

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS
Engenharia de Automação Industrial

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLADOR FUZZY ATRAVÉS DE UM
SISTEMA DE SUPERVISÃO DE UMA PLANTA DIDÁTICA DE NÍVEL**

Daniel Pereira Leão

Araxá/MG
Dezembro de 2013

Daniel Pereira Leão

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLADOR FUZZY ATRAVÉS DE UM
SISTEMA DE SUPERVISÃO DE UMA PLANTA DIDÁTICA DE NÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Automação Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de graduação.

Orientador: Prof. M.Sc. Domingos Sávio de Resende

Araxá/MG
Dezembro de 2013

Dedico esse trabalho aos meus pais que sempre me deram força, coragem e constante apoio para seguir em busca de meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do CEFET-MG, principalmente à meu orientador Sávio e ao professor Henrique Avelar, pelo conhecimento compartilhado, imprescindível para a realização desse trabalho.

Aos colegas de sala, amigos e família que, direta ou indiretamente, colaboraram para o desenvolvimento do projeto.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 SISTEMAS DE CONTROLE	13
3.1.1 CONTROLADOR FUZZY	14
3.1.2 CONTROLADOR PID	19
4 METOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	23
4.1 INTERFACE GRÁFICA DE SUPERVISÃO.....	23
4.2 ESTUDO DA PLANTA DE NÍVEL.....	34
4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DOS CONTROLADORES.....	42g
5 RESULTADOS	44
6 CONCLUSÃO	52
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
8 ANEXO A	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de controle em malha aberta.....	13
Figura 2 - Sistema de controle em malha fechada (com retroação).....	13
Figura 3 - Conjuntos clássicos tradicionais.	14
Figura 4 - Conjuntos fuzzy.....	15
Figura 5 - Grau de pertinência da temperatura igual a 12°C no conjunto "baixa".	16
Figura 6 - Grau de pertinência da umidade do ar igual a 88% no conjunto "alta".	16
Figura 7 - Grau de pertinência da saída para a regra.	16
Figura 8 - Grau de pertinência da temperatura igual a 12°C no conjunto "média". ...	17
Figura 9 - Grau de pertinência da umidade do ar igual a 88% no conjunto "média".	17
Figura 10 - Grau de pertinência da saída para a segunda regra.....	17
Figura 11 – Saída defuzzificada (Centróide da figura).	18
Figura 12 - Fluxograma de funcionamento de um controlador fuzzy.....	19
Figura 13 - Curva de resposta em forma de S. Sistema em malha aberta.....	21
Figura 14 - Oscilação mantida com período P_C . Sistema em malha fechada com controlador proporcional.....	22
Figura 15 - IDE do Visual Studio 2012	23
Figura 16 - Janela principal.	25
Figura 17 - Janela de configuração.	25
Figura 18 - Comunicação serial. Escrita do valor de MV.....	26
Figura 19 - Comunicação serial. Leitura da PV.	27

Figura 20 - Campos para alterar o valor de MV e set-point (SP).....	28
Figura 21 - Botão <i>Play</i> . Ao ser pressionado, altera o Status de “Manual” para “Automático”.....	28
Figura 22- Botão <i>Stop</i> . Ao ser pressionado, altera o Status de “Automático” para “Manual”.....	28
Figura 23 - Gráfico de controle.....	29
Figura 24 - Campo para navegação pelo gráfico.	29
Figura 25 - Campos para seleção do controlador a ser utilizado.	30
Figura 26 - Parametrização do controlador PID.	30
Figura 27 - Diagrama para configuração do controlador fuzzy.....	30
Figura 28 - Janela de ajuste da entrada fuzzy "Erro".	31
Figura 29 - Janela de ajuste da entrada fuzzy "Derivada do Erro".....	31
Figura 30 - Janela de ajuste da saída fuzzy "Abertura da Válvula".	31
Figura 31 - Janela de edição das regras.....	33
Figura 32 - Botão para realizar testes de forma autônoma com os controladores. ...	34
Figura 33 - Planta didática de nível.....	35
Figura 34 - Diagrama P&I.....	35
Figura 35 - Válvula de controle com acionamento pneumático.....	36
Figura 36 - Curva característica da válvula.....	37
Figura 37 - Comportamento do sistema à entrada em degrau. Sistema em malha aberta.....	38
Figura 38 - Resposta em degrau utilizada para identificação do sistema.....	39
Figura 39 - Resposta ao degrau - Sistema identificado e sistema real.....	40
Figura 40 – <i>Toolbox - PID Tuning</i> . Determinação dos parâmetros do controlador PID para o sistema identificado.....	41

Figura 41 - Resposta ao degrau utilizando os parâmetros encontrados para o controlador PID.	41
Figura 42 - Rotina para cálculo da saída PID.....	42
Figura 43 - Funções de pertinência dos conjuntos de entrada "Erro".	44
Figura 44 - Funções de pertinência dos conjuntos de entrada "Derivada do Erro". ..	44
Figura 45 - Funções de pertinência dos conjuntos de saída "Abertura da Válvula". .	45
Figura 46 - Respostas em degrau do sistema com controle fuzzy e PID.	46
Figura 47 - Comparação entre a variável de processo dos controladores fuzzy e PID. Degraus: 10, 20 e 30.....	47
Figura 48 - Comparação entre a variável de processo dos controladores fuzzy e PID. Degraus: 40, 50 e 60.....	48
Figura 49 - Comparação entre a variável de processo dos controladores fuzzy e PID. Degraus: 70, 80 e 90.....	48
Figura 50 - Resposta do sistema em duas faixas de operação diferentes utilizando PID.	49
Figura 51 - Resposta do sistema em duas faixas de operação diferentes utilizando fuzzy.....	50
Figura 52 - Resposta média de todos os degraus para cada controlador.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regra de sintonia Ziegler-Nichols baseada na resposta do processo e uma excitação em degrau.	21
Tabela 2 - Regra de sintonia Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_C e no período crítico P_C	22

RESUMO

O presente trabalho consiste em utilizar um controlador fuzzy implementado em linguagem de alto nível, realizando o controle e supervisão de uma planta didática de nível e comparar os resultados com o de um controlador PID. Devido às características de não-linearidade da planta didática de nível, o controlador PID tem seus ganhos ajustados em um ponto de funcionamento não operando de forma satisfatória, apresentando grande overshoot, maiores tempos de resposta e de acomodação. Um controlador Fuzzy pode obter resultados satisfatórios para o controle da planta se for bem estruturado e implementado com sua base de regras. A lógica fuzzy permite expressar de maneira sistemática quantidades imprecisas, vagas, mal definidas. Em vez de utilizar o modelo matemático, o controlador baseado em lógica Fuzzy usufrui da característica de tomadas de decisão próximas a do ser humano para que a ação de controle seja a desejada, atendendo aos requisitos de desempenho e estabilidade. Para desenvolvimento do software de controle e supervisão foi realizada uma revisão bibliográfica e através de um estudo do atual modelo da planta didática, considerando as características da válvula de vazão, foi verificada a não-linearidade da mesma. A realização de testes com os controladores fuzzy e PID através da aplicação de degraus no set-point, percorrendo vários pontos de operação, permitirá obter resultados para comparação.

Palavras-chaves: Controlador Fuzzy, PID, planta de nível, software de controle e supervisão.

ABSTRACT

The present paper is about using a fuzzy controller implemented in a high level language, making the control and supervision of a didactic level plant and compare the results with those of a PID controller. Due the characteristics of nonlinearity of didactic level plant, the PID controller has adjusted its parameters at a point of operation not operating satisfactorily, with large overshoot, higher response and accommodation times. A Fuzzy controller can achieve satisfactory results controlling the plant if it is well structured and implemented with a rule base. Fuzzy logic allows us to express systematically quantities inaccurate, vague, ill-defined. Instead of using the mathematical model, the controller based on a fuzzy logic enjoys the feature of decision near the human being to the control action is desired, responding the requirements of performance and stability. A literature review are going to be done to help to develop the control and supervision software. A study of the current model of didactic plant, considering the characteristics of the flow valve, will check the nonlinearity of the system. Tests with fuzzy and PID controllers by implementing steps in the set-point, running multiple operating points, it will acquire results for comparison.

Keywords: Fuzzy Controller, PID, level plant, control and supervision software.

1 INTRODUÇÃO

No decorrer das últimas décadas, o homem buscou aperfeiçoar métodos para aumentar a qualidade, eficiência e segurança em processos industriais. O controle automático vem se tornando imprescindível para tal feito, juntamente com as vantagens econômicas que isso acarreta. Pesquisadores têm-se baseado no funcionamento da mente humana na tentativa de obter melhores resultados produtivos para estratégias de controle, utilizando-se, por exemplo, a lógica fuzzy (FERREIRA, 2009) (MOREÉ, 2004).

Fuzzy, em inglês, significa nebuloso, incerto, duvidoso. Esses sistemas podem lidar com informações imprecisas transformando-as em uma linguagem matemática simples para implementação computacional (FERREIRA; JUNIOR; LOPES; LACERDA, 2010), tornando-se uma alternativa viável para aplicações em controle de processos. Para isso, o valor das variáveis é enquadrado em conjuntos, denominados conjuntos fuzzy, e o número desses conjuntos está relacionado com a precisão desse valor.

O conceito de conjuntos fuzzy foi introduzido, em 1965, por Lofti A. Zadeh (WEBER; KLEIN, 2003). A lógica fuzzy é utilizada expressando a teoria desses conjuntos, gerando uma metodologia para expressar leis operacionais de um sistema em termos linguísticos. A técnica utiliza o conhecimento de um especialista para modelar o funcionamento do sistema de controle, empregando regras, relacionando as variáveis de entrada e saída da planta. Várias aplicações industriais empregam o raciocínio fuzzy, destacando-se os controladores fuzzy de plantas nucleares, refinarias, processos biológicos e químicos, trocador de calor, máquina diesel, tratamento de água e sistema de operação automática de trens (WEBER; KLEIN, 2003).

O controle de nível é um processo frequentemente encontrado na indústria sendo, na grande maioria dos casos, realizado através de um controlador tradicional PID

devido a sua simplicidade de implementação. “O controle PID está presente atualmente em 90% das aplicações industriais” (ASTROM; HAGGLUND, 2001). No entanto, muitos destes controladores são mal sintonizados (CAMPESTRINI, 2006).

O controlador PID baseia-se em fazer a leitura de um sensor, realizar os cálculos proporcional, integral, derivativo e somar esses três componentes para calcular a saída, a fim de estabelecer o controle do processo em um ponto de operação (set-point). Para isso, é necessário ajustar os ganhos P, I e D, utilizando-se, por exemplo, o método de Ziegler-Nichols (DORF; BISHOP, 1998). A maior dificuldade para se conseguir um bom controle PID está na obtenção desses ganhos.

Plantas didáticas simulam ambientes industriais de forma a facilitar o estudo de seu funcionamento. Através da planta didática de nível que foi utilizada neste trabalho, foi possível desenvolver um software em linguagem de programação de alto nível implementando um controlador fuzzy e um controlador PID, para que, assim, possamos fazer a supervisão do processo e a comparação dos resultados obtidos.

Devido às características de não-linearidade desta planta, o controlador PID tem seus ganhos ajustados em um ponto de funcionamento, fazendo com que o controle opere de forma insatisfatória, apresentando grande overshoot, maiores tempos de resposta e de acomodação. A não-linearidade do processo está relacionada principalmente às características da válvula de vazão que controla o fluxo de entrada de água no tanque, tornando uma tarefa difícil a representação do modelo matemático do sistema.

