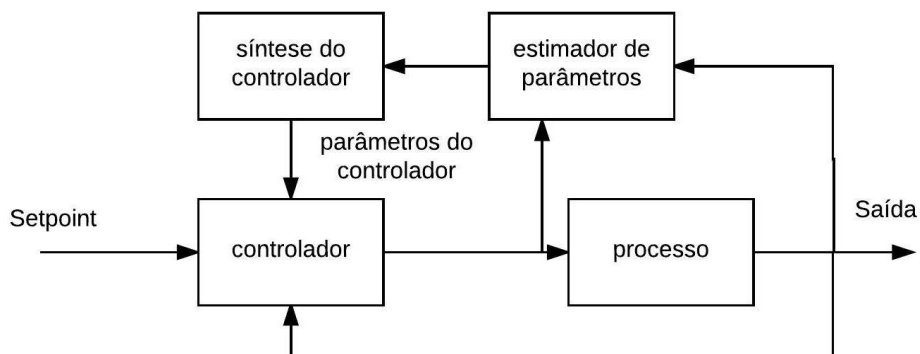
Fonte: adaptado de MATAS (2012).

### 2.1.2 Controle Adaptativo por *Self-tuning*

Nesse tipo de sistema podem ser utilizadas diversas estruturas para a definição dos estimadores dos parâmetros, como: Mínimos quadrados, mínimos quadrados estendido e generalizado e filtro estendido de Kalman (KALMAN, 1958).

Esse controlador possui a habilidade de ajustar seus próprios parâmetros. É formado por uma malha interna contendo um controlador convencional, e uma malha externa com um identificador e a síntese do controlador, como uma etapa de projeto. A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos de um controle adaptativo por *Self-tuning* (ASSIS, 1996).

**Figura 2: Diagrama de blocos de um controle adaptativo por *Self-tuning***



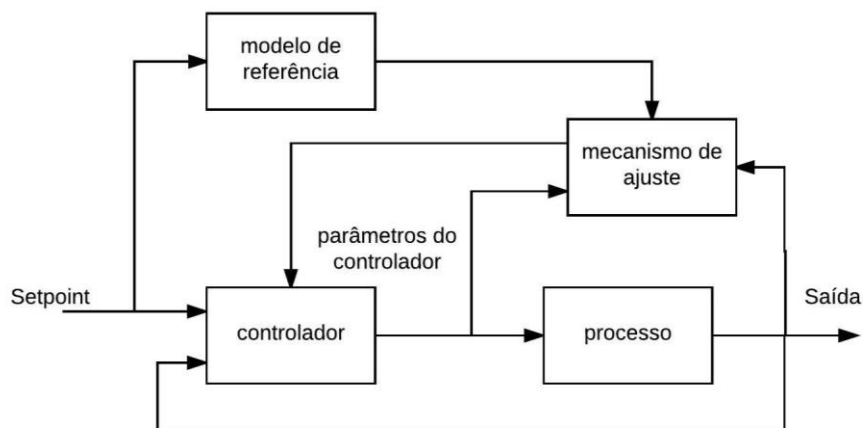
Fonte: adaptado de MATAS (2012).

O estimador de parâmetros faz a verificação das mudanças que ocorrem em tempo real na planta e projeta os parâmetros através da função de transferência, e a síntese do controlador atualiza o controlador com os novos valores (MATAS, 2012).

### 2.1.3 Controle Adaptativo por Modelo de Referência

Esse tipo de controle, também conhecido como MRAS (*Model-reference adaptive system*) é um tipo de controle adaptativo no qual a performance desejada é expressa em termos do modelo de referência, que fornece a resposta esperada referente a um determinado sinal de comando. A Figura 3 representa um diagrama de blocos desse sistema, onde há uma malha por realimentação comum composta por um processo e um controlador, e outra malha externa que altera os parâmetros do controlador. Para alterar esses parâmetros, toma-se como base a diferença (erro) entre a saída do sistema e a saída do modelo de referência (ASTRÖM; WITTENMARK, 2008).

**Figura 3: Diagrama de blocos de um controle adaptativo por Modelo de referência**



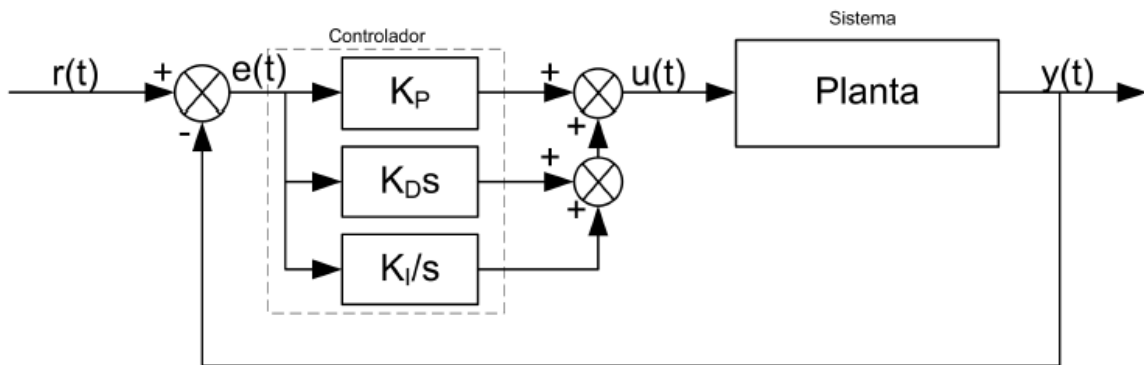
Fonte: adaptado de MATAS (2012).

## 2.2 Controlador PID

O controlador PID (Controlador Proporcional Integrador Derivativo) é a técnica de controle mais utilizada na indústria, principalmente por apresentar uma ótima performance e respostas satisfatórias em muitos processos. Isso se deve por esse

controlador combinar as vantagens da ação do controle proporcional, integral e derivativa (MATAS, 2012). A Figura 4 mostra a topologia do controlador PID em paralelo.

**Figura 4: Controlador PID com topologia em paralelo**



**Fonte: SILVA (2011).**

Nesse diagrama, o sinal de entrada é representado por  $r(t)$ , o sinal de controle é o  $u(t)$  e o sinal de saída é  $y(t)$ . Os parâmetros do controlador serão ajustados para fazer com que o valor de saída do sistema se aproxime do *setpoint* da entrada. Assim, a diferença entre o valor de saída e o de entrada irá gerar um sinal de erro  $e(t)$ , e é sobre esse sinal que o controlador irá atuar. O controlador irá gerar um sinal de controle  $u(t)$  que vai agir sobre o sistema.  $K_p$  é o ganho proporcional,  $K_i$  o integral e  $K_d$  o derivativo.

O ganho integral é representado pela equação (1), onde  $T_i$  é o tempo integrativo:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (1)$$

Do mesmo modo, o ganho derivativo é dado pela equação (2), onde  $T_d$  é o tempo derivativo:

$$K_d = K_p \times T_d \quad (2)$$



Esses três controladores podem ter configuração para atuar de forma individual, como é o caso do controlador Proporcional, ou em conjunto, como o PI (Controlador Proporcional Integrador) e PD (Controlador Proporcional Derivativo), e também, como já mencionado, para a formação do PID com a junção dos três.

### 2.2.1 Controlador Proporcional

Para esse controlador, pode-se definir a relação entre o sinal de saída do controlador  $u(t)$  e o sinal de erro atuante  $e(t)$  como sendo (OGATA,2000):

$$u(t) = K_P e(t) \rightarrow \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \quad (3)$$

A vantagem desse controlador é sua simplicidade. Seu uso irá acelerar a resposta, e o aumento do ganho proporcional tende a diminuir os erros em regime permanente, porém, esse aumento deve ser controlado, pois se ocorrer em excesso pode trazer instabilidade para o sistema (SILVA, 2011).

### 2.2.2 Controlador Proporcional-Integral

Nesse tipo de controlador a ação de controle é definida por (OGATA, 2000):

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_i} \int_0^t e(t) d(t) \rightarrow \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4)$$

No controlador, os parâmetros de ajuste são  $K_P$  e  $T_i$ , onde  $T_i$  é o tempo para que a saída do integrador atinja o valor  $K_P$  para uma entrada unitária. Nesse caso, a ação de controle vai ser proporcional tanto ao erro quanto à integral do erro. O efeito da ação integrativa nesse controlador é de complementar a ação proporcional, permitindo que o valor de saída permaneça no *setpoint* com um erro nulo, sem que ocorra problema de instabilidade.

### 2.2.3 Controlador Proporcional-Derivativo

A ação desse controlador é definida pela equação (5):

$$u(t) = K_P e(t) + K_P T_d \frac{de(t)}{dt} \rightarrow \frac{U(s)}{E(s)} = K_P (1 + T_d s) \quad (5)$$

O tempo derivativo  $T_d$  é o intervalo de tempo pelo qual a ação derivativa avança o efeito da ação proporcional (OGATA, 2000). Esse controle atua mediante a taxa de variação do erro. Irá ocorrer a melhora do amortecimento, a redução do máximo sobre-sinal, e diminuição do tempo de assentamento, mas não ocorrerá uma melhora do erro.

### 2.2.4 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo

É a combinação dos três controladores apresentados, possuindo as vantagens de cada uma das três ações de controle. A equação da ação combinada desse controlador é dada pela equação (6):

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_P T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (7)$$

Ao combinar os efeitos dos controladores, o controlador PID irá proporcionar uma maior precisão, já que a ação integral anula o erro do sistema e o efeito desestabilizador dessa ação será regulada pela ação derivativa, que irá melhorar a estabilidade (OGATA, 2000).

## 2.3 Lógica *Fuzzy*

Lógica *Fuzzy* pode ser definido como um arranjo de métodos que utilizam o conceito de conjunto e operações difusas para obter uma modelagem realista e flexível do sistema (ZADEH, 1987). Os sistemas que utilizam essa lógica, suportam raciocínios aproximados ao invés de exatos e tentam emular a forma com que o cérebro trata as informações.

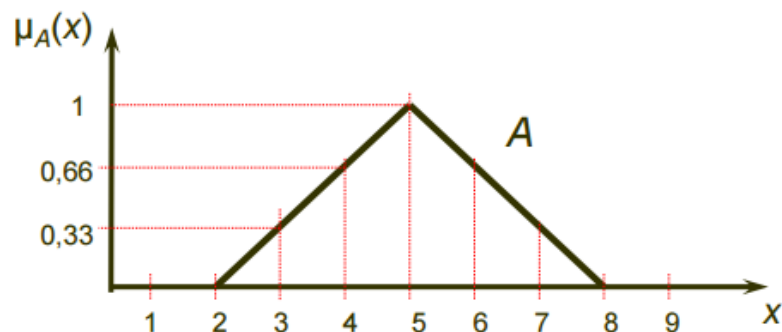
Diferente da Lógica Booleana que admite apenas valores booleanos, ou seja, verdadeiro ou falso, a lógica difusa ou *Fuzzy*, trata de valores que variam entre 0 e 1, onde 0 é totalmente falso e 1 é totalmente verdadeiro. Assim, uma pertinência de 0.5 pode representar meia verdade, logo 0.9 e 0.1, representam quase verdade e quase falso, respectivamente. Desse modo, um determinado elemento pode pertencer à duas classes parcialmente (SILVA, 2005).

O princípio da Incompatibilidade de Zadeh afirma que à medida que a complexidade de um sistema aumenta, a habilidade para se fazer afirmações precisas e que sejam significativas, diminui (SIMÕES; SHAW, 2007), com isso, surge a idéia da função de pertinência, que irá afirmar o quanto um elemento pertence a um conjunto através da associação de um ponto no conjunto  $X$  a um número real, normalmente entre o intervalo  $[0, 1]$  (ZADEH, 1987). A função de pertinência é dada pela equação (8):

$$\mu_A(x) : x \rightarrow [0, 1]; \quad \text{onde } x \in X \quad (8)$$

Na equação (8),  $\mu_A$  irá retornar o grau de pertinência do elemento  $x$  pertencente ao universo de discurso  $X$ , em relação ao conjunto *Fuzzy*  $A$  (SPATTI, 2015). Um exemplo de gráfico de uma função pertinência pode ser observado na Figura 5, onde cada termo  $\mu_A(x_i)/x_i$  fornece o grau de pertinência  $\mu_A(x_i)$  do elemento  $x_i$  em relação ao conjunto *Fuzzy*  $A$ .

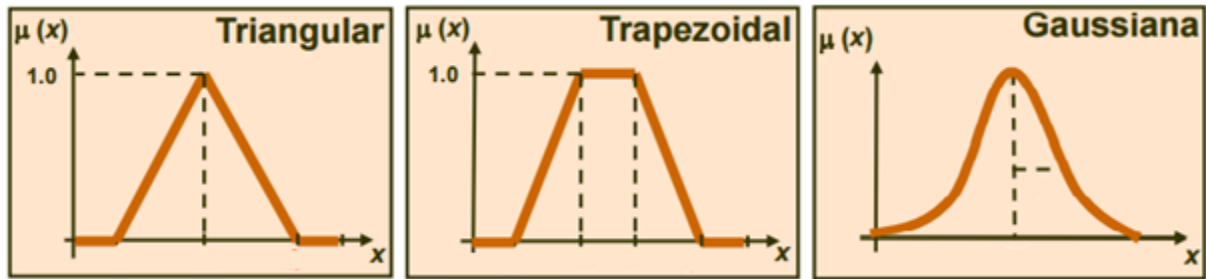
**Figura 5: Gráfico que representa uma função de pertinência**



**Fonte: SPATTI (2015).**

A função de pertinência pode ser do tipo Triangular, Trapezoidal ou Gaussiana, como pode ser observado na Figura 6.

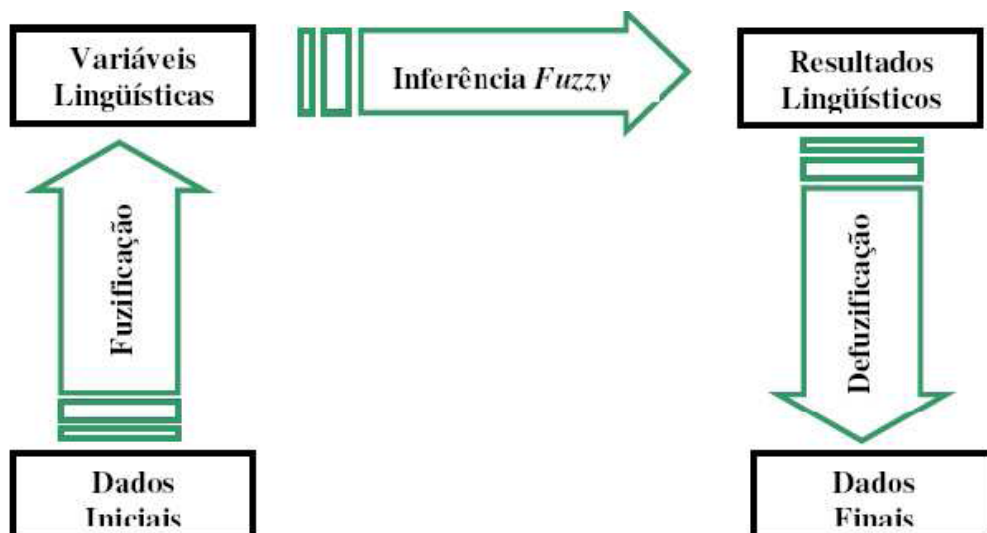
Figura 6: Funções de pertinência Triangular, Trapezoidal e Gaussiana



Fonte: SPATTI (2015).

O raciocínio presente nessa lógica é dividido em três etapas: fuzzificação, inferência e defuzzificação. Na Figura 7, pode-se observar uma representação da estrutura do sistema *Fuzzy*.

Figura 7: Estrutura do Sistema Fuzzy



Fonte: COX (1995).

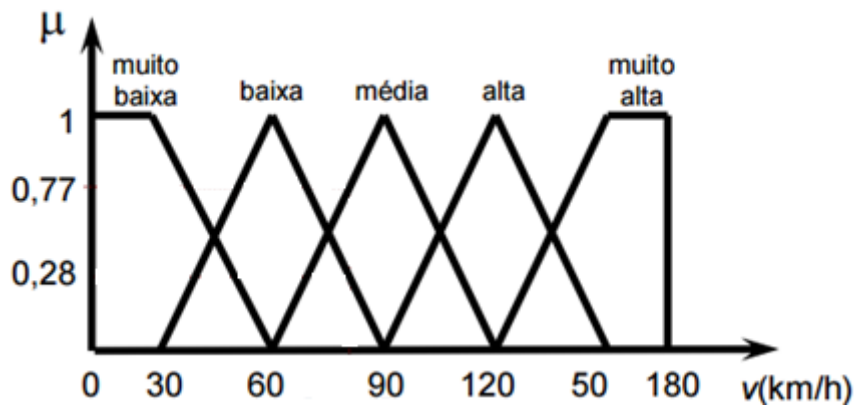
### 2.3.1 Fuzzificação

A fuzzificação é tomada como primeiro passo para obtenção do sistema lógico *Fuzzy*. Nessa etapa, são introduzidas as variáveis iniciais e é realizada uma aproximação de dados e informações sensoriais. Desse modo, não será necessário um valor exato e definido para uma variável.

Por exemplo na Figura 8, caso a variável de entrada analisada seja velocidade, o operador do processo poderá classificá-la como muito baixa, baixa,

média, alta e muito alta, o que representa os valores "fuzzificados" dos valores exatos da velocidade (SIMÕES; SHAW, 2007).

Figura 8: Representação da fuzzificação



Fonte: SPATTI (2015).

### 2.3.2 Inferência Fuzzy

Após a realização da etapa de fuzzificação, surge a necessidade de implantar "inteligência" no sistema, onde será realizada a tomada de decisão. Para essa fase é dado o nome de Inferência, que segundo VON ALTROCK (1996) pode ser dividida na Agregação, que se refere à parcela "se" (*if*) do conjunto de regras, e Composição, que representa a parcela "então" (*then*). Por exemplo:

$$\text{SE } \text{causa}_1 = A \quad \text{e } \text{causa}_2 = B \quad \text{ENTÃO } \text{efeito} = C \quad (9)$$

O método de inferência ou implicação mais utilizado na metodologia é o Mamdani, no qual, as regras *if-then* são definidas por um conjunto Fuzzy, e a saída do conjunto Fuzzy de cada regra será remodelada por um valor correspondente. Uma defuzzificação é necessária depois de agregar todos esses conjuntos remodelados (WANG, 2015).

Para que a base de regras sejam modeladas, foi proposto por Mamdani uma relação Fuzzy binária M entre as entradas  $x$  e as saídas  $\mu$ , na qual para a formação da função de pertinência em cada uma das regras da base de regras da lógica, adota-se um operador matemático mínimo para o conectivo lógico *e* e o operador

máximo para o conectivo lógico *ou*. Desse modo, as sequências *if-then* são modeladas pela aplicação do mínimo (AMENDOLA *et al*, 2004).

Como exemplo, para se obter a função de pertinência relativa à uma implicação  $R_{A \rightarrow B}$ , utiliza-se os próprios valores de pertinência associados às variáveis A e B. Desse modo, caso hajam duas variáveis linguísticas  $x$  e  $y$ , com termos tendo valores A e B, respectivamente. A função de pertinência de  $\mu_{R_{A \rightarrow B}}$  pode ser obtida por meio dos seguintes operadores:

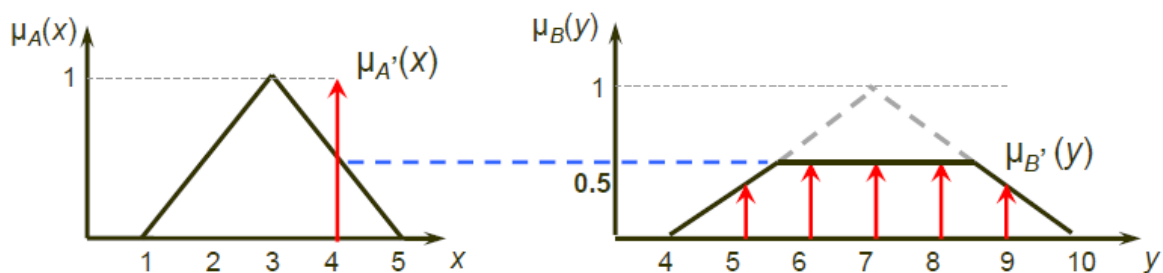
$$\mu_{R_{A \rightarrow B}}(x, y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\} \quad (10)$$

O resultado da implicação de Mamdani também pode ser alcançado e observado com uma análise geométrica, como visto na Figura 9. Pode-se dividir essa técnica para encontrar  $B'(y)$  da figura em duas etapas:

1- Para obter o valor de  $B'$ , verifica-se o grau de pertinência ativado por  $A'$  frente ao conjunto A.

2 - Em seguida, utiliza-se o resultado de  $B'(y)$  como a respectiva região Fuzzy obtida pelo corte no conjunto B frente ao valor de pertinência obtido no passo anterior (SPATTI, 2015).

**Figura 9: Análise geométrica do método de implicação de Mamdani**

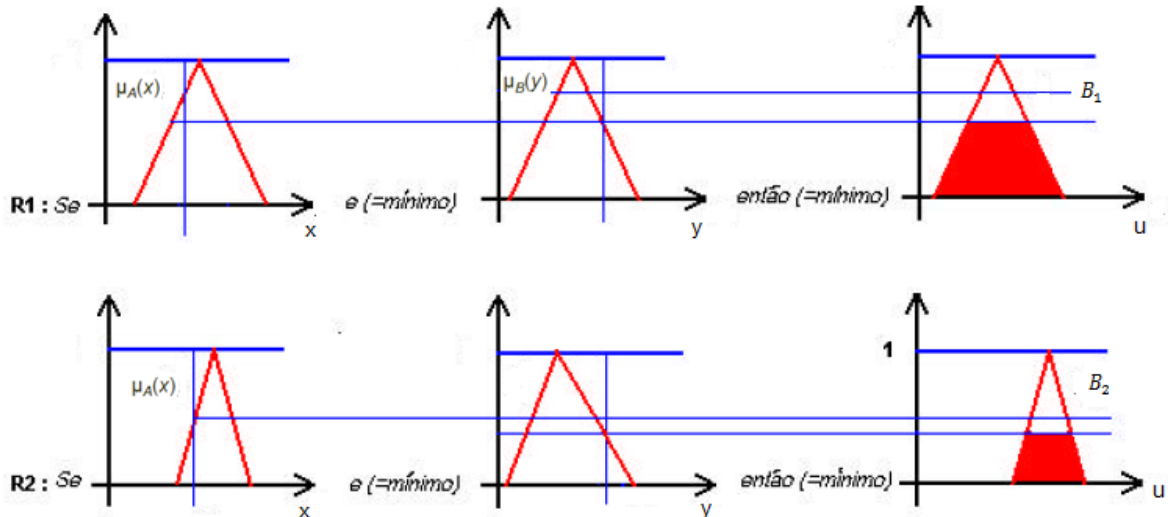


Fonte: SPATTI (2015).

Esse método representado na figura acima é realizado para cada regra da base de regras. Após isso realiza-se uma união entre as áreas encontradas em cada regra. Para exemplificar esse passo, observa-se o que ocorre na Figura 10 e 11. Na Figura 10, aplica-se o método Mamdani em duas regras denominadas R1 e R2, resultando nas áreas  $B_1$  e  $B_2$  respectivamente. Na saída do método, representada na Figura 11, ocorre a união das áreas  $B_1$  e  $B_2$  encontradas previamente para a

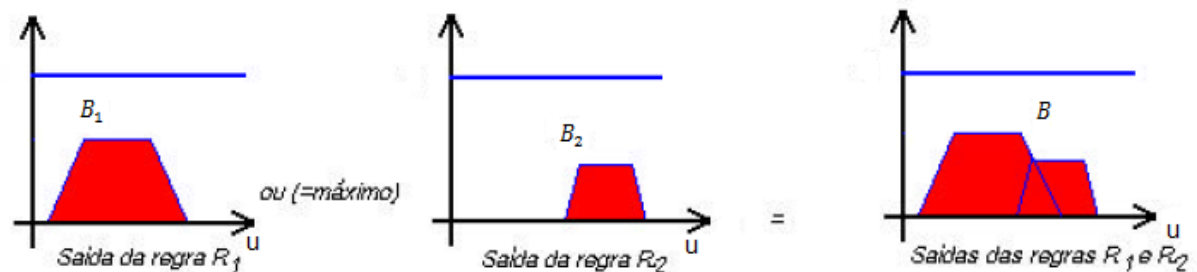
formação da área  $B$ , que apresenta a saída do método de Mamdani, onde os conjuntos foram então remodelados.

**Figura 10: Exemplificação da implicação de Mamdani na base de regras**



Fonte: Adaptado de AMENDOLA et al (2004).

**Figura 21: Representação da saída final do método de Mamdani**



Fonte: Adaptado de AMENDOLA et al (2004).

### 2.3.3 Defuzzificação

Por último, ocorre a Defuzzificação, que é basicamente a conversão do valor obtido na saída da inferência da lógica *Fuzzy* para um número real, para que os equipamentos e controles industriais possam identificar essas características incertas e obtenham o valor de referência necessário para o processo (SIMÕES; SHAW, 2007). No método de inferência de Mamdani, o método de defuzzificação mais utilizado é o de Centro de Área ou Centróide.

Nesse método, o centróide da área composta que representa o termo de saída *Fuzzy*  $\mu_{OUT}$  é calculado. Esse termo é composto pela união de todas as contribuições da regra e o centróide é o ponto que irá dividir essa área em duas partes iguais (SIMÕES; SHAW, 2007).

No caso do exemplo anterior na Figura 11, a saída  $\mu_{OUT}$  se refere à área *B* encontrada. Para calcular o centróide da área matematicamente, utiliza-se a equação (11):

$$u = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_{OUT}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{OUT}(u_i)} \quad (11)$$

Nessa equação,  $\mu_{OUT}(u_i)$  é a área de uma função de pertinência (como por exemplo as funções baixa ou alta na Figura 8) modificada pelo resultado da inferência *Fuzzy*, e  $u_i$  é a posição do centróide da função de pertinência individual - baixa ou alta respectivamente. Essa equação calcula o centróide composto, para o qual contribuem as duas funções de pertinência indicadas (SIMÕES; SHAW, 2007).

A vantagem de trabalhar com essa lógica, é que não se necessita de uma modelagem matemática, e sim, o conhecimento experimental de especialistas que já sabem quais ações devem ser tomadas frente a certas condições (SIMÕES; SHAW, 2007).



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção, é apresentada uma descrição da Planta Industrial e os processos nela envolvidos, a metodologia necessária para a construção do controle *Fuzzy* através da toolbox do Matlab, assim como a obtenção dos parâmetros do controlador PID. Também é descrito o processo de aquisição dos dados necessários para a validação do trabalho.

#### 3.1 Planta Industrial

No presente trabalho, toda a análise e proposta foram baseadas na Planta didática da SMAR, que emula processos industriais de forma didática, possibilitando a verificação do funcionamento de malhas de controle implementadas em plantas industriais. São utilizados equipamentos e ferramentas iguais aos presentes nas aplicações reais dos processos automatizados na indústria.

Esta Planta foi adquirida em 2009 pela UTFPR, Câmpus Cornélio Procópio, com recursos disponibilizados pelo REUNI (Programa de Reestruturação e Expansão das Universidades Federais) e se encontra no Laboratório de Instrumentação e Processamento de Sinais da Universidade.

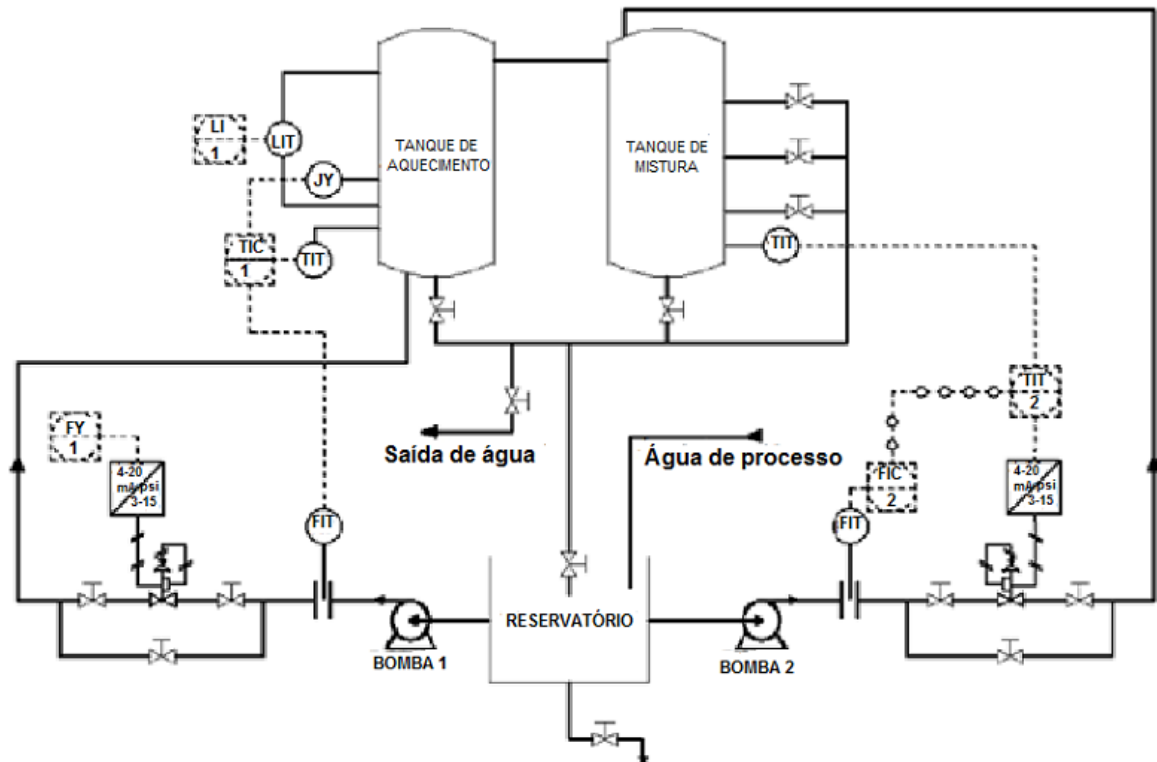
**Figura 32: Planta didática Industrial SMAR presente na UTFPR**



Fonte: SILVA (2011).