Um controlador Fuzzy pode obter resultados satisfatórios para o controle de uma planta não-linear se for bem estruturado e implementado com sua base de regras (BARROS; ALMEIDA, 2009). Como a lógica fuzzy permite expressar de maneira sistemática quantidades imprecisas, vagas, mal definidas, o fato de haver características não-lineares (funcionamento da válvula de vazão) deixa de ser um problema para o controle do processo. Em vez de utilizar o modelo matemático, o controlador baseado em lógica Fuzzy usufruirá da característica de tomadas de decisão próximas a do ser humano para que a ação de controle seja a desejada, atendendo aos requisitos de desempenho e estabilidade pretendidos.

Utilizando o software Matlab e o protocolo de comunicação de dados OPC, Carvalho, Sousa e Francisco (2010) concluíram que a lógica Fuzzy fornece desempenho satisfatório ao tentar controlar uma Planta de Nível e que a obtenção de um controlador eficiente para a planta só se fez possível mediante o conhecimento do funcionamento da mesma. Ferreira (2009), com o uso da ferramenta Delta Tune conclui que a técnica de controle fuzzy é superior a técnica de controle PI para aplicações não-lineares, pois elas atuam mantendo a característica projetada no sistema. Souza e Lopes (2012) propuseram a implementação de controladores fuzzy e PID no software Matlab para um sistema de controle de nível e concluíram que com o Controlador PID o sistema obteve respostas mais lentas quando comparadas com as repostas do Controlador Fuzzy. Filho, Gosmann e Bauchspiess (2002) implementaram um controlador fuzzy em um sistema de nível de líquidos e observaram que tal técnica mostra-se bastante útil para controle de plantas comprovadamente não-lineares.

O desenvolvimento da interface gráfica de supervisão permitirá o monitoramento das variáveis envolvidas no processo. Assim, realizando um estudo do atual modelo da planta didática, considerando as características da válvula de vazão, poderemos verificar a não-linearidade da mesma. Com a implementação do algoritmo do controlador fuzzy e do controlador PID foi possível realizar testes, através da aplicação de degraus no set-point, percorrendo vários pontos de operação, obtendo os resultados para comparação.

Foi realizada uma pesquisa teórica e outra de campo. Para estudos sobre a teoria envolvendo as estratégias de controle, foram utilizados os livros Controle e Modelagem Fuzzy, de Marcelo Godoy Simões e Sistemas de Controle Modernos, de Richard C. Dorf. Na pesquisa de campo o software foi desenvolvido e foram realizados testes na planta didática.

Pretende-se com este trabalho verificar qual das estratégias de controle resultará em um melhor desempenho para a planta didática de nível. O software de controle e supervisão desenvolvido poderá ser útil aos usuários do laboratório onde se encontra a planta, para compreensão dos conceitos que envolvem os controladores implementados.

No Capítulo 2 iremos apresentar claramente os objetivos desse trabalho. Para alcançá-los, faremos uma revisão bibliográfica no Capítulo 3 sobre a teoria envolvendo os controladores fuzzy e PID. No Capítulo 4 será possível compreender como foi desenvolvida a interface gráfica de supervisão e suas funcionalidades. Faremos uma análise das características da planta didática de nível com intuito de verificar sua não linearidade e obter parâmetros para sintonia dos controladores. Além disso, mostraremos como foi realizada a implementação de seus algoritmos. No Capítulo 5 será apresentado os testes realizados e a análise dos resultados obtidos para que assim possamos apresentar a conclusão do trabalho no Capítulo 7.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Comprovar que um controlador fuzzy pode obter melhores resultados para o controle da planta didática de nível, comparado com o controlador PID clássico, através dos resultados gerados por um software desenvolvido em linguagem de programação de alto nível, capaz de fazer o controle e a supervisão do processo.

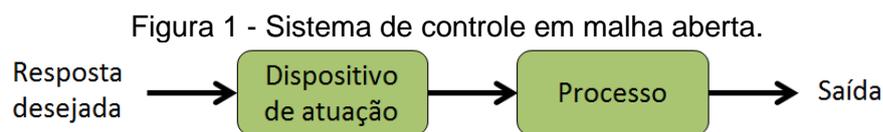
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Desenvolver uma interface gráfica de fácil entendimento e operação que permita supervisionar as variáveis envolvidas no processo;
- b) Realizar um estudo do atual modelo da planta didática, considerando as características da válvula de vazão, para verificar o perfil não-linear da mesma;
- c) Implementar o algoritmo de controle do controlador fuzzy e do controlador PID;
- d) Realizar testes com os controladores fuzzy e PID através da aplicação de degraus no set-point, percorrendo vários pontos de operação, a fim de obter resultados para comparação;
- e) Comparar os dados e analisar os resultados.

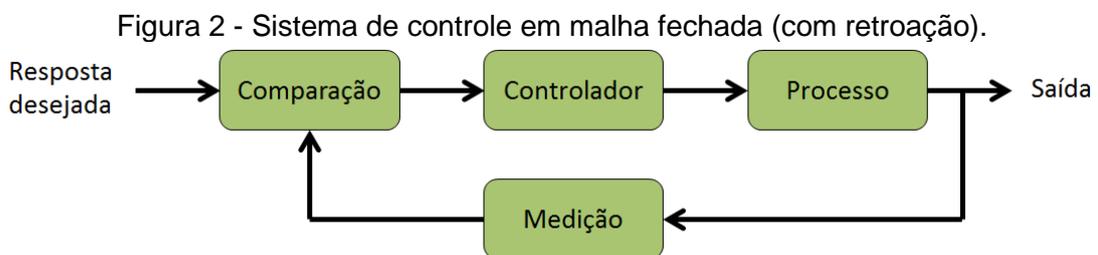
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SISTEMAS DE CONTROLE

“Um sistema de controle é uma interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzirá uma resposta desejada do sistema” (DORF; BISHOP, 1998, p.2). Podemos representar esses componentes ou processos por blocos, havendo uma relação de causa e efeito entre entrada (resposta desejada) e saída no processo a ser controlado.



Fonte: DORF; BISHOP, 1998, p.2.



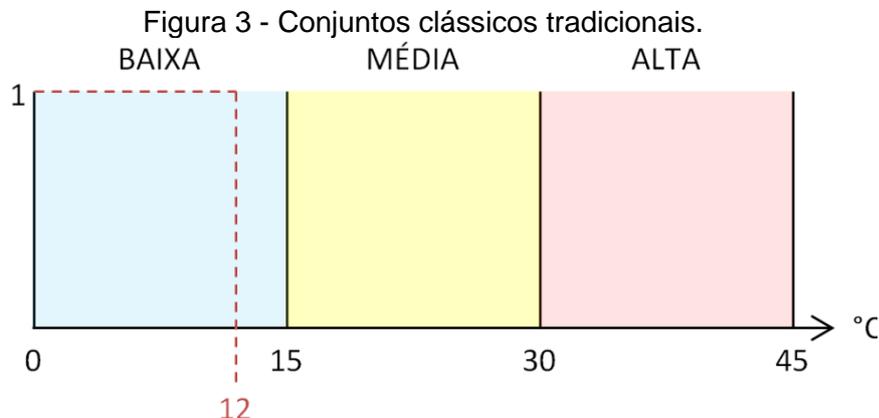
Fonte: DORF; BISHOP, 1998, p.2.

Um sistema de controle com retroação faz uma relação entre a saída e a entrada para controlar o processo. Os sistemas de controle deste trabalho se utilizarão da diferença entre a saída e a referência de entrada, ou seja, o erro, para controlar o processo de modo a produzir um sinal de controle que faça com que tal diferença seja continuamente reduzida zero ou a um valor pequeno.

3.1.1 CONTROLADOR FUZZY

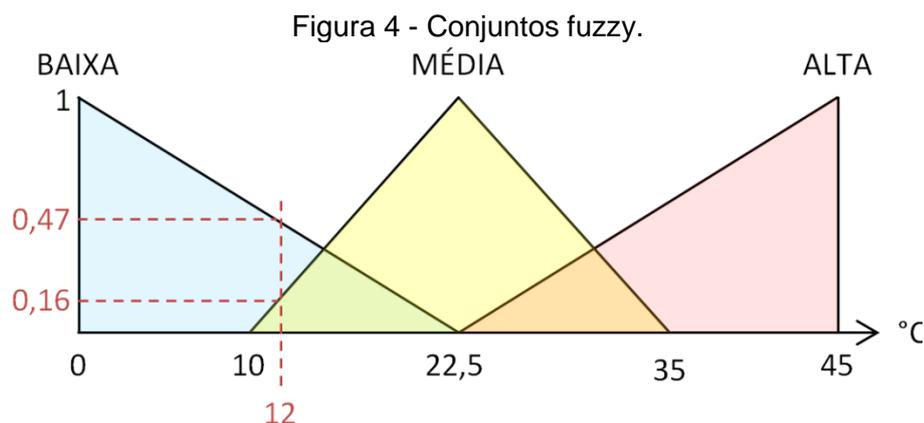
A lógica fuzzy é fundamentada pela utilização dos chamados conjuntos fuzzy. Enquanto na lógica clássica tradicional um valor pertence ou não a um conjunto, na lógica fuzzy um valor possui certo grau de pertinência para cada conjunto (MACHADO; CUNHA, 2005) variando de 0 a 1. Denominamos como Fuzzificação¹ o processo de utilizar os valores da variável de entrada no domínio do mundo real (leitura de um sensor), fazer um escalonamento para condicionar os valores a universos de discurso normalizados, transformando números em conjuntos fuzzy.

Para exemplificar, imaginemos a temperatura em certo ambiente. Conforme a figura 3, se a temperatura registrar 12°C, notamos que o ambiente encontra-se com “baixa” temperatura. Diferentemente, considerando os conjuntos fuzzy na figura 4, veremos que a 12°C, a temperatura do ambiente situa-se nos conjuntos “baixa” e “média”, havendo certo grau de pertinência para cada um deles. Assim, à 12°C temos uma pertinência de 0,47 no conjunto “baixa” e 0,16 no conjunto “média”.



Fonte: Autoria própria.

¹Utilizamos esse termo registrado dessa forma de acordo com Webber, em “Aplicação Da Lógica Fuzzy Em Software E Hardware”.



Fonte: Autoria própria.

Os conjuntos fuzzy são delimitados pelo que chamamos de funções de pertinência. Essas podem assumir as mais variadas formas, a fim de representar o sistema em questão. Para o exemplo anterior, foram utilizadas funções de pertinência triangulares. As mais utilizadas são: triangulares, trapezoidais e gaussianas.

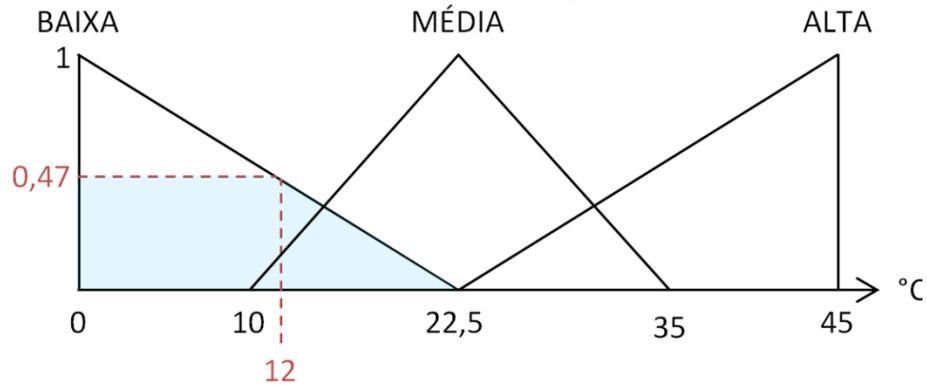
Em um controlador fuzzy, os conjuntos de entrada são relacionados com os conjuntos de saída a fim de proporcionar o valor de saída desejável. Esses relacionamentos são feitos através de regras do tipo “se-então”: “Se a temperatura é baixa e a umidade do ar é alta, então ligar o aquecedor no máximo”. Neste caso temos duas variáveis de entrada, temperatura em graus celsius e umidade do ar em porcentagem, e uma variável de saída que é a potência fornecida ao aquecedor em porcentagem.

Como as variáveis de entrada tem um valor de pertinência para cada conjunto de seu universo, cada regra irá resultar em um valor de pertinência no conjunto de saída especificado pela regra. Esse valor é determinado em função do termo que relaciona as entradas na regra, chamados de operadores lógicos. Para o termo “e” utiliza-se o operador mínimo; para o termo “ou” utiliza-se o operador máximo. Essa forma de processar os dados fuzzy de entrada, de modo a inferir as ações de controle é chamado de Inferência Fuzzy.

Em todo sistema de controle fuzzy tem-se a chamada base de conhecimento, que nada mais é do que uma base de regras, fornecida por especialistas, que deve ser muito bem definida para caracterizar a estratégia de controle. Voltando ao nosso

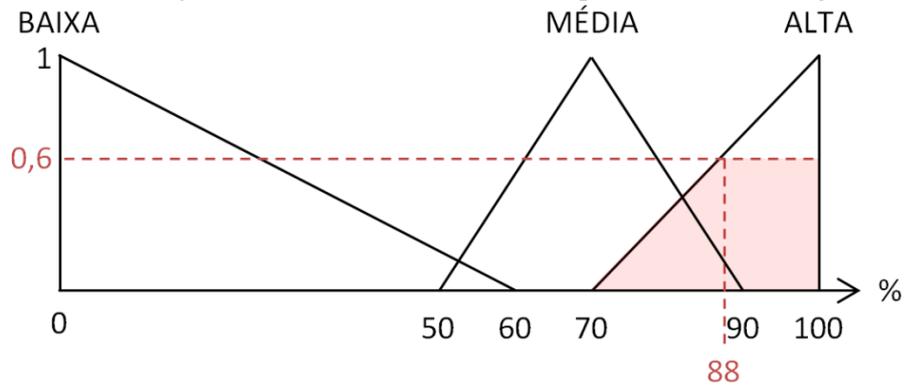
exemplo, considerando temperatura igual a 12°C e umidade do ar igual 88%, para a regra “se a temperatura é baixa e a umidade do ar é alta, então ligar o aquecedor no máximo”, o valor de pertinência do conjunto de saída “máximo” será definido usando o operador mínimo. Assim $\min(0,47; 0,6) = 0,47$. Ver figuras 5, 6 e 7.

Figura 5 - Grau de pertinência da temperatura igual a 12°C no conjunto "baixa".



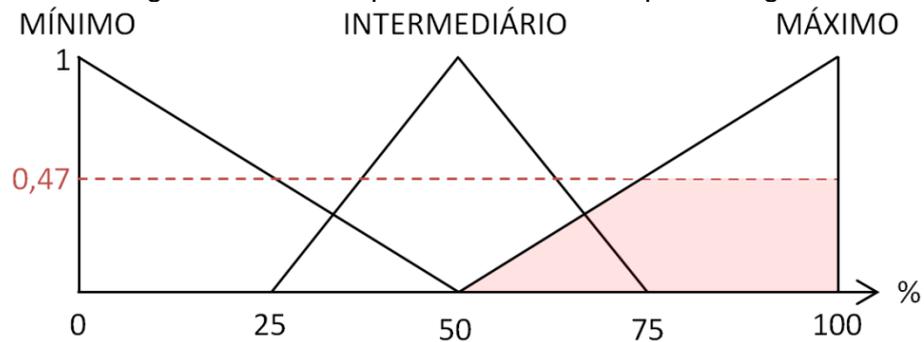
Fonte: Autoria própria.

Figura 6 - Grau de pertinência da umidade do ar igual a 88% no conjunto "alta".



Fonte: Autoria própria.

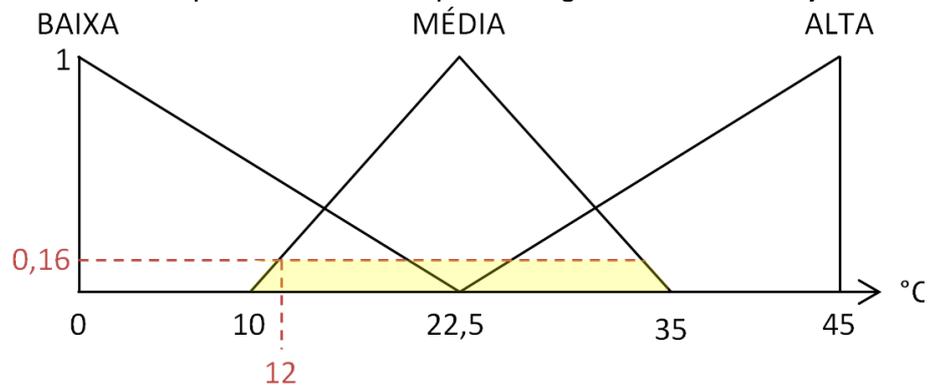
Figura 7 - Grau de pertinência da saída para a regra.



Fonte: Autoria própria.

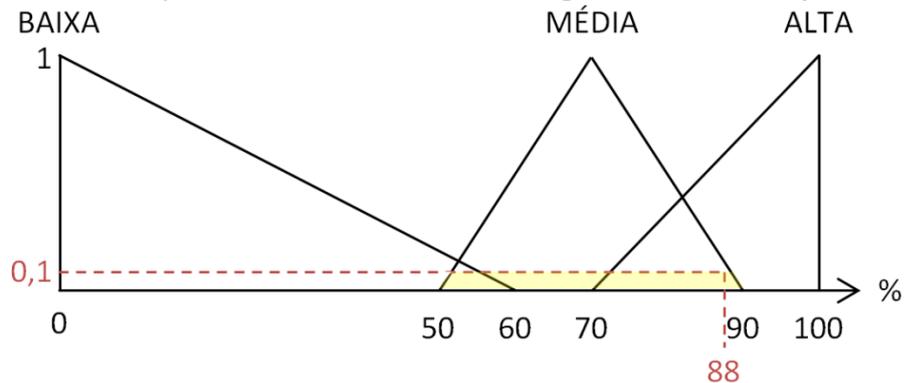
Para uma segunda regra: “Se a temperatura é média e a umidade do ar é média”, considerando os mesmos valores de entrada, teremos no conjunto da saída “intermediário” o grau de pertinência $\min(0,16; 0,1) = 0,1$.

Figura 8 - Grau de pertinência da temperatura igual a 12°C no conjunto "média".



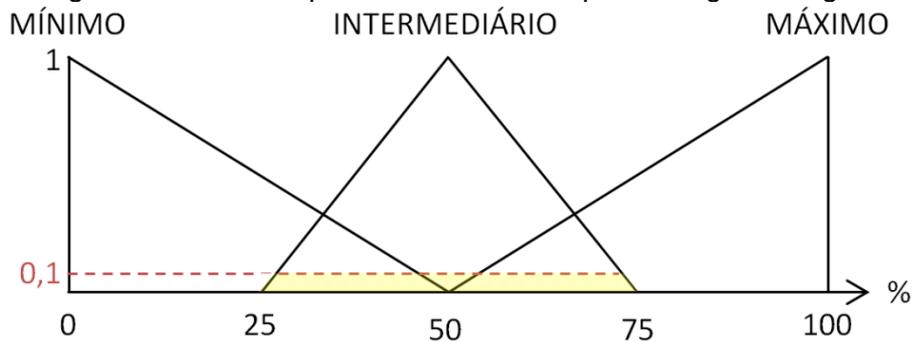
Fonte: Autoria própria.

Figura 9 - Grau de pertinência da umidade do ar igual a 88% no conjunto "média".



Fonte: Autoria própria.

Figura 10 - Grau de pertinência da saída para a segunda regra.



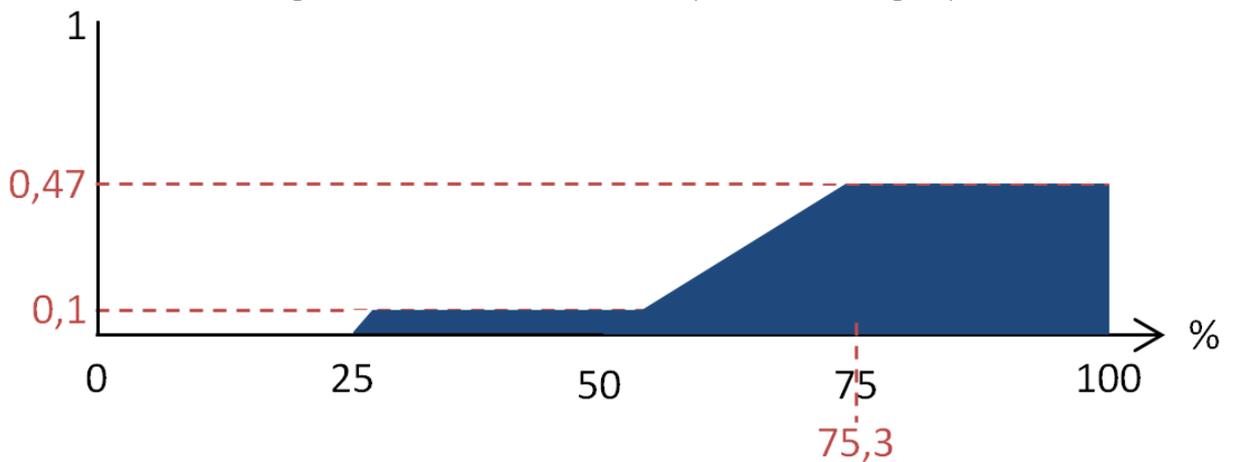
Fonte: Autoria própria.

Após realizar a inferência com todas as regras, teremos a saída final no universo fuzzy, sendo necessário agora realizar o processo de Defuzzificação² a fim de encontrar um valor de saída não-fuzzy, ou seja, valor no universo de discurso real da variável. Os principais métodos para isso são o centroide e a média de máximos. O primeiro é provavelmente o mais utilizado e consiste em determinar o centro de gravidade da distribuição obtida no eixo das abscissas (VALENCIA, 2011):

$$s = \frac{\sum x_i \delta A_i}{\sum \delta A_i}$$

Onde s é o valor numérico da saída, x_i é o valor das abscissas do ponto centróide e δA_i é o valor das áreas entre o grau de pertinencia e o eixo das abscissas para cada regra ativada. Para o exemplo, teremos $s = 75,3$.

Figura 11 – Saída defuzzificada (Centróide da figura).