Essa Planta representa dois processos industriais, sendo um de aquecimento e outro de mistura. A Figura 13 apresenta o diagrama de tubulação e instrumentação da Planta.

Figura 43: Diagrama de tubulação e instrumentação da Planta didática



Fonte: SILVA (2011).

Tabela 1: Siglas de instrumentação presentes na Planta

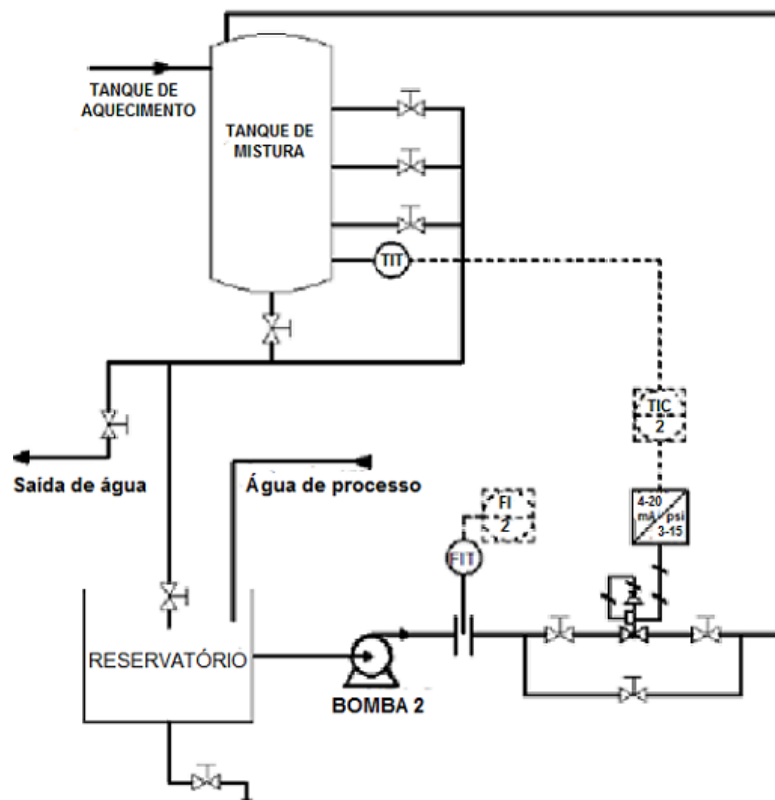
Sigla	Instrumento
LI	Indicador de nível
LIT	Transmissor indicador de nível
JY	Conversor de potência
TIT	Transmissor indicador de temperatura
TIC	Controlador indicador de temperatura
FY	Conversor de vazão
FIT	Transmissor indicador de vazão
FIC	Controlador indicador de vazão

Fonte: SILVA (2011).

No processo de aquecimento ocorre a medição da vazão de entrada de água fria, desse modo, o controlador envia mais ou menos potência para aquecer as resistências presentes no tanque de aquecimento, mantendo a temperatura no *setpoint* desejado. Nesse sistema observa-se a ação de um controlador por antecipação e por realimentação e com isso, é permitida a atuação do controle em variações da vazão de água fria (abertura e fechamento da válvula) e variação de temperatura do tanque de aquecimento. A ação do controlador se dá por uma relação entre a demanda de entrada da água fria e a temperatura que é medida no tanque de aquecimento.

Nesse trabalho é utilizado o processo de mistura da Planta didática. Nesse processo, a água quente fornecida pelo tanque de aquecimento é misturada com água fria do reservatório. O controle mantém a temperatura no tanque de mistura, fazendo a correção frente às variações da temperatura da água. A saída do controle de temperatura do tanque de mistura servirá de *setpoint* para a malha de vazão de água fria, e quando for verificada uma temperatura diferente da esperada, irá ocorrer a ação da válvula de água fria, aumentando ou diminuindo sua vazão.

Figura 54: Diagrama de tubulação e instrumentação do processo de mistura da Planta didática



A Planta didática Industrial da SMAR possui como sistema de supervisão o ProcessView integrado ao SYSTEM302. Esse sistema é responsável por efetuar a aquisição de dados dos equipamentos e mostrar as informações presentes na malha de controle, utilizando o protocolo de comunicação Profibus-PA. A utilização do software Matlab como cliente OPC permite a coleta de dados do processo através de uma interface de aquisição de dados.

### 3.2 Controlador PID *Fuzzy* Adaptativo

No processo de mistura da Planta Industrial ocorre uma grande oscilação dos valores da temperatura da água quente proveniente do tanque de aquecimento, que ao entrar no tanque de mistura, pode causar um distúrbio na curva de resposta do sistema. A solução para isso seria o ajuste contínuo dos parâmetros dos controladores.

Como os processos industriais prezam pela autonomia, surge a necessidade de um controle que identifique essas mudanças e se auto-adapte para o processo. Um método mais adequado para a resolução do problema em questão seria o controle adaptativo, que identifica a resposta do sistema, compara com a resposta desejada e após isso, realiza a regulação para a obtenção dessa resposta. Na medida em que os dados disponíveis para identificação aumentam, os parâmetros do controlador são ajustados durante a operação da planta. O controle possui duas malhas de realimentação, sendo elas a malha de controle convencional e a malha de adaptação, que monitora o desempenho e ajusta os parâmetros do controlador de acordo com o ponto de operação desejado.

Para integrar o controle adaptativo foi escolhido o controlador PID, que combina a ação proporcional, integral e derivativa que resulta em um sistema que anula o erro e que melhora a estabilidade. Foi determinado para a sintonia de controladores a lógica *Fuzzy*, que oferece a modelagem do sistema mais próxima do raciocínio humano. Essa lógica é baseada na intuição e experiência sobre a planta a ser controlada e é composta por um conjunto de regras que descrevem o comportamento desejado do controlador na seguinte forma:

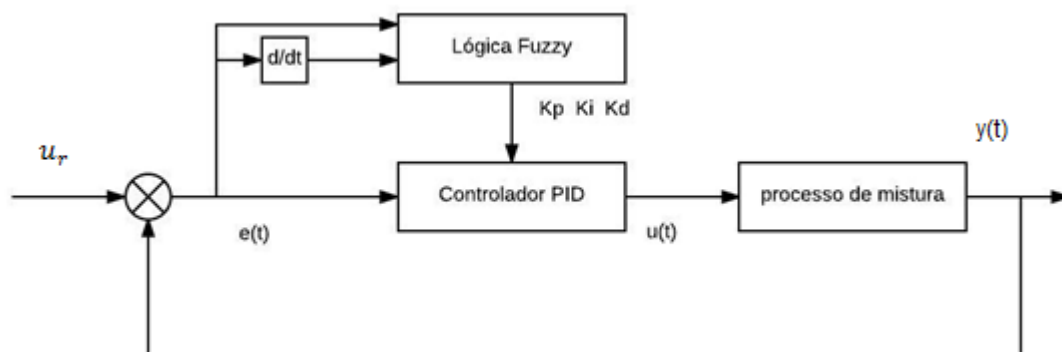
$$\text{Se } < \textit{condição} > \text{ Então } < \textit{conclusão} > \quad (12)$$

Baseado nas informações abordadas, o controlador PID *Fuzzy* adaptativo é uma boa alternativa para a resolução do comportamento do tanque de mistura da planta, já que combina os benefícios do controle adaptativo, controlador PID e lógica *Fuzzy*.

Assim, foi necessário escolher qual modelo de controle adaptativo melhor se encaixava na estratégia de controle proposta. Dentre as três técnicas apresentadas, o Escalonamento do Ganho foi a considerada mais viável para a solução do problema, já que utiliza basicamente regras *Fuzzy* e raciocínio para determinar os parâmetros de controle os quais influenciam o sinal gerado pelo controlador PID.

A fim de ilustrar o controle PID *Fuzzy* por Escalonamento do Ganho implementado, o diagrama da Figura 15 representa a sua estrutura básica.

**Figura 15: Estrutura do controlador PID *Fuzzy* utilizando os valores de erro e derivada do erro da vazão como entrada para a lógica *Fuzzy*, que sintoniza os parâmetros do controlador PID, que aplica o controle no processo de mistura**



**Fonte: Autoria própria.**

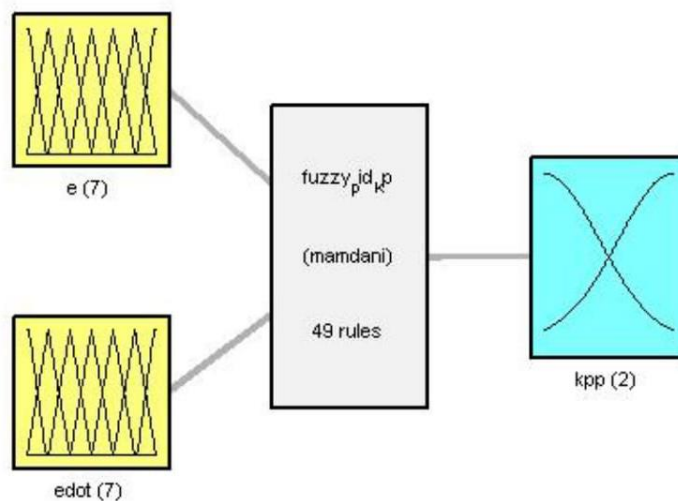
No tanque de mistura estão presentes dois tipos possíveis de controle: por realimentação e cascata. Como o controle em cascata utiliza dois controladores, o que dificultaria a determinação dos parâmetros, foi escolhido o controle por realimentação para o projeto. Desse modo, a variável de processo é a temperatura do tanque e a variável manipulada é a vazão de água fria. O controle PID *Fuzzy* recebe como entrada o erro  $e(t)$  entre a temperatura do tanque de mistura e o *setpoint* estabelecido, e a taxa de variação desse erro, essa última representada pela derivada de  $e(t) = de(t)/dt$ . As regras da lógica fuzzy serão criadas e as entradas passarão por uma fuzificação. De acordo com as informações coletadas na sua entrada, é aplicada a lógica e serão gerados os parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  do PID.

Esses parâmetros serão ajustados para atender suas diferentes necessidades e obter um controle satisfatório do controlador, gerando a saída  $u_t$ . Essa saída gerada pelo controlador PID é aplicada diretamente no processo de mistura, mais especificamente na abertura da válvula da malha de vazão, controlando a abertura da mesma entre 0-100%, de acordo com a quantidade de água fria requerida para o controle de temperatura do Tanque de Mistura, compensando assim, as variações de vazão observadas anteriormente.

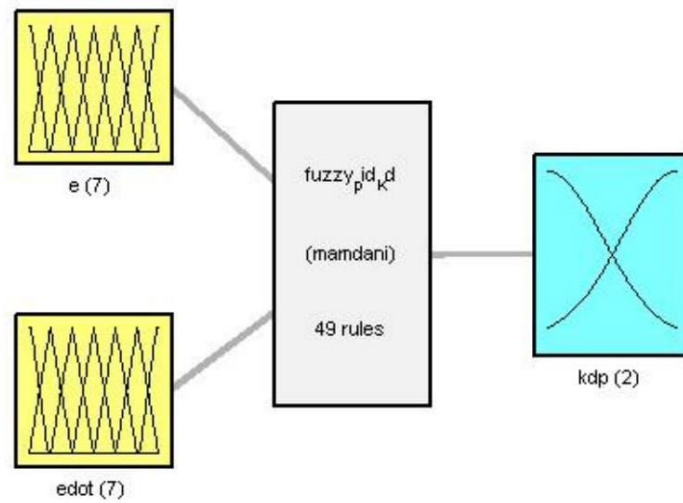
### 3.2.1 Determinação das funções de pertinência das entradas e saídas da Lógica Fuzzy

A metodologia de escalonamento de ganho utilizada para a determinação da lógica Fuzzy utilizada no trabalho foi a proposta por ZHAO *et al.* (1993), que recebe como entrada o erro  $e(t)$  e a derivada do erro  $de(t)$  e fornece como saída  $K'_p$ ,  $K'_d$  e uma constante  $alpha$ . Por questão de facilidade e simplificação da lógica Fuzzy, o sistema foi dividido em três blocos diferentes, cada um apresentando as duas entradas e somente uma saída. Esses blocos construídos na toolbox Fuzzy do Matlab podem ser observados na Figura 16 (a), (b) e (c) a seguir.

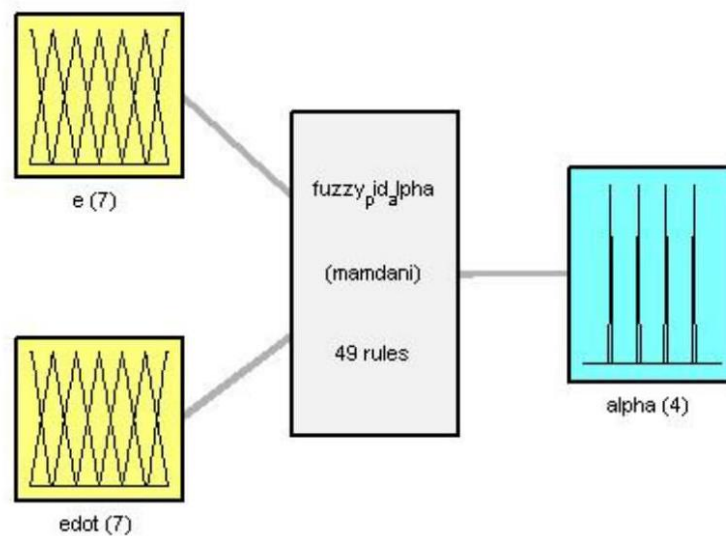
Figura 16: Estrutura do bloco de lógica Fuzzy



(a)



(b)



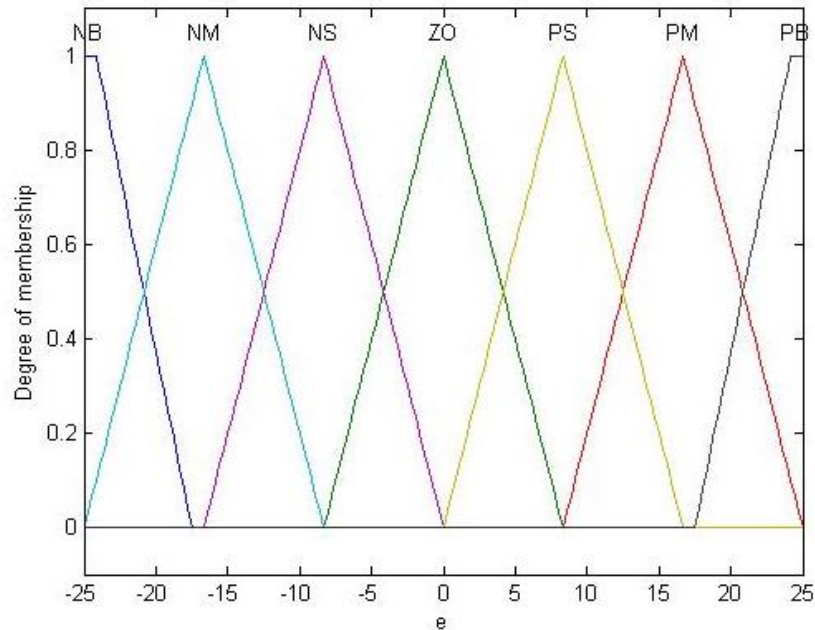
(c)

Fonte: Autoria própria.