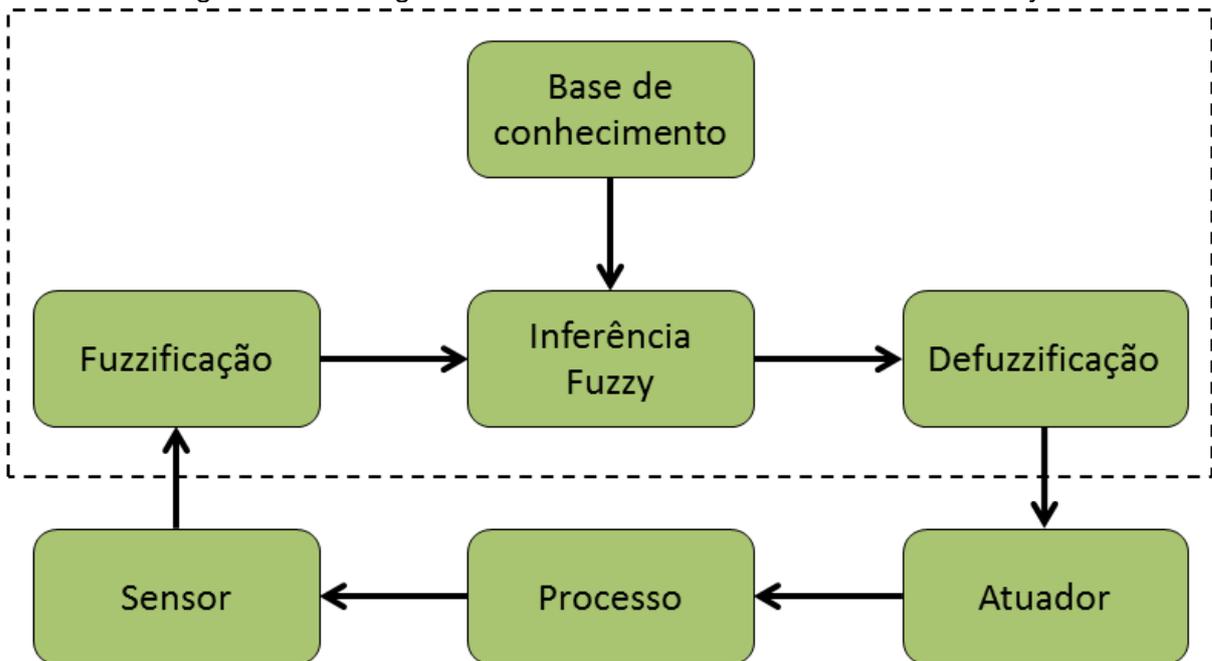


Fonte: Autoria própria.

A figura a seguir representa um sistema de controle baseado em lógica fuzzy. Podemos identificar todas as etapas, desde a leitura da variável a ser fuzzificada até a saída para o atuador.

²Utilizamos esse termo registrado dessa forma de acordo com Webber, em “Aplicação Da Lógica Fuzzy Em Software E Hardware”.

Figura 12 - Fluxograma de funcionamento de um controlador fuzzy.



Fonte: Adaptado de ALMEIDA, 2006.

3.1.2 CONTROLADOR PID

Os controladores PID são amplamente utilizados em ambientes industriais. Sua popularidade pode ser atribuída ao seu desempenho robusto em uma ampla gama de condições de funcionamento e por sua simplicidade funcional.

Como o nome sugere, o algoritmo PID é composto por três coeficientes: proporcional, integral e derivativo, que são variados para obter a resposta ideal. Assim, a ação combinada possui as vantagens de cada uma das três ações de controle individuais (OGATA, 1998). A equação de um controlador com essa ação combinada é dada por

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt},$$

ou pela função de transferência no domínio da frequência

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right),$$

onde:

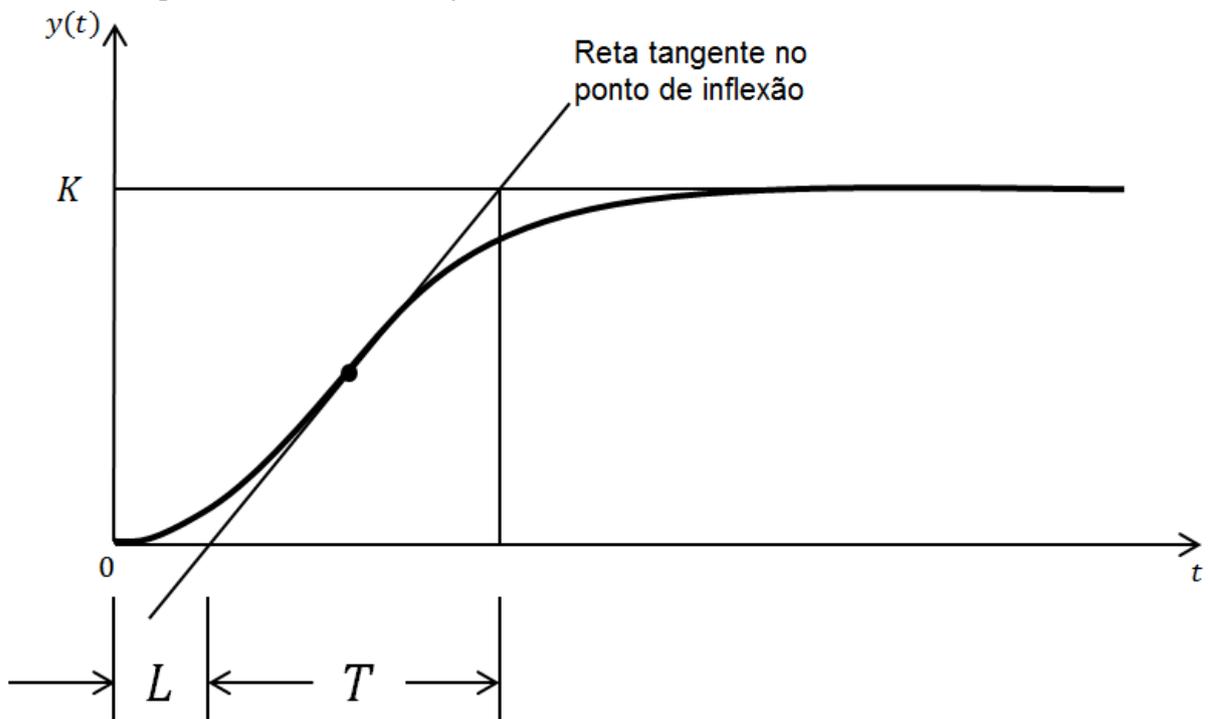
K_p : Ganho proporcional; T_i : Tempo integral; T_d : Tempo derivativo.

A ação de controle proporcional reage proporcionalmente à variação do erro e gera um erro de regime estacionário ao processo, ou seja, um erro residual na resposta a uma excitação em degrau. Com a adição do controle integral, elimina-se esse erro de regime permanente. A ação de controle do termo integral pode possuir um valor não-nulo quando o sinal de erro atuante for nulo. Isso é impossível no caso do controlador proporcional, uma vez que um sinal de controle não-nulo necessita de um sinal de erro atuante não-nulo; isso porque um sinal de erro atuante não-nulo em regime estacionário significa que há um erro residual. Uma vantagem de se utilizar a ação de controle derivativa é que ela responde à taxa de variação do erro atuante e pode produzir uma correção significativa antes de o valor do erro atuante tornar-se demasiadamente elevado; portanto, antecipa o erro atuante e inicia uma ação corretiva mais cedo, tendendo a aumentar a estabilidade do sistema. (OGATA, 1998).

A sintonia do controlador é feita através da seleção dos parâmetros (ajuste dos valores de K_p , T_i e T_d), de modo a serem atendidas as especificações de desempenho. A seguir serão apresentadas as regras de Ziegler-Nichols que determinam os ganhos com base nas características transitórias do processo a ser controlado, sendo muito convenientes para a sintonia de controladores, quando não se conhece o modelo matemático do processo. Segundo Ogata (1998), há dois métodos e em ambos se pretende obter um valor máximo de ultrapassagem de 25% na resposta a uma excitação em degrau.

No primeiro método, se aplica um degrau unitário e, caso o processo a ser controlado não envolva integradores nem polos dominantes complexos-conjugados, a curva de resposta ao degrau pode-se assemelhar a uma curva em forma de S, como é mostrado na figura a seguir (se a resposta não apresentar esta curva em forma de S, o método não se aplica).

Figura 13 - Curva de resposta em forma de S. Sistema em malha aberta.



Fonte: OGATA, 1998, 545.

Essa curva se caracteriza por duas constantes, o tempo de retardo L e a constante de tempo T , que podem ser determinados traçando uma reta tangente à curva em forma de S no ponto de inflexão. Para determinar os ganhos do controlador, basta utilizar a tabela a seguir:

Tabela 1 - Regra de sintonia Ziegler-Nichols baseada na resposta do processo e uma excitação em degrau.

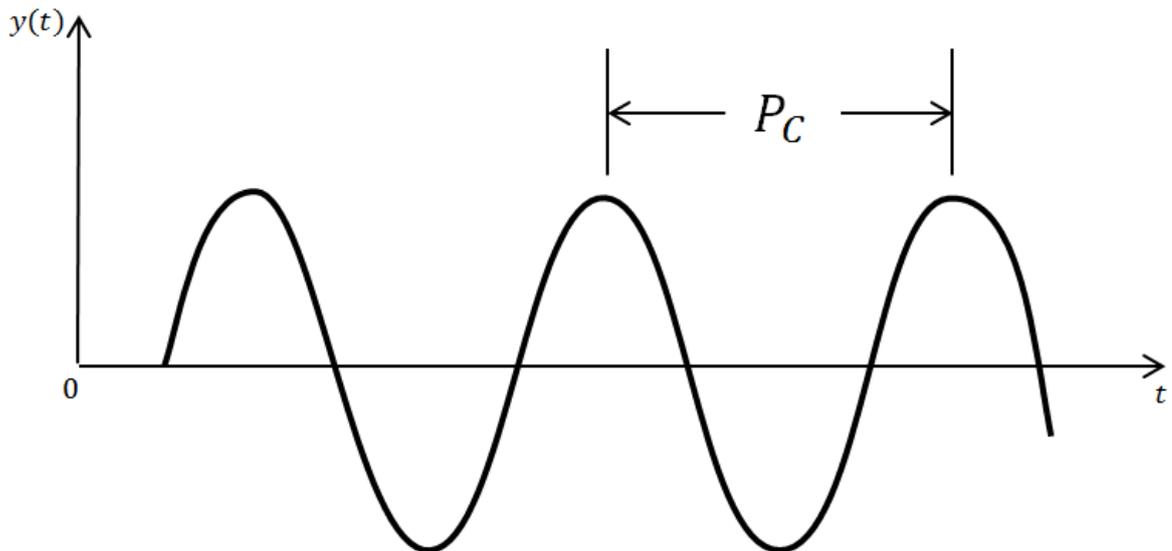
Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: OGATA, 1998, 546.

No segundo método, ajustam-se primeiro os valores de $T_i = \infty$ e $T_d = 0$ e aumenta-se o valor de K_p de zero a um valor crítico K_c para o qual o sinal de saída apresenta

oscilações constantes (se o sinal de saída não apresentar oscilações para quaisquer que sejam os valores de K_p , então o método não se aplica). Assim, são determinados experimentalmente os valores de ganho crítico K_C e o período crítico correspondente P_C .

Figura 14 - Oscilação mantida com período P_C . Sistema em malha fechada com controlador proporcional.



Fonte: OGATA, 1998, 546.

Utilizando a tabela a seguir, determinam-se os ganhos do controlador.

Tabela 2 - Regra de sintonia Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_C e no período crítico P_C .

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_C$	∞	0
PI	$0,45K_C$	$\frac{1}{1,2}P_C$	0
PID	$0,6K_C$	$0,5P_C$	$0,125P_C$

Fonte: OGATA, 1998, 547.