Após diversos testes para verificação do comportamento da temperatura do Tanque de Mistura da Planta Didática, foi verificado que o range do universo de discurso adequado para a entrada  $e(t)$  seria  $[-25,25]$ . Essa entrada possui sete funções de pertinência de forma triangular e duas trapezoidais nas extremidades, que podem ser observadas na Figura 17. Essas funções estão denominadas: NB (*Negative big*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), ZO (*Approximately zero*), PS (*Positive Small*), PM (*Positive Medium*) and PB (*Positive Big*).

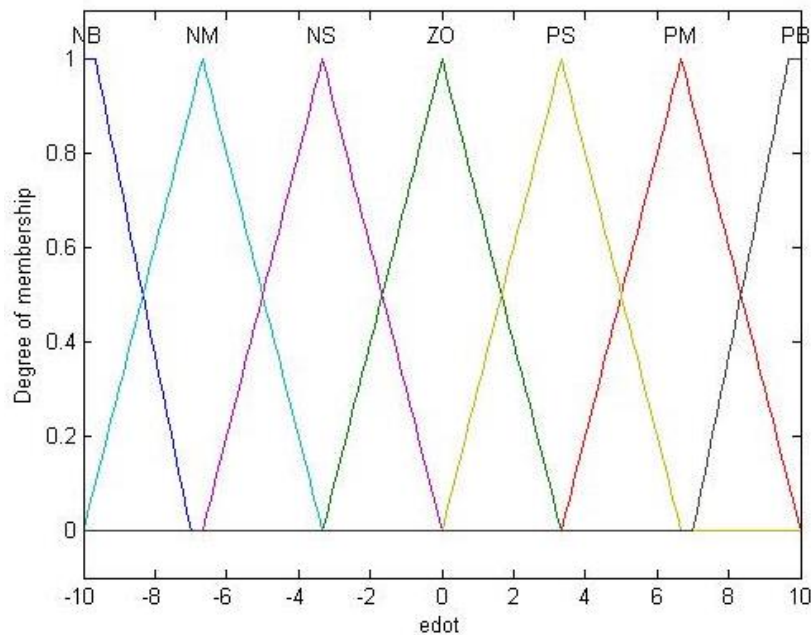
Da mesma forma, a entrada  $de(t)$  também foi determinada com sete funções de pertinência trapezoidais e triangulares, e seu range foi delimitado em  $[-10,10]$ , como mostra a Figura 18, e sua verificação foi feita de acordo com o comportamento observado na temperatura do tanque da Planta didática,

**Figura 17: Funções de pertinência da entrada  $e(t)$**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 18: Funções de pertinência da entrada  $de(t)$**



Fonte: Autoria própria.



Os ranges das saídas  $K'_p$  e  $K'_d$  foram determinados experimentalmente através de simulações e normalizados através das seguintes equações:

$$K'_p = \frac{K_p - K_{p \min}}{K_{p \max} - K_{p \min}} \quad (13)$$

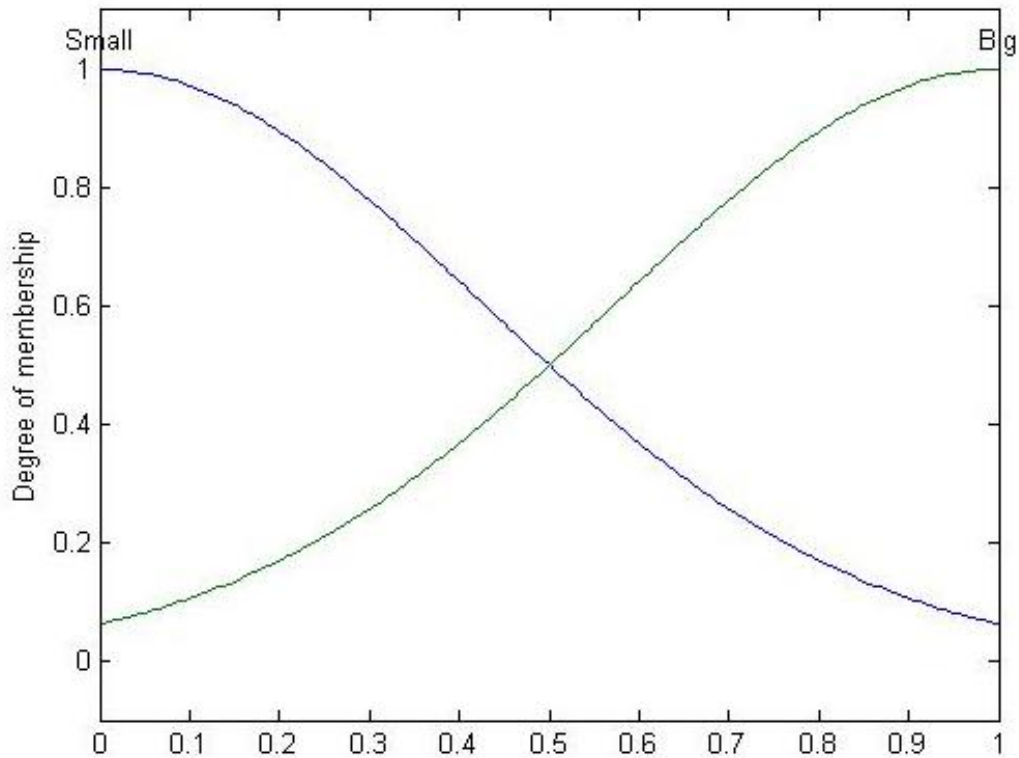
$$K'_d = \frac{K_d - K_{d \min}}{K_{d \max} - K_{d \min}} \quad (14)$$

Com essa normalização, o universo de discurso dessas duas saídas é  $[0,1]$ , e na saída do conjunto *Fuzzy*, uma conversão deverá ser feita de acordo com as particularidades do objeto a ser controlado, no caso o tanque de mistura da planta. Diferentemente das entradas, essas duas saídas do conjunto possuem duas funções de pertinência gaussianas, podendo ser S (*Small*) ou B (*Big*), como representado na Figura 19. Essas funções seguem a forma logarítmica, onde a equação (15) representa a função de pertinência *Small* e a equação (16) demonstra a função *Big*. Nas equações  $\mu$  é o grau de pertinência, e  $x$  é o valor da variável de saída  $K'_p$  e  $K'_d$ .

$$\mu_{SMALL} = -\frac{1}{4} \ln x \quad (15)$$

$$\mu_{BIG} = -\frac{1}{4} \ln(1 - x) \quad (16)$$

**Figura 196: Funções de pertinência das saídas Kp' e Kd'**



**Fonte: Autoria própria.**

A terceira saída  $\alpha$  é uma constante e está diretamente relacionada com o tempo de integração através da equação (17), onde  $T_d$  é o tempo derivativo e  $\alpha$  é o valor da saída  $\alpha$ .

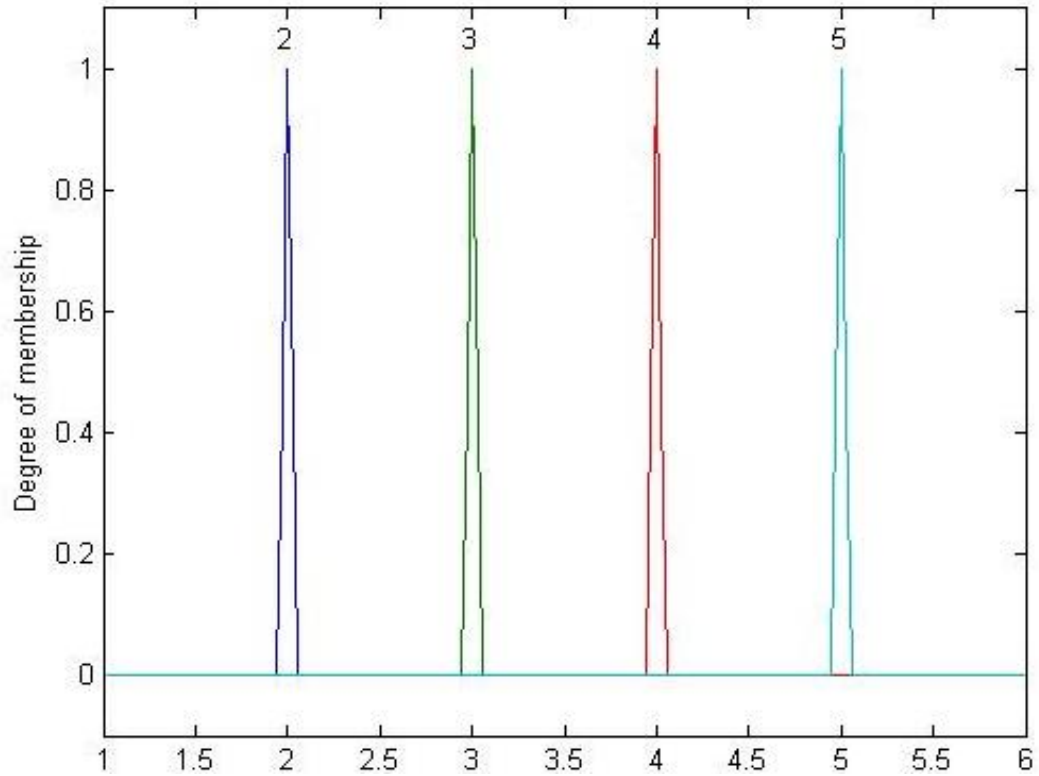
$$T_i = \alpha T_d \quad (17)$$

Para o controlador PID, utilizar um valor pequeno de  $\alpha$  ou um pequeno valor de  $T_i$ , irá resultar em uma ação integral forte. Essa determinação de se a ação deve ser forte ou fraca é feita através da comparação com o método de sintonia de PID de Ziegler-Nichols. Segundo essa regra, a constante de tempo  $T_i$  deve ser quatro vezes maior do que a constante de tempo derivativa  $T_d$  (ZHAO *et al.*, 1993).

Supondo que o valor médio de  $\alpha$  seja quatro, caso  $\alpha$  assumira um valor menor, como dois por exemplo, é gerada uma ação integral forte. Por essa linha de raciocínio, assume-se que essa saída  $\alpha$  possui 4 funções de pertinência onde  $\alpha = 2$  representa um valor pequeno,  $\alpha = 3$  um valor pequeno médio,  $\alpha = 4$  valor

médio, e  $\alpha = 5$  um valor grande para ser aplicado no tempo de integração. Essas funções podem ser observadas na Figura 20 a seguir.

**Figura 20: Funções de pertinência da saída *alpha***



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 Definição da Base de regras

De acordo com o método apresentado por ZHAO *et al.* (1993), os parâmetros  $K'_p$ ,  $K'_d$  e *alpha* são determinados por um grupo de regras que apresentam a seguinte forma:

$$\text{Se } e(k) \text{ é } A_i \text{ e } de(k) \text{ é } B_i, \text{ então } K'_p \text{ é } C_i, K'_d \text{ é } D_i \text{ e } \alpha = \alpha_i \quad (18)$$

com  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Nesse modelo,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  e  $D_i$  são os conjuntos *Fuzzy* de cada variável de entrada e saída, e  $\alpha_i$  é a constante de *alpha*. No caso apresentado,  $A_i$  e  $B_i$  podem

assumir os valores NB, NM, NS, ZO, PS, PM e PB;  $C_i$  e  $D_i$  podem ser S (*Small*) ou B (*Big*) e  $\alpha_i$  pode ter o valor 2, 3, 4 ou 5.

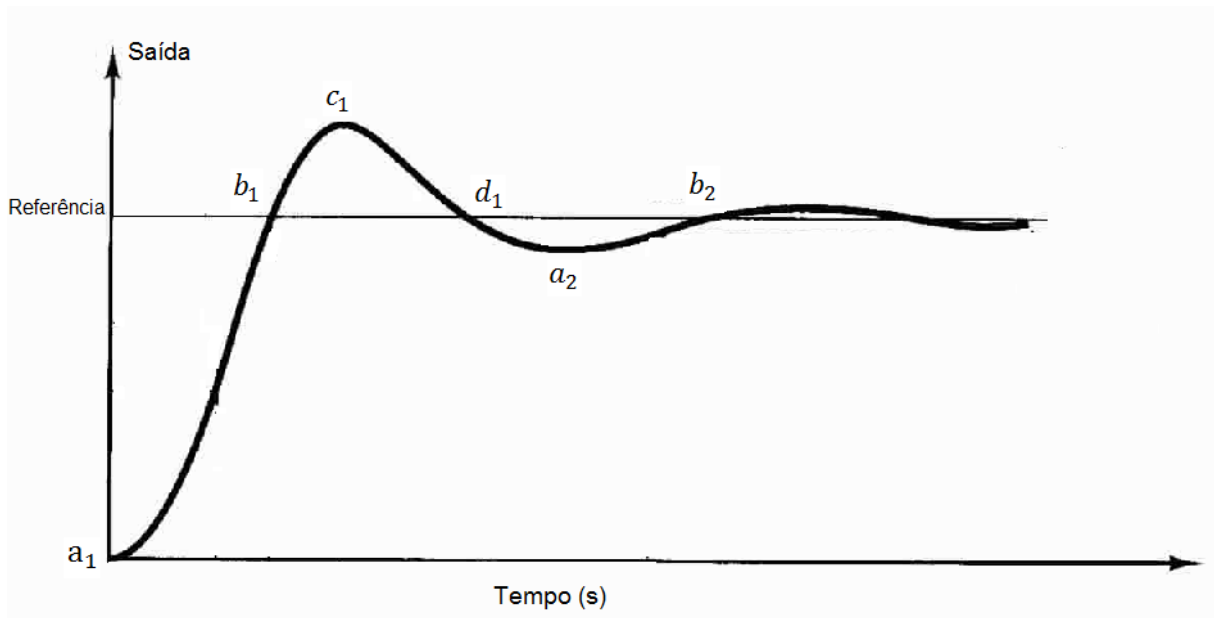
O conjunto de base de regras da lógica *Fuzzy* deve ser baseado pela experiência e observação do operador na resposta degrau do processo. Essa observação pode ser feita através da análise da Tabela 2 abaixo, que mostra a influencia direta que os parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  têm no controle do sistema.

**Tabela 2 – Influência dos parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  no controle PID.**

Parâmetro	Tempo de subida	<i>overshoot</i>	Tempo de acomodação	Erro em regime permanente
$K_p$	Diminui	Aumenta	Pequena variação	Diminui
$K_i$	Diminui	Aumenta	Aumenta	Eliminado
$K_d$	Pequena variação	Diminui	Diminui	Pequena variação

Fonte: Adaptado de BERTO *et al*, 2004.

**Figura 21: Resposta degrau desejável para um processo**



Fonte: Adaptado de ZHAO *et al.*, 1993.