Na planta utilizada nesse trabalho, não conseguimos utilizar nenhum dos métodos acima citados. Para realizar a parametrização utilizamos a *toolbox* do Matlab *PID Tuning*, que será apresentado na seção 4.2.

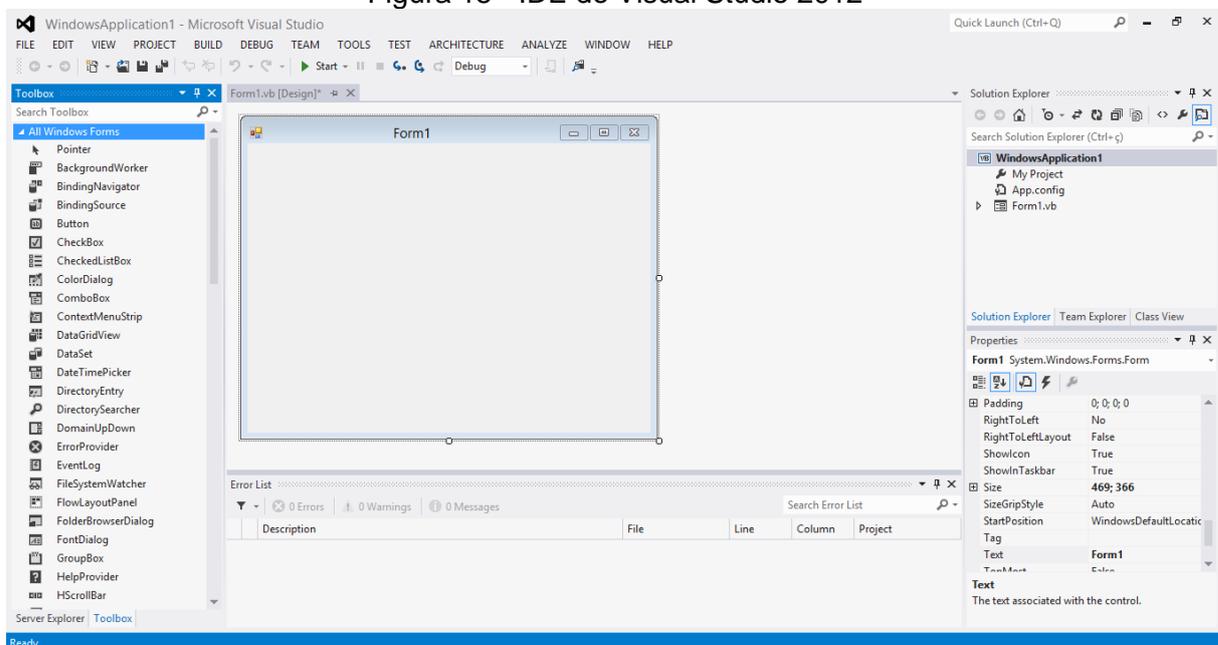
4 METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

4.1 INTERFACE GRÁFICA DE SUPERVISÃO

O software de supervisão da planta de nível foi desenvolvido utilizando a IDE (Ambiente Integrado de Desenvolvimento) do Visual Studio 2012, uma família de produtos, ferramentas e tecnologias utilizadas para criação de aplicativos poderosos e de alto desempenho, a qual oferece um conjunto de ferramentas que ajudam a escrever e modificar códigos e também detectar e corrigir erros.

Pode-se utilizar o Visual Studio para criação de diversas aplicações, com códigos escritos nas linguagens Visual Basic, Visual C#, Visual C++, Visual F# e em JavaScript, e criar soluções em linguagem mista com mais facilidade.

Figura 15 - IDE do Visual Studio 2012



Fonte: Autoria própria.

A linguagem utilizada para a implementação do software de supervisão foi o Visual Basic (VB) devido aos conhecimentos prévios já adquiridos de sua estrutura e

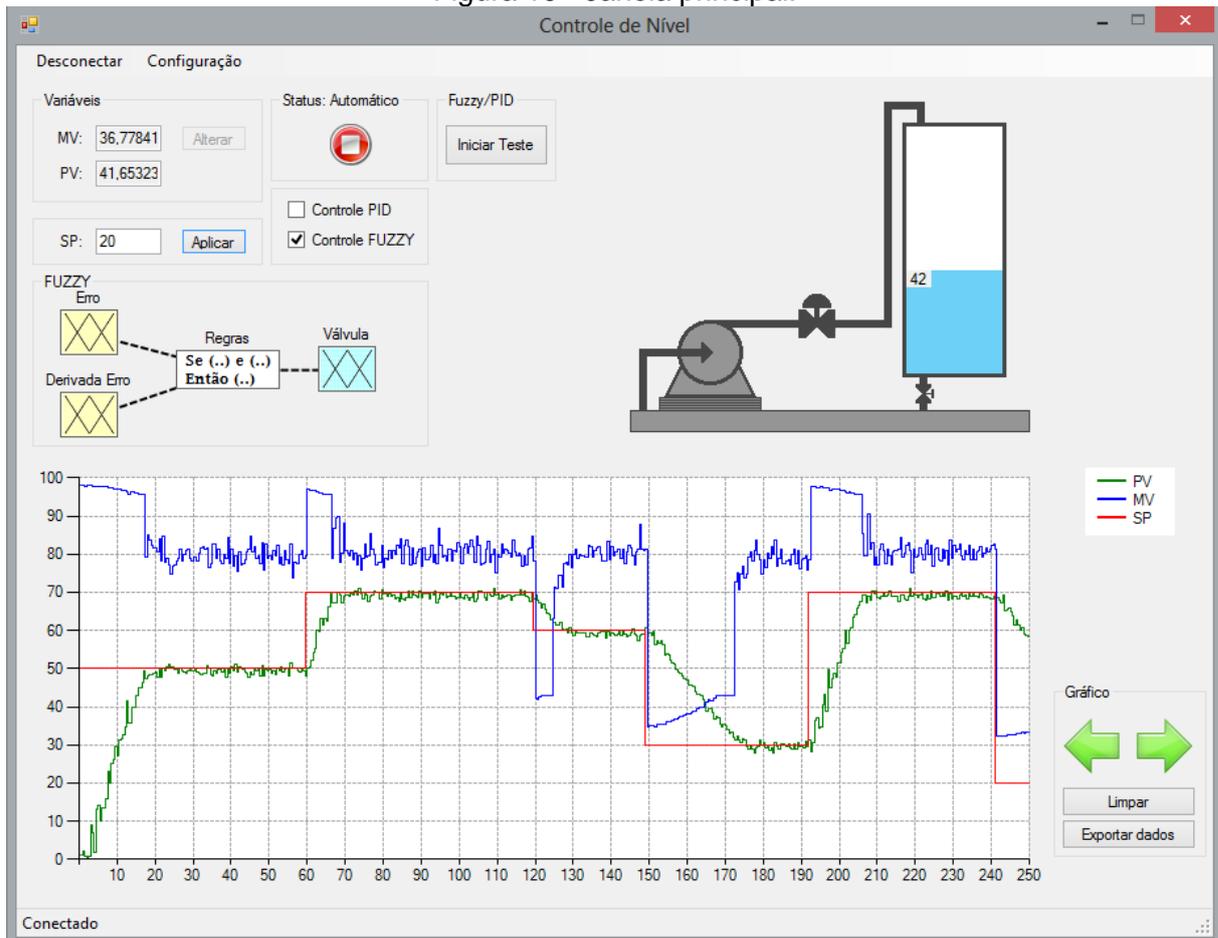
propriedades. Os programas escritos em VB se beneficiam da segurança e interoperabilidade da linguagem.

O projeto de criação do software foi elaborado na opção de desenvolvimento do Visual Studio denominada *Windows Application*. Essa se baseia no princípio do ambiente Windows, ou seja, na utilização de janelas, sendo um tipo de aplicação em que a interação com o usuário se dá por meio de formulários, chamados *Windows forms*.

Em um *form* é possível colocar botões, textos, imagens, gráficos, entradas de texto dentre outros itens para a criação de uma interface de fácil operação do programa para o usuário. O software desenvolvido neste trabalho é composto de seis *forms* que serão apresentados a seguir, com suas respectivas funcionalidades.

Em um programa do tipo *Windows Application*, há sempre um formulário que é executado primeiro, denominado de *startup form*. Esse nosso *form* é o denominado *frmPrincipal.vb*, que é a janela onde ocorre a supervisão das variáveis envolvidas no controle da planta didática de nível, através dos valores apresentados em forma numérica ou em forma de gráfico.

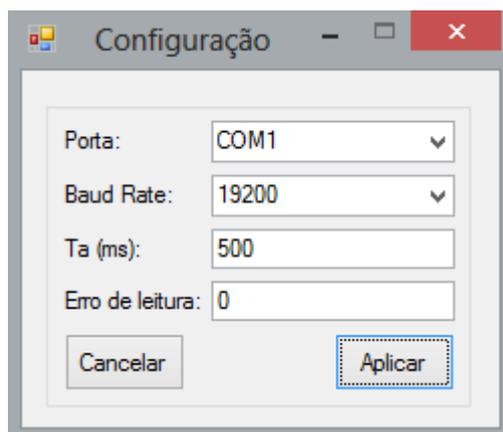
Figura 16 - Janela principal.



Fonte: Autoria própria.

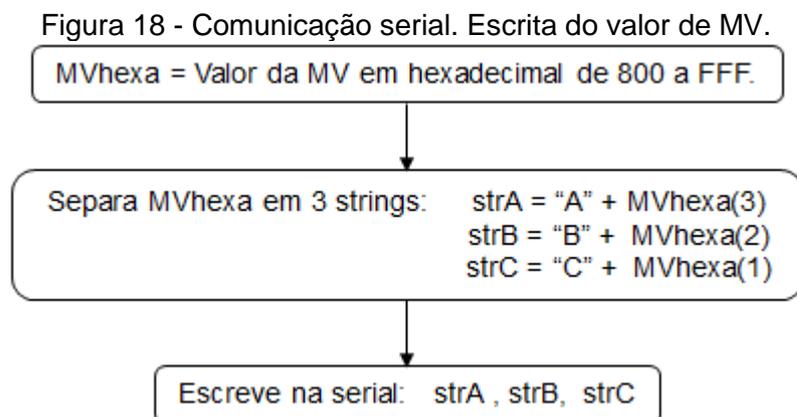
Primeiramente, para estabelecermos a comunicação entre nosso software e o módulo de conversão de sinais digital/analógico da planta, devemos clicar no botão “Configuração” localizado na parte superior da janela principal. Com isso, um novo *form* chamado *frmConfig.vb* é aberto. Nele definimos em qual porta serial do computador está conectado o módulo, a taxa de transmissão de dados (Baud Rate), o tempo de amostragem de leitura da variável de processo (PV), em milissegundos, e um valor de erro de leitura, para ajuste da faixa de *span* do transmissor de nível.

Figura 17 - Janela de configuração.