A Figura 21 mostra um exemplo de uma resposta pelo tempo desejável no processo. No início, quando a resposta está próxima de  $a_1$ , é necessário um sinal de controle forte que alcance um tempo de subida rápido, e para isso, o controlador PID precisa de um ganho proporcional grande, um ganho integral grande e um ganho

derivativo pequeno. Desse modo,  $K'_p$  pode ser representado por um conjunto *Fuzzy Big*,  $K'_d$  é representado por um conjunto *Small* e  $\alpha = 2$ . Em resumo, a regra nesse ponto  $a_i$  se dá na seguinte forma (ZHAO *et al.*, 1993):

$$\text{Se } e(k) \text{ é PB e } de(k) \text{ é ZO, então } K'_p \text{ é Big, } K'_d \text{ é Small, e } \alpha = 2 \quad (19)$$

Da mesma forma, se o ponto  $b_1$  for analisado, verifica-se que é necessário um fraco sinal de controle para que um *overshoot* muito grande seja evitado. Para isso, o controlador PID necessita de um pequeno ganho proporcional, um grande ganho derivativo e um pequeno ganho integral. Então, a regra para esse ponto seria (ZHAO *et al.*, 1993):

$$\text{Se } e(k) \text{ é ZO e } de(k) \text{ é NB, então } K'_p \text{ é Small, } K'_d \text{ é Big, e } \alpha = 5 \quad (20)$$

Usando essa lógica, a base de regras do controle Fuzzy é determinada para adaptar cada fase do sistema em questão, totalizando 49 regras para cada uma das saídas. A Tabela 3 apresenta as regras para a saída  $K'_p$ . Da mesma forma, na Tabela 4 podem ser observadas as regras utilizadas para encontrar a saída  $K'_d$  e as regras para a saída referente à  $\alpha$  se encontram na Tabela 5.

**Tabela 3 – Regras de inferência Fuzzy para  $K'_p$**

		$de(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	S	S	S	S
	PS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Regras de inferência *Fuzzy* para  $K'_d$ 

		$de(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	B	B	S	S	S	B	B
	NS	B	B	B	S	B	B	B
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	S	B	B	B
	PM	B	B	S	S	S	B	B
	PB	S	S	S	S	S	S	S

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Regras de inferência *Fuzzy* para  $\alpha$ 

		$de(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	2	2	2	2	2	2	2
	NM	3	3	2	2	2	3	3
	NS	4	3	3	2	3	3	4
	ZO	5	4	3	3	3	4	5
	PS	4	3	3	2	3	3	4
	PM	3	3	2	2	2	3	3
	PB	2	2	2	2	2	2	2

Fonte: Autoria própria.

Desse modo, o valor da regra  $i$  no conjunto  $\mu_i$  descrito em sua forma na equação (18) é obtido pelo produto entre os valores respectivos das funções de pertinência das entradas, do modo observado na equação (21):

$$\mu_i = \mu_{A_i}[e(k)] \cdot \mu_{B_i}[de(k)] \quad (21)$$

Nessa equação, entende-se que  $\mu_{A_i}$  é o valor de função de pertinência do conjunto *Fuzzy*  $A_i$  referente à entrada  $e(k)$ , e  $\mu_{B_i}$  é o valor de função de pertinência do conjunto *Fuzzy*  $B_i$  que demonstra os valores da entrada  $de(k)$ .

### 3.2.3 Obtenção dos parâmetros do controlador PID

O método de inferência utilizado na lógica do controle foi o método de Mamdani com defuzzificação por centróide. Sendo assim, baseada na equação (21), os valores de  $K'_p$  e  $K'_d$  para cada regra são determinados através de sua função de pertinência correspondente. Então, pela técnica apresentada por ZHAO *et al.* (1993), tem-se que:

$$\sum_{i=1}^m \mu_i = 1 \quad (22)$$

E o processo de defuzzificação do processo fica:

$$K'_p = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{p,i} \quad (23)$$

$$K'_d = \sum_{i=1}^m \mu_i k'_{d,i} \quad (24)$$

$$alpha = \sum_{i=1}^m \mu_i \alpha_i \quad (25)$$

Nessas equações (23) a (25),  $K'_{p,i}$  é o valor correspondente para o grau  $\mu_i$  para a regra  $i$ , assim como  $k'_{d,i}$ .

Após a obtenção de  $K'_p$ ,  $K'_d$  e  $alpha$ , se faz necessário o cálculo dos parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  através das seguinte equações:

$$K_p = (K_{p \max} - K_{p \min})K'_p + K_{p \min} \quad (26)$$

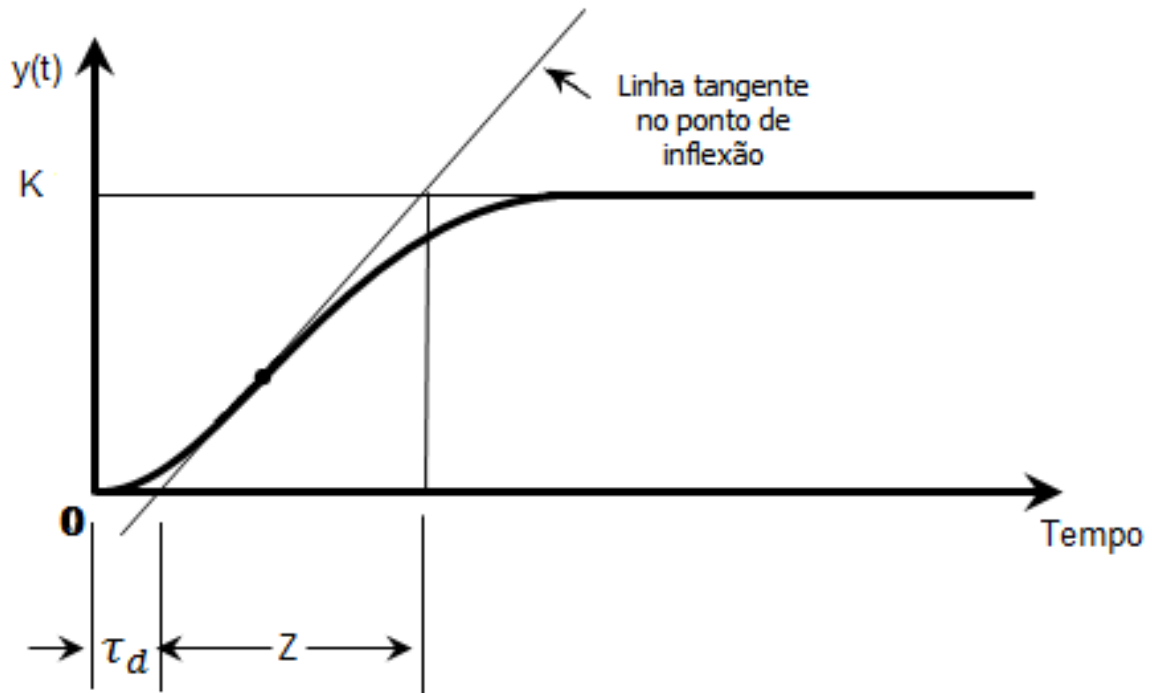
$$K_d = (K_{d \max} - K_{d \min})K'_d + K_{d \min} \quad (27)$$

$$K_i = \frac{K_p^2}{(\alpha K_d)} \quad (28)$$

Para encontrar os valores de máximos e mínimos foi utilizado o Método gráfico de Ziegler-Nichols, que consiste em aplicar uma entrada degrau no sistema em malha aberta e traçar uma reta tangente no ponto de inflexão da curva a fim de

encontrar o tempo de atraso  $\tau_d$  e uma constante de tempo  $Z$ , como está sendo representado na Figura 22 a seguir.

Figura 72: Curva típica utilizada para o Método de Ziegler-Nichols



Fonte: Adaptado de BERTO *et al*, 2004.

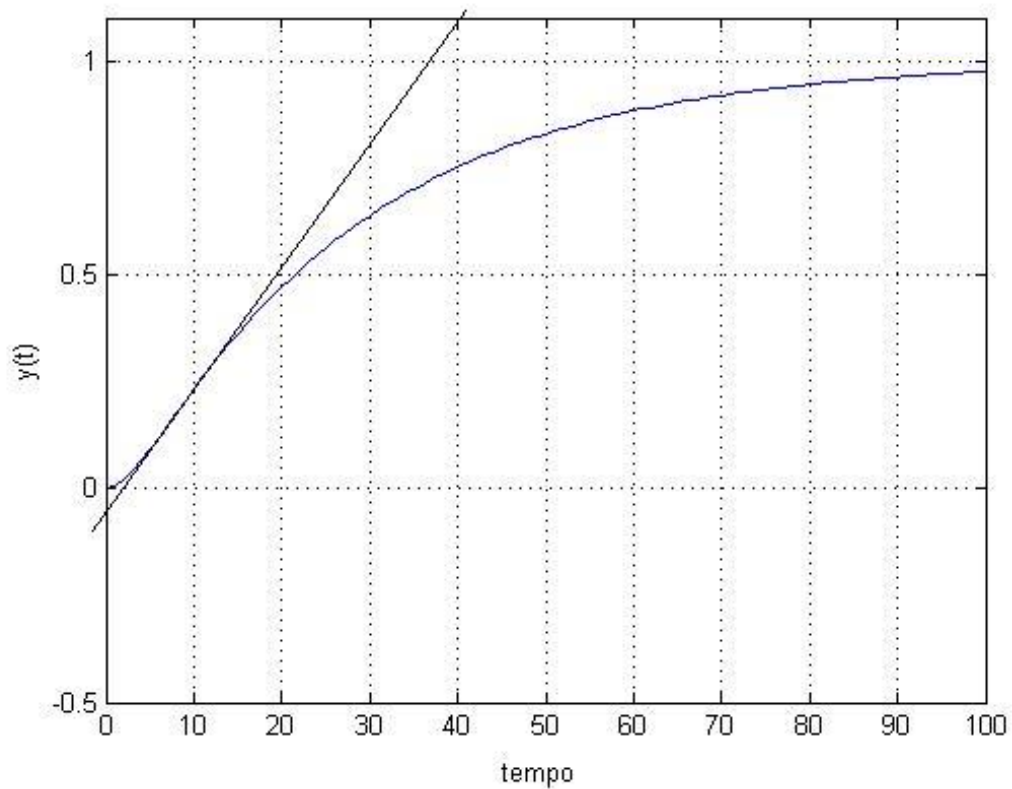
Esse método foi realizado através de simulações no *Simulink*® e a fim de reproduzir o processo do modo mais aproximado possível, foi utilizada a função de transferência da malha de mistura da Planta Industrial apresentada por SILVA (2011), que aplicou diversos métodos de identificação de sistemas para identificar os parâmetros do modelo matemático dos processos presentes na Planta. A função de transferência mencionada se encontra representada na equação (29).

$$G(s) = \frac{1}{75.87s^2 + 29.46s + 1} \quad (29)$$

A Figura 23 apresenta a resposta degrau obtida e uma reta tangente foi traçada, encontrando-se os valores  $\tau_d = 2,1889$  e  $Z = 37,8111$ .



Figura 83: resposta degrau do processo de mistura



Fonte: Autoria própria.

Esse método de ajuste apresenta relações propostas para o cálculo dos parâmetros de controle para os controladores P, PI e no caso deste projeto, para o controlador PID.

Tabela 6 – Parâmetros do PID conforme regra de ajuste de Ziegler-Nichols

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{1}{K} \frac{Z}{\tau_d}$	-	-
PI	$\frac{1}{K} 0.9 \frac{Z}{\tau_d}$	$\frac{\tau_d}{0.3}$	-
PID	$\frac{1}{K} 1.2 \frac{Z}{\tau_d}$	$2 \tau_d$	$0.5 \tau_d$

Fonte: Adaptado de BERTO *et al*, 2004.

Sabendo que  $K = 1$ , os valores encontrados para os parâmetros considerados apropriados para a sintonia do controlador PID foram:  $K_p = 19,0706$ ,  $T_i = 4,3778$  e  $T_d = 1,0945$ , onde  $K_i = 4,3569$  e  $K_d = 20,8755$ . Utilizando esses parâmetros como ponto de partida, foram realizadas diversas simulações e através delas foram determinados os seguintes valores de máximo e mínimo para  $K_p$  e  $K_d$ .

**Tabela 7 – Valores máximos e mínimos assumidos para os parâmetros do controlador**

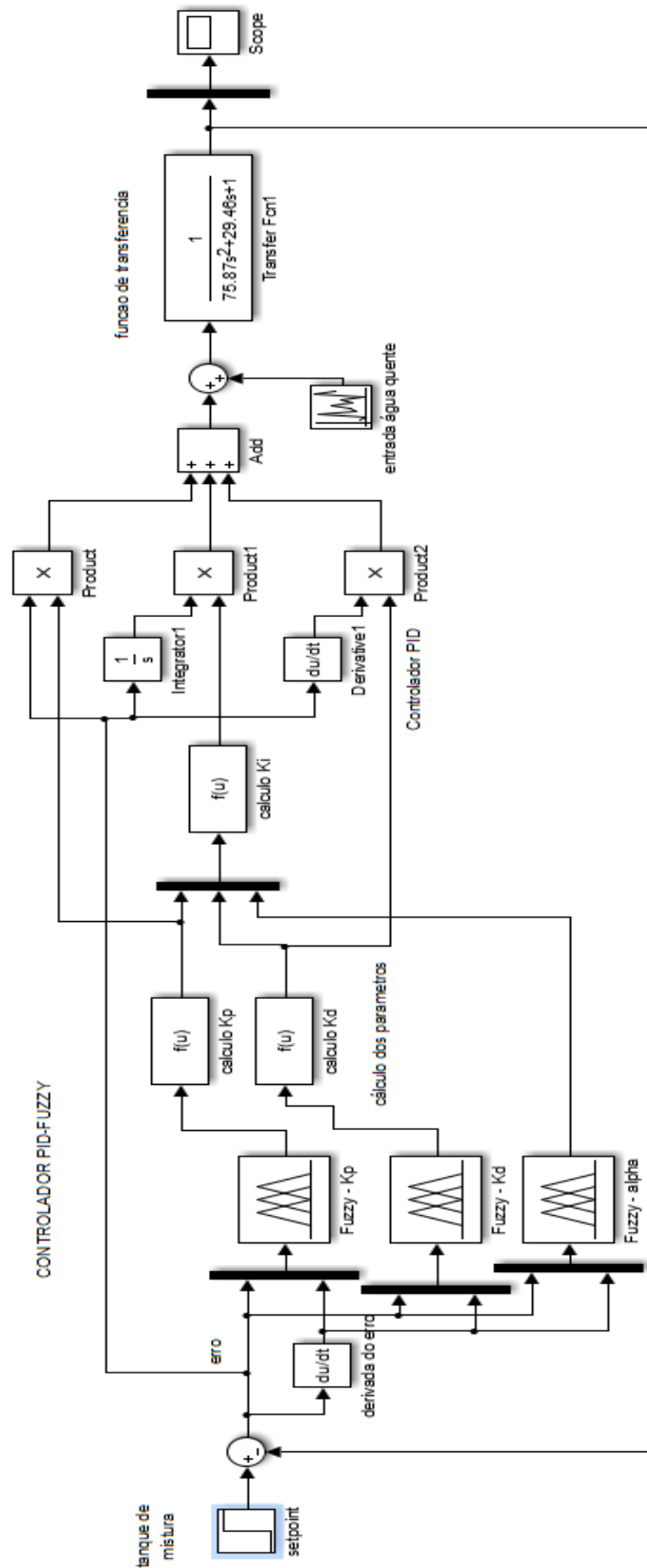
Parâmetro	Máximo	Mínimo
$K_p$	19,0740	10,1728
$K_d$	41,7510	22,2672

Fonte: Autoria própria.

### 3.3 Representação do controle PID *Fuzzy* via *Simulink*®

Primeiramente, para uma confirmação dos parâmetros iniciais escolhidos, tornou-se necessária a realização de simulações no *Simulink*®, onde o processo de mistura da Planta foi representado utilizando uma malha de controle por realimentação com a função de transferência da equação (29). O diagrama de blocos montado para o PID *Fuzzy* pode ser observado na Figura 24 a seguir.