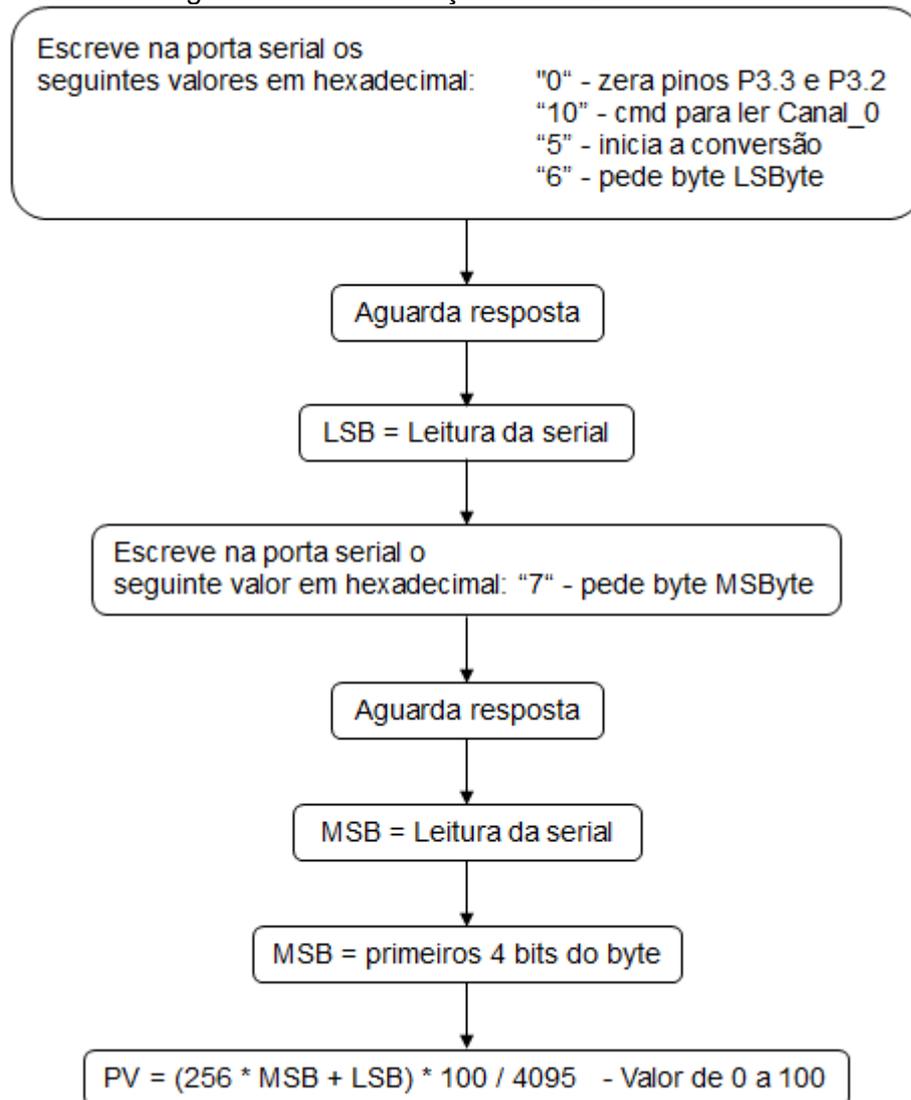
Fonte: Autoria própria.

Para a correta comunicação entre o computador e a planta didática, devemos utilizar a taxa de transmissão de dados em 19200 bits por segundo (bps). A seguir segue um fluxograma básico de como foi realizado a rotina para ler o valor de PV e escrever um valor de MV pelo software de supervisão, de acordo com o protocolo de comunicação da planta disponibilizado pelo professor Henrique Avelar (2011).



Fonte: Autoria própria.

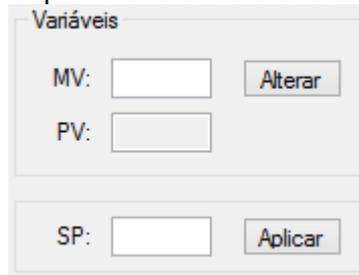
Figura 19 - Comunicação serial. Leitura da PV.



Fonte: Autoria própria.

No *frmPrincipal.vb* podemos definir o valor da variável manipulada (MV) no seu campo de texto, enquanto o sistema está em malha aberta. Nessa situação o sistema fica com o status em "Manual". Assim, o valor digitado no campo "MV" (de 0 a 100) corresponde à abertura da válvula de vazão que controla o fluxo de entrada de água no tanque. De forma similar, fazemos a alteração do valor de set-point (valor desejado do nível do tanque, variando de 0 a 100), que apenas terá efeito quando o sistema estiver em malha fechada, ou seja, quando o *status* estiver em "Automático".

Figura 20 - Campos para alterar o valor de MV e set-point (SP).



The image shows a control interface titled "Variáveis". It contains two input fields: "MV:" and "PV:". To the right of the "MV:" field is a button labeled "Alterar". Below these fields is another input field labeled "SP:" with a button labeled "Aplicar" to its right.

Fonte: Autoria própria.

Para alterarmos o estado do sistema entre malha aberta e malha fechada, basta clicar no botão *play* (sistema em malha fechada, status em “Automático”) ou no botão *stop* (sistema em malha aberta, status em “Manual”).

Figura 21 - Botão *Play*. Ao ser pressionado, altera o Status de “Manual” para “Automático”.



Fonte: Autoria própria.

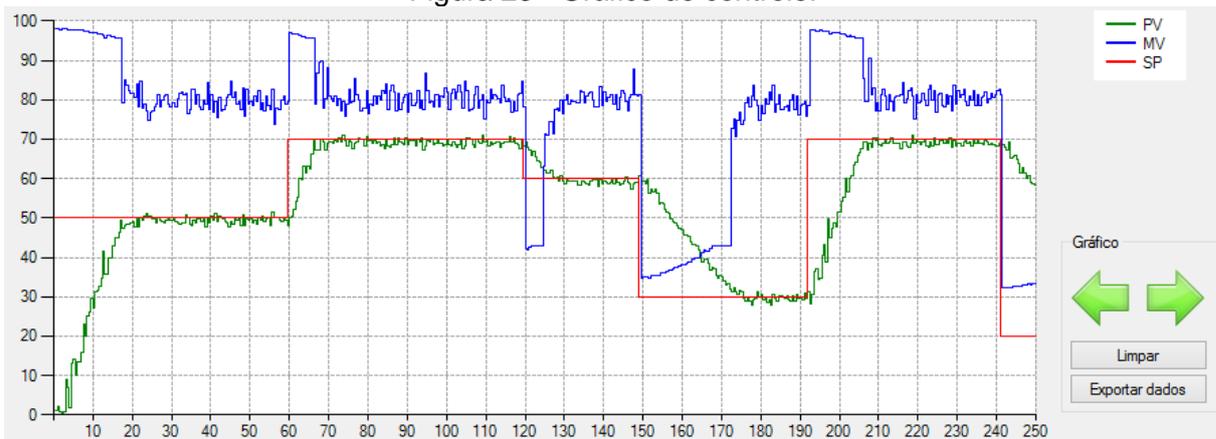
Figura 22- Botão *Stop*. Ao ser pressionado, altera o Status de “Automático” para “Manual”.



Fonte: Autoria própria.

Ainda na janela principal, temos um gráfico que apresenta em tempo real os valores de PV, MV e SP em uma escala de 0 a 100 no eixo vertical, pelo tempo no eixo horizontal.

Figura 23 - Gráfico de controle.



Fonte: Autoria própria.

Há um campo com duas setas para a navegação pelo gráfico, ou seja, para voltar (seta apontando para esquerda) ou para avançar (seta apontando para direita) pela linha cronológica visualizando os dados. Pode-se também apagar todos os dados do gráfico clicando no botão “Limpar”. Assim, os novos valores passam a ser inscritos a partir do momento zero na linha do tempo. Caso seja necessário, o software de supervisão permite exportar os valores das variáveis em uma planilha do *Microsoft Excel* para posterior análise. Para fazer isso, devemos pressionar o botão “Exportar dados” e em seguida escolher em qual diretório será salvo o arquivo.

Figura 24 - Campo para navegação pelo gráfico.



Fonte: Autoria própria.

Em qualquer momento pode-se alterar entre qualquer um dos dois controladores, fuzzy ou PID, selecionando o campo correspondente de cada um. Isso pode ser feito quando o sistema está em manual, possibilitando realizar ajustes de parâmetros nos controladores, ou em automático, alterando a ação de controle em tempo real, ou seja, durante o controle do processo. Se o sistema estiver em automático com algum dos controladores selecionado e, porventura, ao invés de alterar para outro

controlador, o usuário desmarcar o controlador que estava em uso, o sistema passa para o estado “Manual” automaticamente.

Figura 25 - Campos para seleção do controlador a ser utilizado.

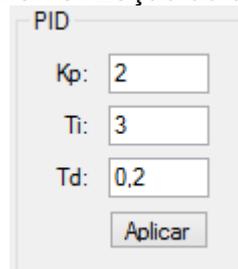


The image shows a control panel with two radio button options. The first option is labeled "Controle PID" and the second is labeled "Controle FUZZY". Both radio buttons are currently unselected.

Fonte: Autoria própria.

O ajuste dos parâmetros dos controladores pode ser feito tanto com o sistema em automático quanto em manual. Para isso, basta selecionar o controlador desejado. Quando o “Controle PID” está selecionado, são apresentadas, na janela principal, as possibilidades de ajuste de K_p , T_i e T_d .

Figura 26 - Parametrização do controlador PID.

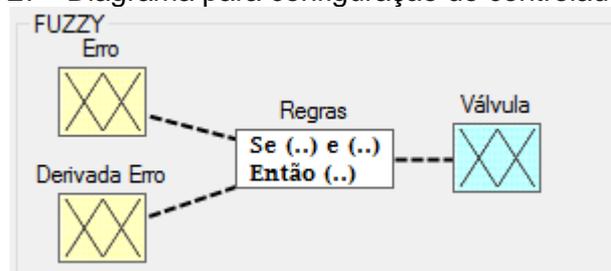


The image shows a form titled "PID" for parameterization. It contains three input fields: "Kp:" with the value "2", "Ti:" with the value "3", and "Td:" with the value "0,2". Below these fields is a button labeled "Aplicar".

Fonte: Autoria própria.

Se “Controle FUZZY” estiver selecionado, será mostrado um pequeno diagrama contendo as entradas fuzzy “Erro” e “Derivada Erro”, as “Regras” definidas pelo especialista no processo e a saída fuzzy “Válvula”. Cada um desses itens, ao ser clicado, abrirá um *form* para seu devido ajuste.

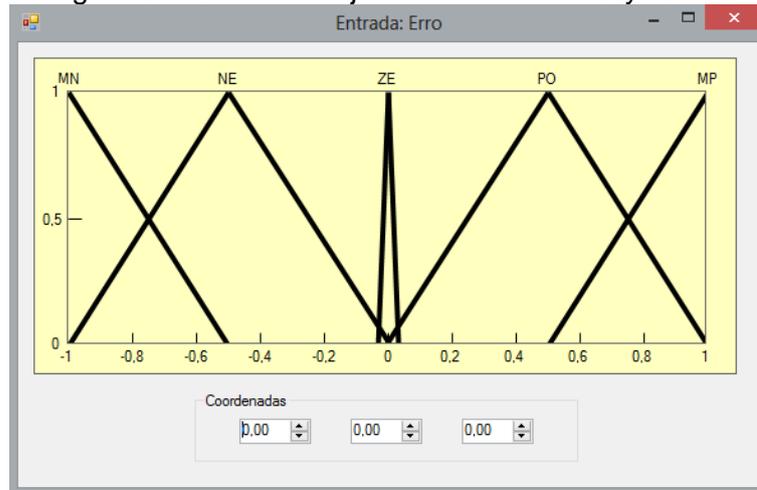
Figura 27 - Diagrama para configuração do controlador fuzzy.



Fonte: Autoria própria.

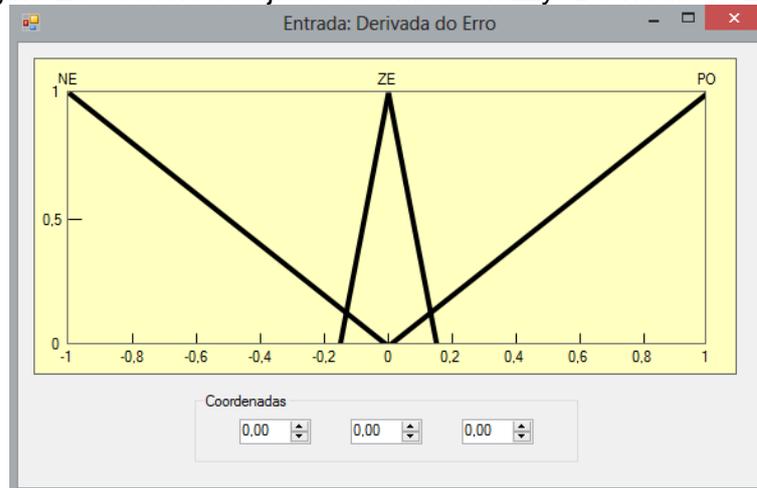
As imagens a seguir são das janelas de seus respectivos itens.

Figura 28 - Janela de ajuste da entrada fuzzy "Erro".



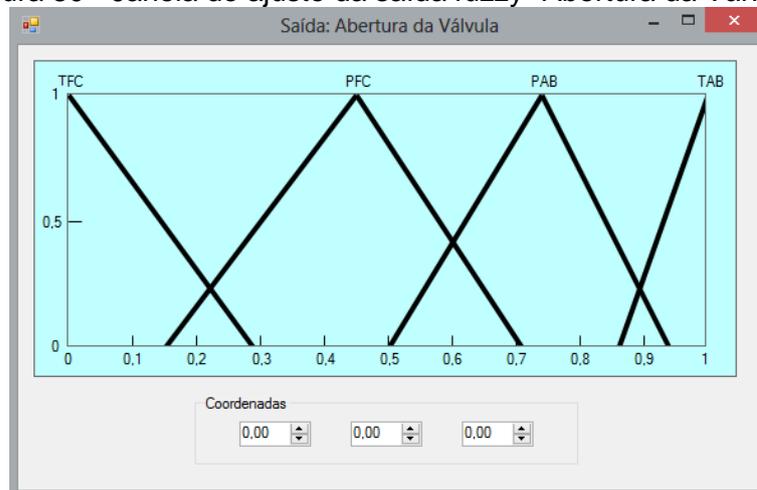
Fonte: Autoria própria.

Figura 29 - Janela de ajuste da entrada fuzzy "Derivada do Erro".



Fonte: Autoria própria.

Figura 30 - Janela de ajuste da saída fuzzy "Abertura da Válvula".



Fonte: Autoria própria.

Pode-se notar que os conjuntos fuzzy do nosso software são delimitados por funções de pertinência triangulares. Esses triângulos devem ser ajustados dentro da escala mostrada nas figuras anteriores de forma a melhor representar o sistema. Para fazer isso, selecionamos o triângulo a ser ajustado e utilizamos do campo denominado “Coordenadas”. Quando selecionado o triângulo, suas arestas ficam na cor vermelha, permitindo a realocação de seus vértices. Isso pode ser feito com o sistema em manual ou mesmo em automático, sob a ação de controle fuzzy.

As siglas colocadas sobre cada triângulo são a abreviatura do nome de cada conjunto fuzzy. São eles:

MN – Muito negativo;

NE – Negativo;

ZE – Zero;

PO – Positivo;

MP – Muito positivo;

TFC – Totalmente fechada;

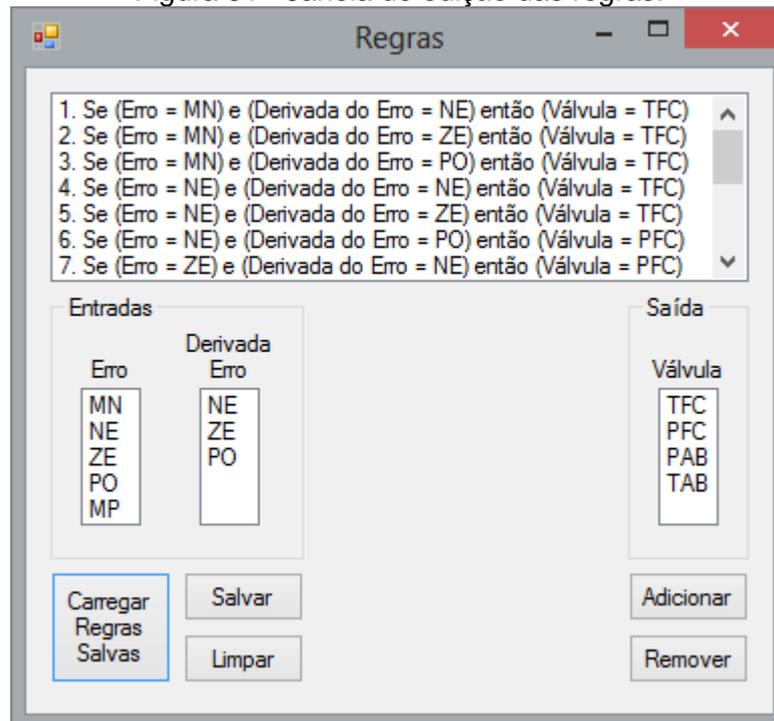
PFC – Parcialmente fechada;

PAB – Parcialmente aberta;

TAB – Totalmente aberta.

No *form frmRegrasFuzzy.vb* defina quais são as regras que serão empregadas no processo de inferência fuzzy. Para adicionar uma regra, deve-se selecionar qual é o conjunto das duas entradas e qual é o conjunto da saída e, em seguida, pressionar o botão “Adicionar”. A regra ficará conforme o modelo na figura abaixo.

Figura 31 - Janela de edição das regras.

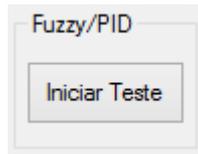


Fonte: Autoria própria.

Para excluir uma regra, basta selecioná-la e pressionar o botão “Remover”. Pode-se optar também por excluir todas as regras, pressionando o botão “Limpar”. É possível guardar as regras mostradas nessa janela pressionando o botão “Salvar”, para posterior uso, sem ter que adicionar uma a uma. Assim, esses dados ficarão salvos em um arquivo de texto. Para carregá-los, basta pressionar o botão “Carregar regras salvas”.

O botão “Iniciar Teste”, ao ser pressionado, é responsável por comandar o sistema de controle realizando testes através da resposta em degrau, facilitando o levantamento de dados para comparação de desempenho sem a intervenção do usuário. Primeiramente, utiliza-se o controlador fuzzy, aplicando degraus de 10 em 10% do SP em intervalos de 40 segundos, percorrendo toda a escala, de forma autônoma. Após isso, o sistema espera o tanque esvaziar e realiza o mesmo procedimento utilizando o controlador fuzzy. A qualquer momento podemos clicar sobre o mesmo botão, agora com texto “Encerrar Teste”, para encerrar o teste.

Figura 32 - Botão para realizar testes de forma autônoma com os controladores.



Fonte: Autoria própria.

A interface gráfica, de um modo geral, é de simples manuseio e muito intuitiva. Resumidamente, nela podemos alterar o estado do sistema entre automático e manual, o valor de MV (enquanto em manual), o valor de SP, alternar entre os controladores fuzzy e PID, supervisionar os valores de PV e MV, definir os parâmetros de PID enquanto controlamos o processo, redefinir a forma das funções de pertinência de cada conjunto fuzzy e editar as regras enquanto se faz o controle do nível.

4.2 ESTUDO DA PLANTA DE NÍVEL

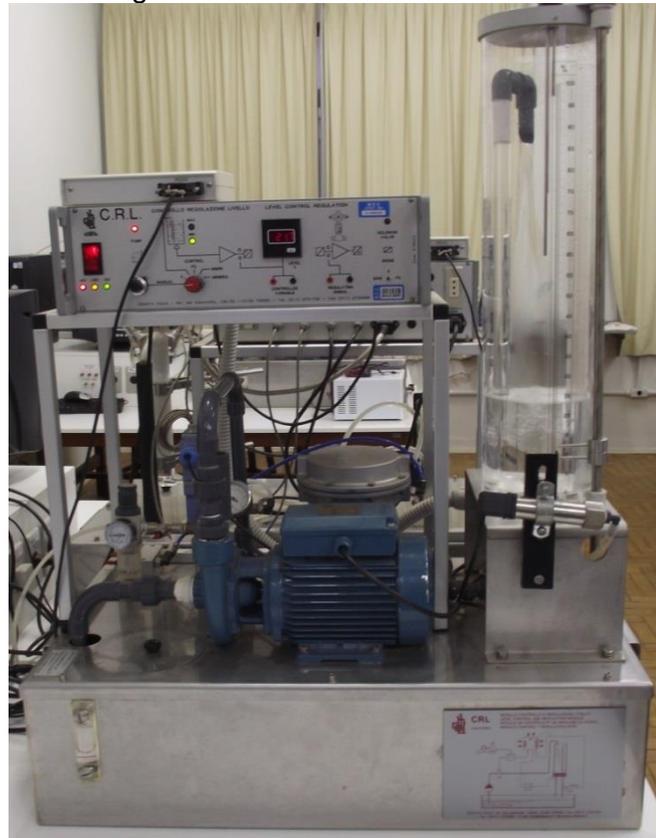
Plantas didáticas são frequentemente encontradas em laboratórios de universidades com o intuito de proporcionar aos alunos um complemento aos assuntos estudados em matérias teóricas. Elas devem simular ambientes industriais em pequena escala, possibilitando a operação e compreensão de malhas de controle, bem como o estudo de seus instrumentos.

Nesse trabalho estamos utilizando a planta didática de nível da marca *Didacta*, localizada no laboratório de controle e automação do CEFET-MG Campus IV. Ela é composta pelos seguintes itens:

- Bomba + Motor (0,5HP);
- Conversor 4-20mA / 3-15psi;
- Válvula de controle (acionamento pneumático);
- Tanque (graduado, de 0 a 100);
- Transmissor de nível (através da pressão exercida pela coluna de água);
- Conversor analógico/digital;
- Válvula solenoide;
- Válvula manual e;

- Reservatório de água.

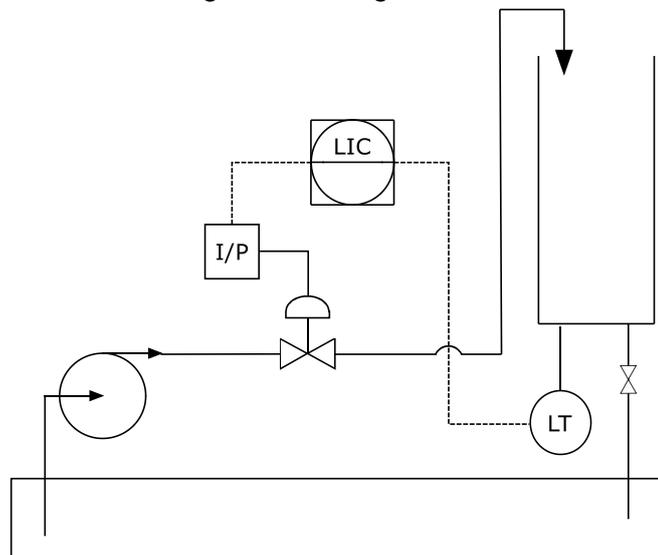
Figura 33 - Planta didática de nível.