Figura 24: Diagrama de blocos utilizado na simulação do controle PID Fuzzy



Fonte: Autoria própria.

Nessa representação, o valor de referência de temperatura para o processo do tanque de mistura é retratado através de uma entrada degrau no início do diagrama, valor no qual espera-se que o controle se estabilize, minimizando o erro. Esse erro entre a temperatura medida no tanque e o *setpoint*, e a derivada do erro servem de entrada para os três blocos de sistema *Fuzzy*, que irão fornecer as saídas  $K_p'$ ,  $K_d'$  e  $\alpha$ . Após calculados através das equações (26), (27) e (28), os parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  são aplicados na entrada de um PID clássico. A fim de representar a entrada de água quente proveniente do Tanque de Aquecimento, que basicamente causa uma "perturbação" na estabilidade do sistema, foi utilizado um bloco de variável aleatória uniforme (*Uniform Random Number*) somada à função de transferência, já que o processo de aquecimento apresenta grande variação no valor de temperatura.

Para efeito de comparação do controle projetado, também foi implementado um controle PID simples, utilizando os valores de parâmetros calculados anteriormente pelo método gráfico de Ziegler-Nichols em malha aberta na seção 3.2.3. Foram verificadas três especificações das respostas no domínio do tempo de cada controle, sendo elas: tempo de pico, máximo sobressinal (*overshoot*) e tempo de acomodação. A primeira é o tempo correspondente ao maior valor da resposta; a segunda se refere à diferença entre o valor de pico e o valor final (percentual); e a última, o tempo necessário para a resposta permanecer dentro de uma faixa de  $\pm 2\%$  do valor final. Foram simulados diversos casos de temperatura, os quais estão sendo mostrados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Valores de temperatura do Processo de Mistura simulados no *Simulink*®**

Caso	Valor de referência	Valor de temperatura	
		mínima da água quente	máxima da água quente
1	30°C	40°C	45°C
2	40°C	50°C	55°C
3	50°C	60°C	65°C

Fonte: Autoria própria.

### **3.4 Procedimentos de testes para coleta de dados da Planta Industrial**

#### **Tanque de Aquecimento**

O processo de aquecimento da Planta Industrial está sujeito à diversos fatores externos, como entrada de ar nas tubulações e troca de calor dos equipamentos, que acabam causando uma grande variação em seus valores de temperatura. Como a função desse tanque no processo de mistura é fornecer uma proporção fixa de água constante no valor estabelecido, essa variação possui uma grande influência na estabilidade da temperatura do tanque de mistura e conseqüentemente, no controle nele aplicado. O controle adaptativo projetado reconhece essa variação e adapta os parâmetros do controlador PID através da lógica *Fuzzy* a fim de melhorar a resposta do processo.

De acordo com testes realizados por CARVALHO (2016), a malha de aquecimento em malha aberta tem a sua curva de resposta obtida a partir da porcentagem de abertura da válvula de entrada de água fria. Os ajustes definidos para obter a curva de resposta referente a esse trabalho foram de 10% de abertura de entrada de água fria e o aquecimento das resistências do tanque em 100% da sua capacidade.

Para que não ocorresse desgaste ou superaquecimento dos instrumentos envolvidos no processo de aquecimento, estabeleceu-se para os testes uma temperatura de referência fixa de 42°C.

#### **Tanque de Mistura**

Os dados referentes ao processo do tanque de mistura são os primordiais para a aplicação do controle projetado neste trabalho. Porém, devido à dificuldades com a interface de comunicação utilizada na Planta didática, não foi possível a realização de testes em tempo real na mesma. A fim de validar o controle proposto, foram utilizados dados obtidos previamente em testes realizados por CARVALHO (2016), nos quais foram coletados valores referentes ao comportamento do tanque de mistura.

O procedimento para obtenção dos dados foi realizado fixando-se um determinado volume de água (nesse caso  $\frac{1}{4}$  da capacidade do tanque de mistura) e

esperou-se que a temperatura do Tanque 2 (mistura) entrasse em equilíbrio com a temperatura do Tanque 1 (aquecimento) em 42°C. O valor de *setpoint* escolhido para o tanque de mistura foi de 36°C e o controle de vazão de entrada de água do reservatório (água fria) foi selecionado em modo automático, com o objetivo de que o controle fosse o responsável por estabelecer a vazão necessária de entrada de água fria no tanque de mistura.

Segundo CARVALHO (2016) foram necessários alguns cuidados no processo de coleta de dados. Para que a temperatura da água quente que entra no Tanque 2 seja estável, deve-se manter fixa uma determinada porcentagem de abertura de entrada de água da malha de aquecimento e uma determinada porcentagem de aquecimento das resistências, como já foi mencionando na seção 3.4. Como o tanque do reservatório de água é exposto, outro fator que deve ser observado é a temperatura ambiente no dia de coleta, que foi de aproximadamente 25,36°C.

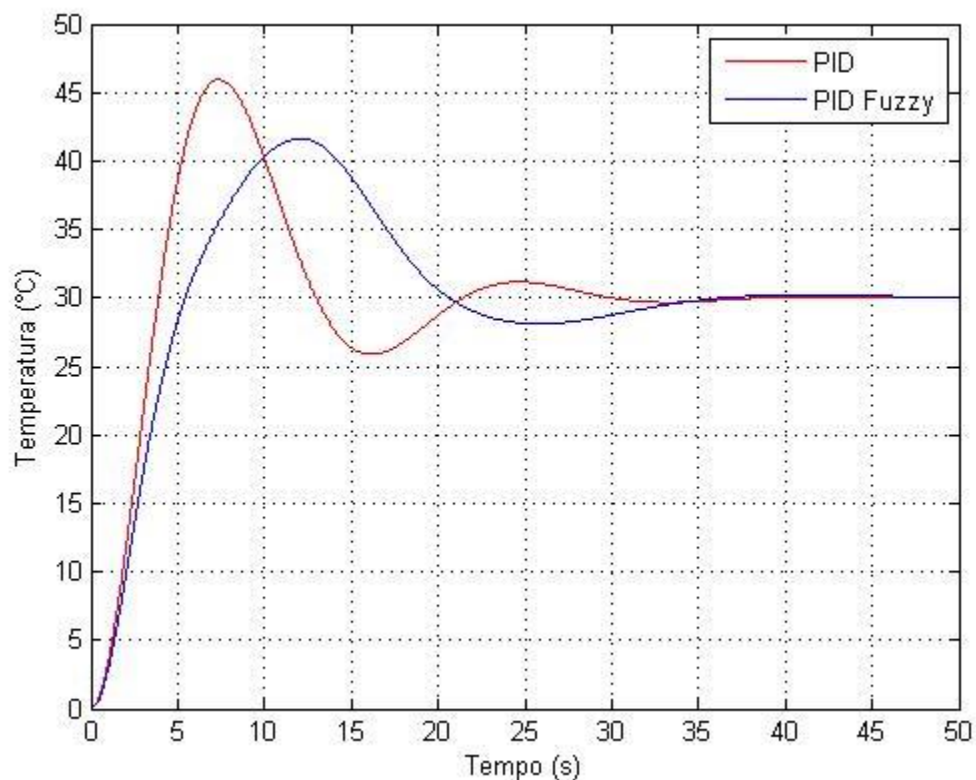
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os ambientes de coletas de dados da Planta Industrial, as curvas resposta obtidas através da simulação do controle proposto no *Simulink*® com função de transferência e com dados reais do processo de mistura.

### 4.1 Simulação com Função de transferência

Foi utilizado o diagrama e blocos do *Simulink*® apresentada na seção 3.3 para a simulação do controle PID *Fuzzy* aplicado no processo de mistura da Planta Industrial com a função de referência da equação (29) para sua representação. No primeiro caso foi estabelecida uma temperatura de *setpoint* de 30°C para o Tanque de Mistura, com a entrada de água quente variando entre 40°C e 45°C. A resposta pode ser observada na Figura 25 e os valores das especificações na Tabela 9.

**Figura 25:** Resposta temporal do controle com *setpoint* de 30°C e entrada de água quente variando entre 40°C e 45°C



Fonte: Autoria própria.

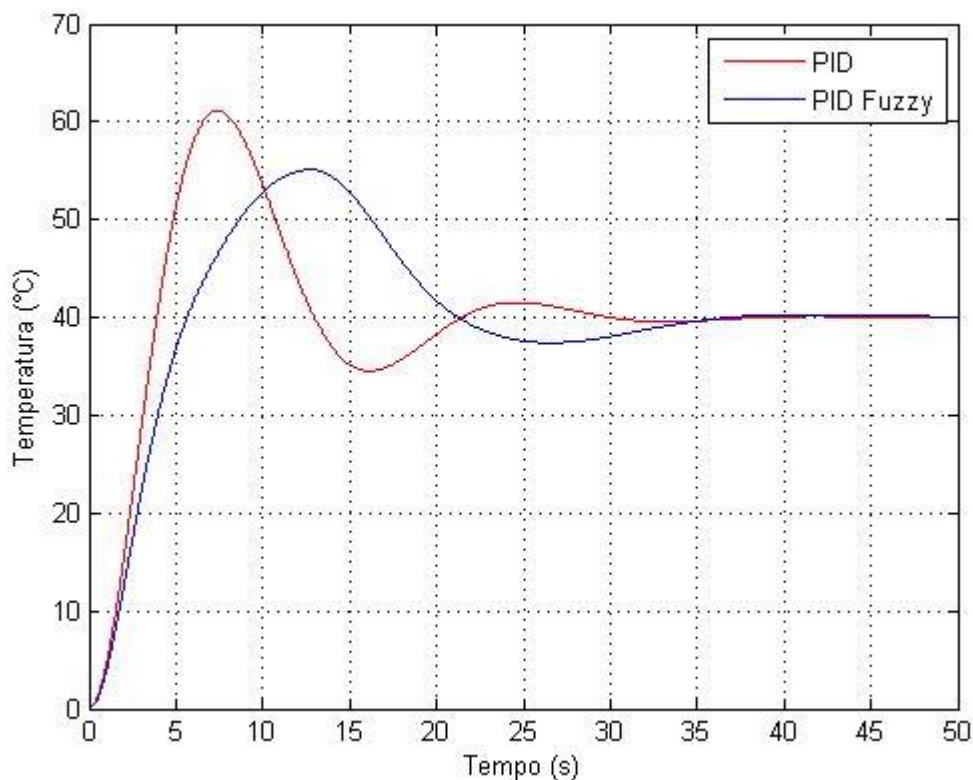
**Tabela 9 – Valores das especificações no domínio do tempo observadas na curva de resposta dos controles PID e PID *Fuzzy* para *setpoint* igual à 30°C**

Especificação	PID	PID <i>Fuzzy</i>
Tempo de pico (s)	7,3157	12,1544
Máximo Sobressinal ( <i>overshoot</i> )	52,77%	39,13%
Tempo de acomodação (s)	27,8879	32,9571

Fonte: Autoria própria.

Na segunda situação, foi considerada para o Tanque de mistura uma temperatura da *setpoint* igual à 40°C, e a entrada de água quente proveniente do Tanque de Aquecimento variando entre 50°C e 55°C. A curva de resposta mostrada na Figura 26 simula esse comportamento, assim como os valores exibidos na Tabela 10.

**Figura 26: Resposta temporal do controle com *setpoint* de 40°C e entrada de água quente variando entre 50°C e 55°C**



Fonte: Autoria própria.

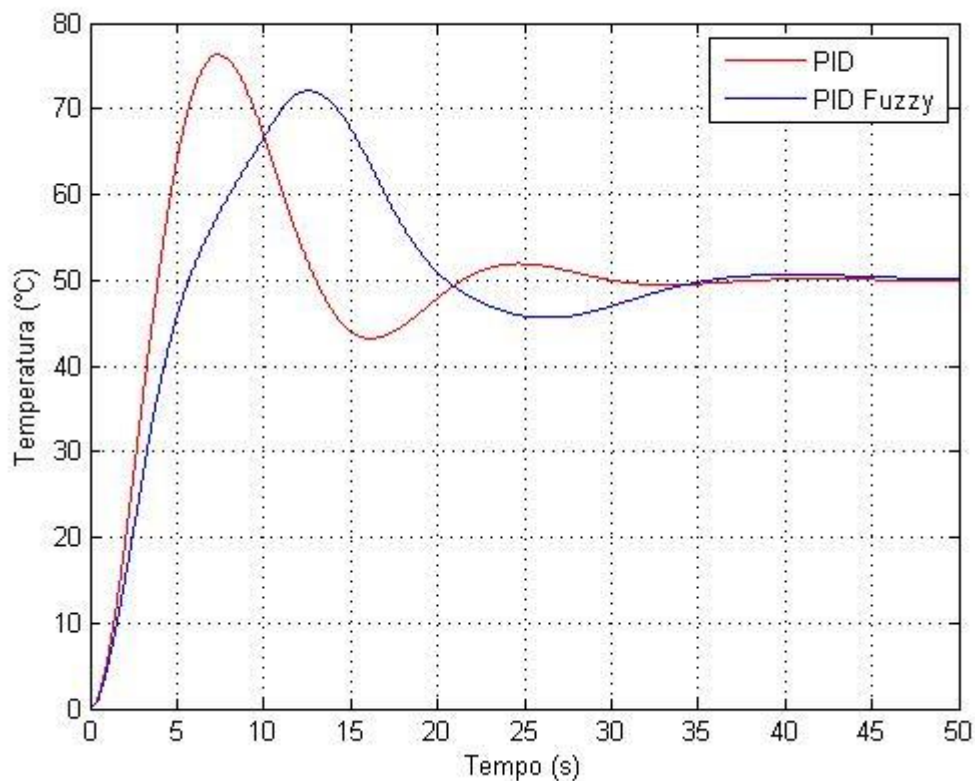


**Tabela 10 – Valores das especificações no domínio do tempo observadas na curva de resposta dos controles PID e PID *Fuzzy* para *setpoint* igual à 40°C**

Especificação	PID	PID <i>Fuzzy</i>
Tempo de pico (s)	7,4309	12,6152
Máximo Sobressinal ( <i>overshoot</i> )	52,74%	37,39%
Tempo de acomodação (s)	27,8666	33,1067

Por último, de forma análoga à realizada anteriormente, foi obtido através da simulação, a curva de resposta do sistema no domínio do tempo para uma temperatura de referência de 50°C, com uma entrada de água quente entre 60°C e 65°C. Essa curva pode ser analisada na Figura 27, e as suas especificações se encontram na Tabela 11.

**Figura 27: Resposta temporal do controle com *setpoint* de 50°C e entrada de água quente variando entre 60°C e 65°C**



**Autoria própria.**

**Tabela 11 – Valores das especificações no domínio do tempo observadas na curva de resposta dos controles PID e PID *Fuzzy* para *setpoint* igual à 50°C**

<b>Especificação</b>	<b>PID</b>	<b>PID <i>Fuzzy</i></b>
<b>Tempo de pico (s)</b>	7,2005	12,5000
<b>Máximo Sobressinal (<i>overshoot</i>)</b>	53,21%	44,32%
<b>Tempo de acomodação (s)</b>	27,8775	33,2878

Nos três casos é possível observar que o controle PID clássico se apresentou melhor em relação ao tempo de acomodação e pico, com aproximadamente 5 segundos de vantagem. Em contrapartida, a superioridade do PID *Fuzzy* se deu no máximo sobressinal, com um valor até 15% menor em relação ao controle PID. Embora tenha sido verificado um aumento do valor de *overshoot* do PID *Fuzzy* com o aumento das temperaturas envolvidas no processo de mistura, a diferença desse valor em relação ao PID clássico continua sendo consideravelmente grande.

Esse fato é digno de análise, já que o *overshoot* é visto como um indicativo de estabilidade relativa do sistema. Quanto maior seu valor, menor a estabilidade relativa, isto é, mais próximo o sistema estará de apresentar um comportamento instável. De acordo com BAYER *et al.* (2011), em aplicações de controle de posição, picos de resposta se tornam indesejáveis. Trazendo essa avaliação para o comportamento da válvula de controle da malha de vazão de água fria, responsável por injetar ou não água no tanque de mistura a fim de atingir a temperatura de *setpoint*, vê-se que um máximo sobressinal elevado prejudica seu posicionamento. Esses picos fazem com que a válvula atinja uma grande porcentagem de abertura para depois voltar para sua posição ideal no processo. Com isso, pode ocorrer um desgaste físico nas partes móveis do instrumento, já que esse comportamento se repete cada vez que o controle do sistema é iniciado.

O atraso do tempo de acomodação e de pico em relação ao PID clássico se deve provavelmente ao fato do valor máximo do parâmetro de ação derivativa ser muito elevado no projeto. Porém, sem isso o sistema não alcançaria sua estabilidade. Para efeito de comparação, considera-se alguns segundos de atraso aceitáveis para que se tenha um máximo sobressinal inferior.

## 4.2 Simulação com dados reais

Durante testes para verificar a funcionalidade do controle PID *Fuzzy* no processo de mistura em tempo real, surgiram complicações no sistema de comunicação da Planta didática gerenciada pelo *System302*, que integra todos os aplicativos disponíveis no sistema de automação industrial da Planta. Devido à essas complicações, ficou impossibilitada a configuração das entradas e saídas do sistema e o acesso ao sistema de supervisão *ProcessView* que é responsável pela aquisição de dados dos equipamentos e apresentação das informações da malha de controle. A fim de utilizar valores de temperatura que representam o comportamento real da Planta Industrial para que o controle projetado fosse de alguma forma testado em condições normais de operação do processo de mistura, dados coletados previamente por CARVALHO (2016) durante ensaio na planta foram utilizados como entrada para o PID *Fuzzy* adaptativo.

Na função de transferência apresentada por SILVA (2011) e que foi utilizada para as simulações no *Simulink*®, o processo de mistura foi identificado como um todo. Já na aplicação real, a saída do controle PID *Fuzzy* é aplicada diretamente na válvula de controle de entrada de água fria do Tanque 2, regulando sua abertura em 0 a 100%. Porém, a válvula ainda não possui modelo identificado em separado do Tanque de Mistura para eventuais simulações. Sendo assim, tornou-se necessária a adaptação dos parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  através de uma aplicação de constantes na entrada do controlador PID, que foram determinadas a partir de diversas simulações como segue:

$$K_1 = 0,7 * K_p \quad (30)$$

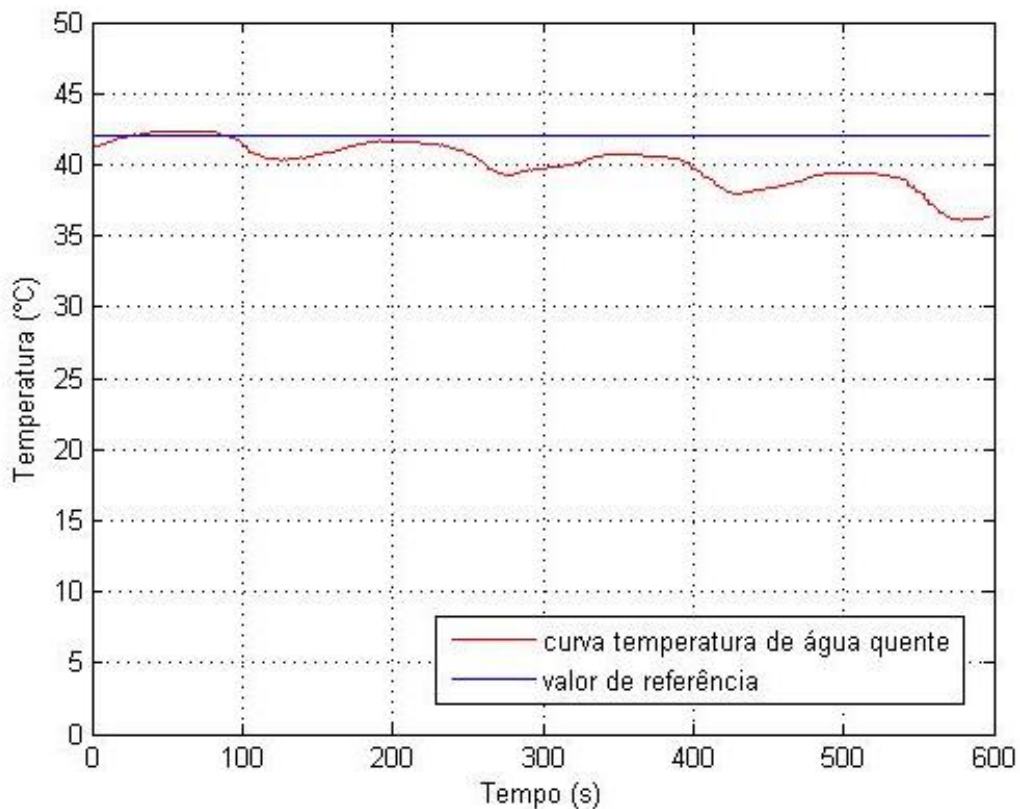
$$K_2 = 0,5 * K_i \quad (31)$$

$$K_3 = 0,01 * K_d \quad (32)$$

Para comprovar a variação de temperatura observada no Tanque de aquecimento, a Figura 28 foi plotada através dos dados de temperatura deste tanque obtidos durante o ensaio realizado por CARVALHO (2016), onde, como mencionado na seção 3.4, a função do Tanque de aquecimento no processo era fornecer uma proporção fixa de água constante no valor estabelecido de 42°C para o

Tanque de Mistura. É possível observar que mesmo com o valor fixado durante todo o teste, a temperatura da água varia entre aproximadamente 42°C e 36°C.

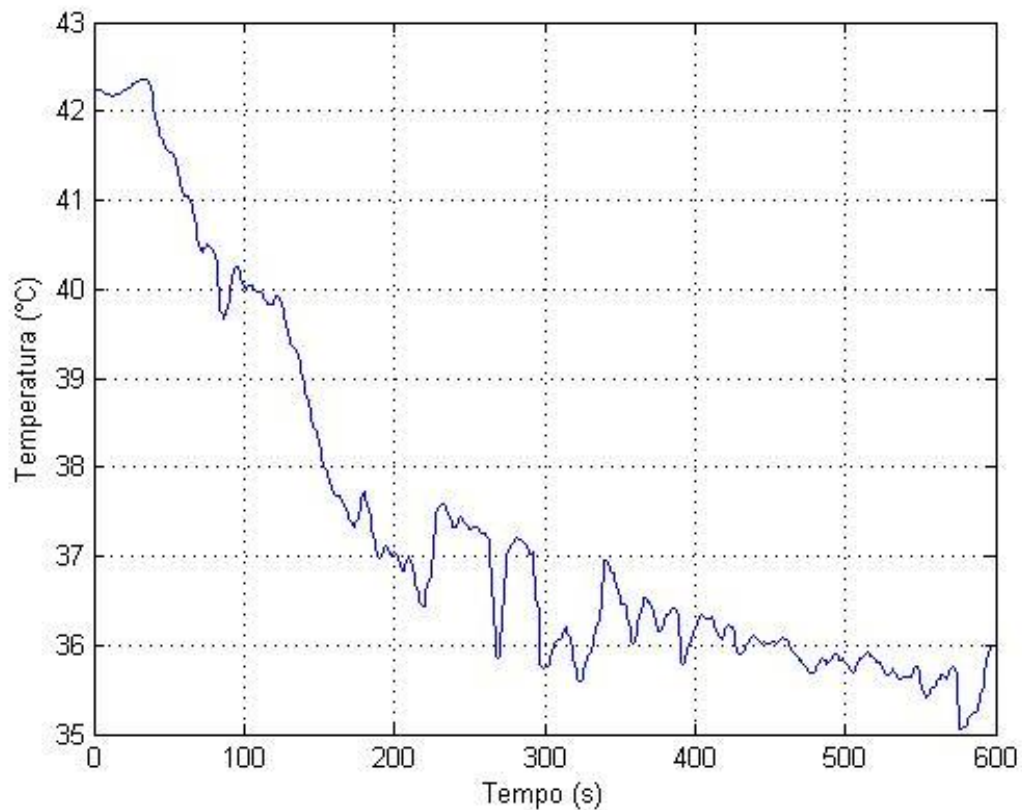
**Figura 28: Curva de temperatura de água quente obtida no teste**



**Fonte: Autoria própria.**

O objetivo do Processo de mistura no ensaio realizado por CARVALHO (2016) era de abaixar a temperatura inicial de 42°C em equilíbrio com o tanque de aquecimento, até alcançar o valor de referência de 36°C. O teste teve duração de 10 minutos, equivalente à 600 segundos. A curva de temperatura obtida no Tanque 2 durante o teste está ilustrada na Figura 29.

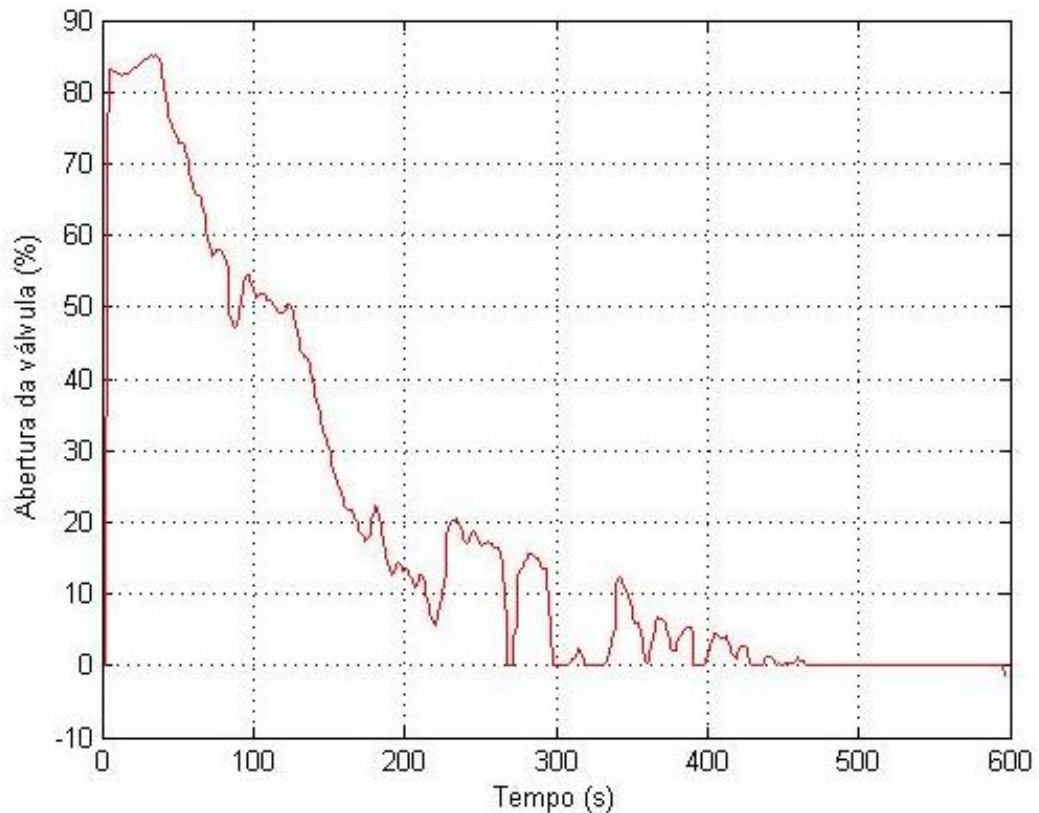
**Figura 299: Curva da temperatura do tanque de mistura obtida no teste**



**Fonte: Autoria própria.**

Com esses dados de temperatura do Tanque 2, aplicou-se o controle PID *Fuzzy*, utilizando como entrada para o controle o erro entre o *setpoint* e essa temperatura e a derivada do erro. Como não foi possível obter a curva resposta do sistema, já que durante o ensaio de CARVALHO (2016) foi utilizado um controlador PI, o que impossibilita a aplicação de um novo controle, foi observada a saída do controle, que se refere à porcentagem de abertura da válvula de água fria entre 0 e 100% adequada ao processo. Na Figura 30 observa-se a ação de controle do PID *Fuzzy*.

**Figura 30: Porcentagem de abertura da válvula de água fria enviada pela saída do controle PID Fuzzy**



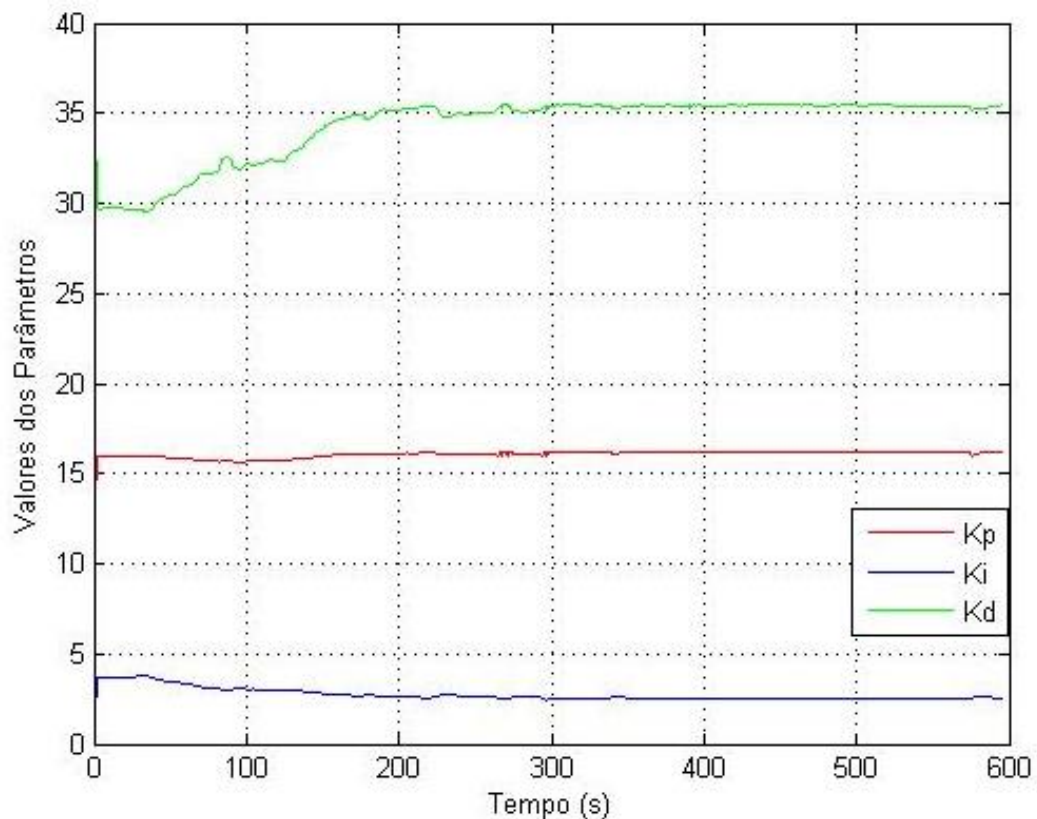
**Fonte: Autoria própria.**

Se for comparada com o comportamento da curva de temperatura medida no tanque de mistura durante o teste, apresentada na Figura 32, verifica-se que a saída está relacionada proporcionalmente com esse comportamento, apresentando uma forma de curva similar.

Nos primeiros segundos, a válvula fica completamente fechada para que os erros necessários para a ação de controle sejam calculados, e após isso, quando é necessário que a temperatura do tanque abaixe de 42°C para 36°C, sua abertura passa para aproximadamente 85%, para injetar uma grande vazão de água fria, e vai diminuindo gradativamente ao decorrer do teste com a diminuição da temperatura. Ao chegar próximo do valor de *setpoint*, a abertura da válvula passa a ser aproximadamente 5%, até atingir 0% quando a temperatura se torna estável. Sendo assim, o controle se mostrou eficaz para realizar o controle do processo de mistura, regulando corretamente a porcentagem de abertura da válvula da malha de vazão de água fria.

A Figura 31 permite verificar o ajuste dos parâmetros realizado pela lógica *Fuzzy* durante a simulação. Pode-se observar que a variação dos parâmetros ocorre de forma sutil, evitando que o controle perca bruscamente sua estabilidade. A constante proporcional  $K_p$  se mantém próxima de 16, alterando seu valor nos momentos de maior oscilação de temperatura no Tanque 2; de forma similar, a constante integrativa  $K_i$  se mantém estável entre 3 e 3,5; e a constante derivativa  $K_d$  é a que mais apresenta variação em seu valor, iniciando em 30 e aumentando gradativamente até se ajustar nas proximidades de 35. Com essas curvas, verificamos que o controle realmente realiza um ajuste nas variáveis de acordo com a resposta de ação de controle necessária e se mantém dentro dos limites máximos e mínimos estabelecidos no projeto da lógica *Fuzzy*.

**Figura 31: Valores dos parâmetros do controlador PID ajustados pela lógica Fuzzy**



**Fonte: Autoria própria.**

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um estudo sobre o processo de mistura de uma Planta Industrial em que o paradigma era a adaptação automática dos parâmetros de controle da mesma frente à distúrbios externos presentes durante seu processo. Uma influência externa sofrida no processo de mistura provém das variações de temperatura da água quente. O processo de aquecimento da Planta é responsável por fornecer água quente para o tanque de mistura, porém, esse processo está sujeito à diversos fatores externos, que acabam causando alterações em seus valores.

Fugindo dos métodos convencionais, a técnica proposta para a solução e melhora do processo, previa a implantação de um controle adaptativo por Escalonamento de ganho baseado em ZHAO (1993), fundado na lógica *Fuzzy*, a qual seria responsável por reconhecer as mudanças na resposta e identificar os parâmetros do controlador PID mais adequados para o controle, que agiria diretamente na malha de vazão de água fria.

Dados de testes realizados previamente e a função de transferência identificada anteriormente por SILVA (2011) foram utilizados como base para o projeto da lógica *Fuzzy*, como a determinação do range e funções de pertinência e construção da base de regras. A precisão dos valores de máximo e mínimo dos parâmetros se deu através do Método gráfico em malha aberta de Ziegler-Nichols, e diversas simulações foram realizadas até que fossem encontrados valores otimizados para o controle proposto.

Através da construção de um diagrama de blocos que representa de modo eficaz o processo de mistura através da utilização de função de transferência, foram realizados testes no ambiente do *Simulink*® em que o controle PID *Fuzzy* foi comparada com um controle PID convencional. Foram apresentados três casos em que as temperaturas de *setpoint* e temperatura da água quente proveniente do tanque de aquecimento foram variadas. Analisando as curvas de resposta obtidas, foi possível observar que o PID clássico ainda apresentou um tempo de acomodação e pico melhores, porém um *overshoot* consideravelmente maior do que o controle PID *Fuzzy*.

Como o máximo sobressinal está diretamente ligado com a estabilidade relativa do sistema, essa diminuição significativa, que foi proporcionada pela



aplicação do novo controle, representa uma grande melhora, já que, segundo BAYER (2011), em aplicações de controle de posição, picos de resposta se tornam indesejáveis. Portanto, para a válvula de controle da malha de vazão, um valor alto de *overshoot* causa uma grande diferença em seu posicionamento.

Testes em tempo real na Planta Industrial não foram possíveis devido à um problema de comunicação da Interface da Planta didática, que impediu a realização de coleta de dados de todos os instrumentos e processos envolvidos. A fim de validar o trabalho com resultados baseados em medidas reais dos processos, foram utilizados valores coletados em ensaio realizado por CARVALHO (2016). No ensaio, o tanque de mistura recebia água quente com temperatura de 42°C, e esperou-se que a temperatura do tanque partisse de 42°C para 36°C. A porcentagem de abertura da válvula de água fria foi deixada no automático.

Tendo como entrada o erro e variação do erro entre os valores de setpoint e os valores reais da temperatura do tanque, o controle PID *Fuzzy* foi aplicado através de simulações no Matlab, e foi possível observar a saída do controle, que se referia à abertura esperada para a válvula de controle da malha de vazão de água fria. Através da análise das curvas obtidas, foi verificado que o controle apresentava valores apropriados para a abertura da válvula, acompanhando as variações de temperatura observadas, assim como o ajuste dos parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  do controlador PID.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

A complexidade de sistemas industriais semelhantes ao da Planta Didática Industrial podem apresentar resultados inesperados. Mesmo com todos os ajustes elaborados de forma correta para uma simulação, há sempre possibilidades de testes reais não corresponderem às expectativas. Desse modo, para trabalhos futuros, faz-se necessária a aplicação desse controle em tempo real na Planta Industrial, verificando seu processo de adaptação e escolha dos parâmetros frente às variações observadas.

Para trabalhos futuros, também espera-se encontrar modelo matemático que identifique a válvula de controle em separado, e não o processo de mistura como um todo, como feito por SILVA (2011) e que foi utilizada como base para o trabalho. Assim, as simulações poderiam ser mais precisas e o controle mais otimizado para que o efeito da ação de controle atuasse diretamente na malha de vazão.

Uma análise estatística abrangente sobre todo o comportamento das variáveis envolvidas nos processos de mistura e aquecimento da Planta Industrial pode ser realizada, a fim de garantir que a lógica *Fuzzy* se torne mais precisa e otimizada. A definição do range das variáveis de entrada e saída, assim como a determinação dos limites das funções de pertinência poderiam ser melhor ajustados através de pesquisas de variância e desvio padrão nos valores de temperatura e vazão, já que no presente trabalho foi feito um estudo generalizado e os limites máximos e mínimos foram definidos a partir de sucessivas simulações.

Embora na fundamentação teórica tenham sido apresentadas três técnicas de controle adaptativo, somente o modelo por Escalonamento de ganho foi desenvolvido no trabalho. Para trabalhos futuros, sugere-se que os controles adaptativos por *Self-tuning* e por Modelo de Referência sejam implementados na Planta Industrial.

Como é conhecido, o controle em cascata apresenta vantagens em relação ao controle por realimentação, já que distúrbios podem ser corrigidos no controlador secundário antes que cheguem a influenciar a variável primária. Embora no Tanque de mistura da Planta Industrial já esteja presente um controlador secundário para controlar diretamente a malha de vazão e outro para a malha de temperatura, foi escolhido utilizar somente um controlador devido à maior simplicidade para um

projeto inicial de controle Fuzzy. Futuramente, sugere-se que o controle em cascata seja implementado na Planta.

Outra recomendação seria uma análise mais detalhada sobre o comportamento da válvula de controle, já que durante testes realizados, foi verificado um comportamento de histerese na mesma, causando variação na vazão de água fria, e conseqüentemente, na estabilidade da temperatura do tanque de mistura. Seria necessária uma análise mais completa de todo o sistema da Planta, verificando qual ou quais foram os motivos que levaram a existência das oscilações de vazão. Um controle adaptativo em que o foco fosse a verificação deste comportamento e adaptação do controlador da malha de vazão do controle em cascata, seria uma enorme contribuição para a Planta Industrial.

A ênfase do trabalho se deu exclusivamente no Tanque de Mistura, porém o controle PID Fuzzy aplicado no Tanque de Aquecimento também seria uma ótima proposta, já que o Tanque 1 apresenta grandes variações em sua temperatura e seria possível a aplicação de um controle adaptativo.

Por fim, outras estratégias de controle também podem ser implementadas a fim de continuar otimizando a Planta e seus processos envolvidos. Destaca-se, porém, a importância de observar e comparar os resultados obtidos buscando validar os valores alcançados e verificar a funcionalidade e o comportamento dos processos, visando sempre o melhor desempenho.

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. 3.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 728 p.

AMENDOLA, M.; SOUZA, Anderson L.; BARROS, L. C. **Manual de uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5**. Campinas: UNICAMP, 2004, 46 p.

ASSIS, A. J. **Projeto de Controladores Adaptativos Auto-ajustáveis**. 1996. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1996.

ÅSTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. **Adaptive Control**. 2. ed. Mineola: Dover, 2008. 574 p.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID controllers: theory, design and tuning**. 2. ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995. 343 p.

BAYER, F. M.; ARAÚJO, O. C. B.. **Controle Automático de Processos**. Santa Maria: UFSM, 2011. 92 p.

BERTO, M. I.; SÁ, F. R.; SILVEIRA, V. **Avaliação de controles PID adaptativos para um sistema de aquecimento resistivo de água**. Ciência e Tecnologia de Alimentos. v. 24, n. 3, p. 478-485, jul./set. 2004.

CALLAI, T. C.; COELHO, L. S.; COELHO, A. A. R. **Controle Nebuloso Adaptativo por Modelo de Referência: Projeto e aplicação em sistemas não-lineares**. Revista Controle & Automação. v.18, n.4, p. 479-489, dez. 2007.

CARVALHO, W. E. **IDENTIFICAÇÃO DE UMA MALHA DE MISTURA UTILIZANDO UM ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**. 2016. 52f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2016.

CASTRUCCI, P.; BITTAR, A.; SALES, R. M. **Controle automático**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 476 p.

CHAGAS, T. P. **Estimação e compensação da histerese em válvulas de controle pneumáticas**. 2007. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Automação) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

CHU, Q.; LIU, T.; WANG, Y. **Research on Excitation Controller Based on the Adaptive Fuzzy PID Technique**. 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems Cybernetics. v.1, p. 297 - 300, 2013.

CORREA, P. V. **Fundamentos de Instrumentação e Controle**. 2002. 163 p.

COX, E. **Fuzzy logic for business and industry**. Massachusetts: Charles River Media Inc, 1995. 586 p.

EMERSON, Process Management. **Control Valve Handbook**. 4 ed. Marshalltown: LLC Fisher Controls International, 2005. 297 p.

FERREIRA, C. **Estudo comparativo entre as técnicas de Controle Fuzzy, PI e Adaptativo aplicado ao processo de Fabricação de papel reciclado utilizando a ferramenta Delta Tune**. 2009. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

FONSECA, D. G. V. **Modelagem e controle adaptativo de uma Planta didática de nível com instrumentação industrial**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

GOMES, Y. C. ; ARAÚJO, Tomás Victor Gonçalves Pereira ; LIMA, A. M. N. . **Abordagem Didática com Controle Adaptativo**. Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. v. 1, p. 1-14, set. 2006.

KALMAN, R. **Design of a self optimizing control system**. Transaction of the ASME, p 394-400, 1958.

KOHAGURA, T. **Aplicação da lógica fuzzy na avaliação de alunos**. 2007. 61f. Monografia (Graduação em Ciência da Computação) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

LAGES, W. F. **Controle Adaptativo de Sistemas Estocásticos**. 2007. 18f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LEITE, V. V. **Desenvolvimento de um controle de histerese adaptativo aplicado a uma malha de vazão**. 2015. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2015.

MAFENGYING; LIHUANLING. **Self-adaptive Fuzzy PID Control algorithm used in liquid mixing device**. In: Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 26., 2014, Changsha, China. Anais da Chinese Control and Decision Conference. Changsha: IEEE, 2014.

MATAS, A. L. **Sintonia de Controladores PID com Controle Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC) aplicado a um Motor de Corrente Contínua**. 2012. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MUNASINGHE, S.; KIM, M-S.; LEE, J-J. **Adaptive neurofuzzy controller to regulate utsg water level in nuclear power plants**. Nuclear Science, IEEE Transactions on, v. 52, n.1, p.421 - 429, feb. 2005.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2002. 695 p.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 813 p.

SASTRY, S. E.; BODSON, M. **Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness**. Prentice-Hall: New Jersey, 1989. 381 p.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem Fuzzy**. 2. ed. São Paulo, SP: E. Blücher, FAPESP, 2007. 186 p.

SILVA, L. R. B. **Estudo aplicado de topologias de controle de processos utilizando uma Planta Didática Industrial**. 2011. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2011.

SILVA, R. A. C. **Inteligência artificial aplicada à ambientes de Engenharia de Software: Uma visão geral**. INFOCOMP, Universidade Federal de Viçosa, Lavras, MG, v.4, n.4, p. 27-37, 2005.

SMITH, Carlos A.; CORRIPIO, Armando B. **Princípios e prática do controle automático de processo**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. 505 p.

SOLOUKI, Saeed; POOYAN, Mohammad. **Fuzzy Model Reference Adaptative Control based on PID for Fundamental and typical Industrial Plants**. In: III International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA), 2013, Tehran, Iran. Anais da III International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA), 2013.

SPATTI, D. H. **Sistemas Inteligentes aplicados à Engenharia (Notas de Aula)**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

VON ALTROCK, C. **Fuzzy logic and neuroFuzzy applications in business and finance**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1996. 400 p.

WANG, C. **A Study of Membership Functions on Mamdani-Type Fuzzy Inference System for Industrial Decision-Making**. 2015. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica e Ciências Mecânicas) - Lehigh University, Bethlehem, 2015.

WOLOVICH, W. A. **Automatic control systems: basic analysis and design**. Fort Worth: Saunders College Publishing, 1994. 450 p.

XIAO, Q.; ZOU, D.; WEI, P. **Fuzzy Adaptive PID Control Tank Level**. International Conference on Multimedia Communications. p. 149 - 152, 2010.

YANG, Yan; BIAN, Haiyun. **Design and realization of Fuzzy Self-tuning PID water temperature controller**. In: International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, v. 4., 2012. Nanchang, China. Anais da International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Nanchang: IEEE, 2012.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets and applications: selected papers by L. A.** New York: J. Wiley, 1987. 684 p.

ZHAO, Z-Y ; TOMIZUKA, M.; ISAKA, S. **Fuzzy gain scheduling of PID Controllers**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, n.5, v.23, p. 1392 - 1398, sep/oct, 1993.

ZHOU, D.; SHEN, T.; TAMURA, K. **Adaptive Control of a Pneumatic Valve with Unknown Parameters and Disturbances**. In: SICE Annual Conference, 2003. Fukui, Japão. Anais da SICE Annual Conference. Fukui: IEEE, 2003.