Fonte: Autoria própria.

Abaixo segue diagrama P&I simplificado do processo:

Figura 34 - Diagrama P&I



Fonte: Autoria própria.

Notamos que o arranjo da planta é bastante simples, isso facilita o seu entendimento e facilita a análise dos resultados obtidos, sendo o objetivo desse trabalho comparar o desempenho de cada controlador. Basicamente, a função dos controladores aqui é manter o nível de água constante no tanque graduado em um valor pré-determinado (valor de set-point). Para isso, o sensor de pressão envia um sinal de 4 a 20mA correspondente à altura da coluna de água para um módulo conversor de sinais analógico/digital. O software de supervisão desenvolvido por nós recebe essa informação através de comunicação serial, faz os devidos processamentos e envia a ação de controle ao conversor. Essa ação será convertida para 4 a 20mA, que correspondem a abertura da válvula que permite a entrada de água no tanque. Como essa válvula de vazão possui acionamento pneumático, o sinal de 4 a 20mA é convertido para um sinal pneumático de 3 a 15psi.

Figura 35 - Válvula de controle com acionamento pneumático.



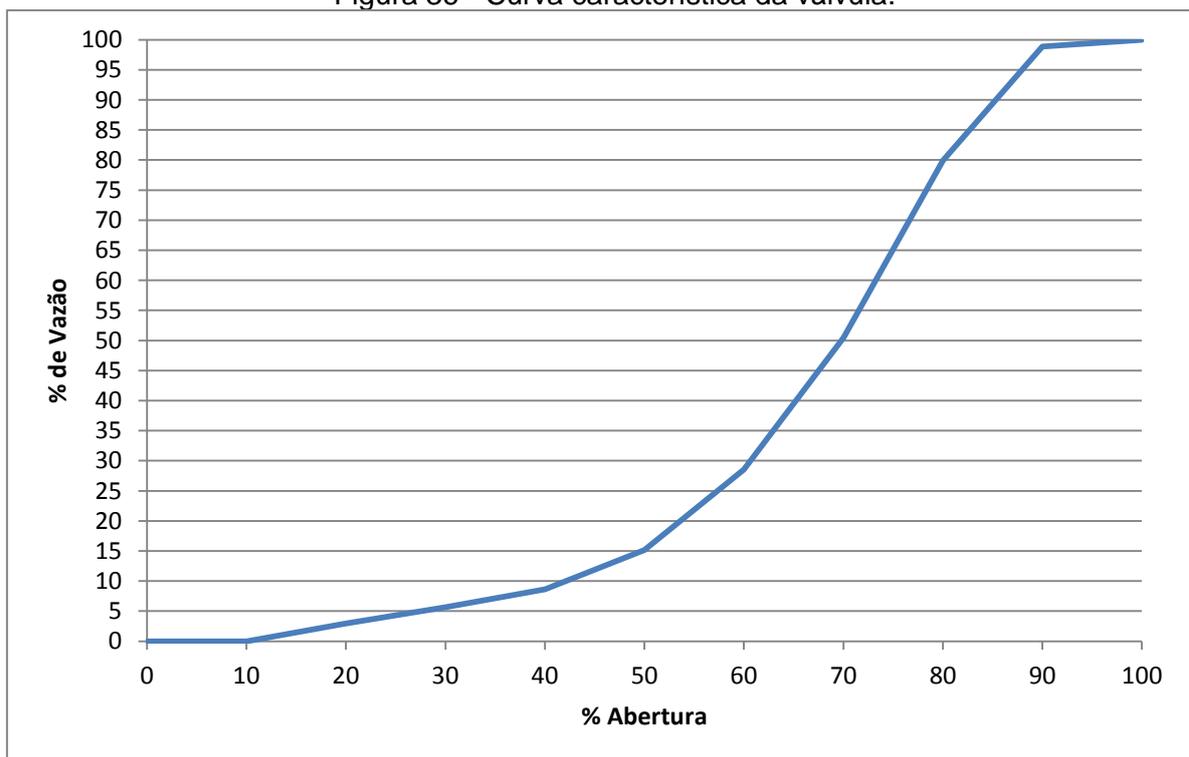
Fonte: Autoria própria.

Uma das dificuldades em se realizar o controle de nível nessa planta está relacionada ao funcionamento dessa válvula. Além de possuir características típicas de não-linearidade, comuns nesse tipo de equipamento, essa válvula em específico está com um problema em que seu diafragma fica preso em certas ocasiões, necessitando de uma manutenção corretiva ou mesmo de sua substituição. Ocorre que, em um primeiro momento com um determinado valor pneumático, a válvula permite certa quantidade de vazão e, em um segundo momento, com o mesmo valor, a válvula permite outra quantidade de vazão diferente da primeira.

Por causa dessas informações imprecisas estarem presentes no processo justificamos o uso de um controlador fuzzy. Mesmo que o controlador PID ainda apresente resultados satisfatórios, ele tem seus ganhos ajustados para um ponto de funcionamento da planta. Assim, nossos testes serão realizados aplicando degraus no set-point percorrendo toda a região de controle a fim de abranger todo o estado de abertura da válvula.

A figura a seguir representa uma aproximação da curva característica da válvula de controle da planta de nível. Para levantarmos essa curva, utilizamos o software desenvolvido por nós e geramos gráficos para cada abertura da válvula de 0 a 100% de 10 em 10%, com a válvula de saída de água do tanque fechada. Assim, o coeficiente angular de cada reta em cada gráfico (tempo x %PV) é proporcional à vazão.

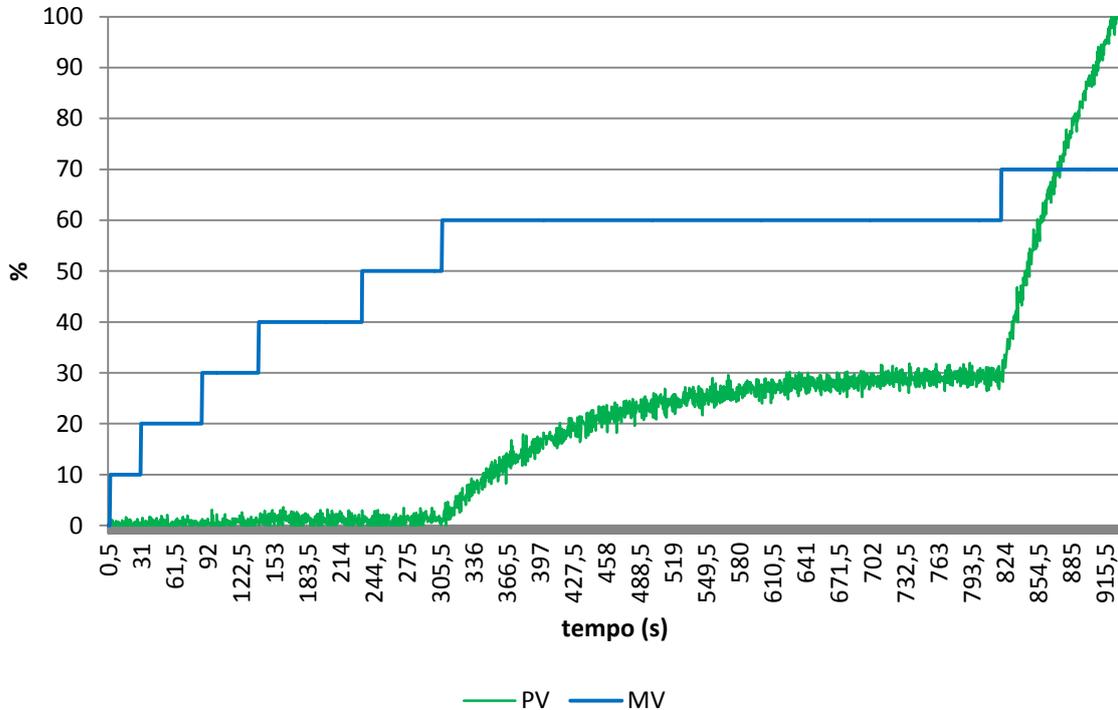
Figura 36 - Curva característica da válvula.



Fonte: Autoria própria.

Podemos notar o comportamento do sistema em malha aberta pelo gráfico a seguir.

Figura 37 - Comportamento do sistema à entrada em degrau. Sistema em malha aberta.

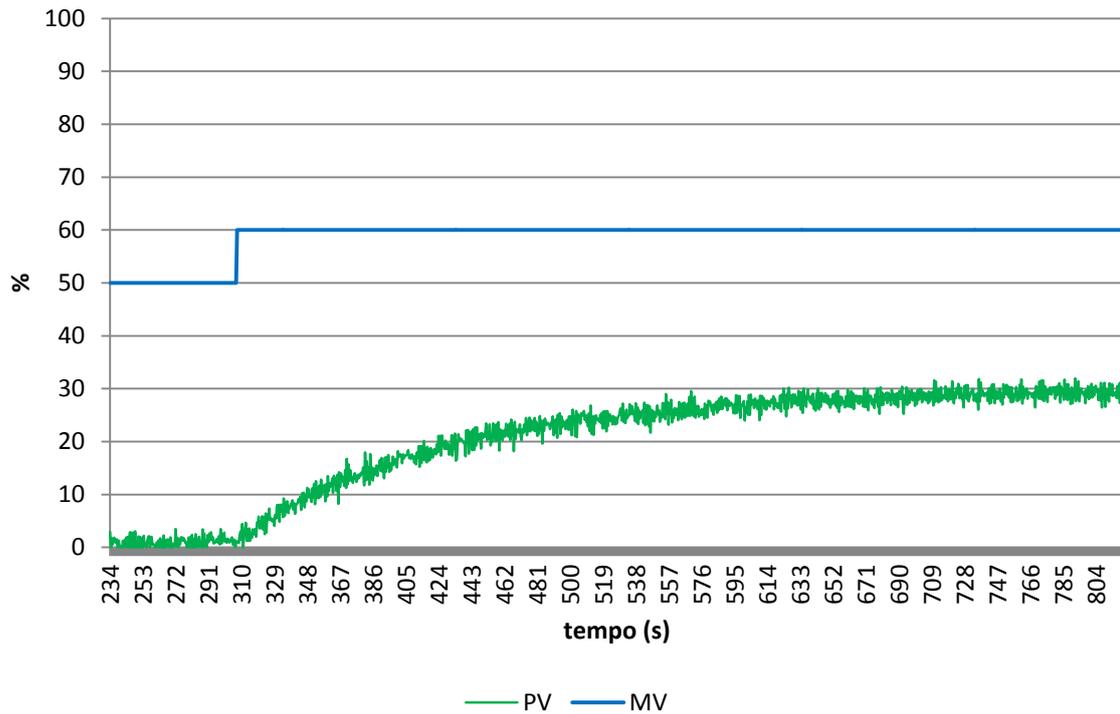


Fonte: Autoria própria.

A vazão de entrada no tanque é praticamente nula até o valor de 20% da variável manipulada, ou seja, na faixa de 0 a 100% de utilização da MV, teremos vazão apenas acima de 20%. O nível do tanque permanece praticamente nulo até o valor de 50% da MV. Notamos pelo gráfico que após o degrau de 50 para 60%, o nível (PV) se estabiliza por volta de 30%, e que no próximo degrau, em 70% do valor de MV o sistema já fica saturado, ou seja, o valor de PV ultrapassa os 100%.

Utilizamos a resposta em degrau de 50 a 60% de MV para identificarmos o sistema nessa faixa de operação.

Figura 38 - Resposta em degrau utilizada para identificação do sistema.



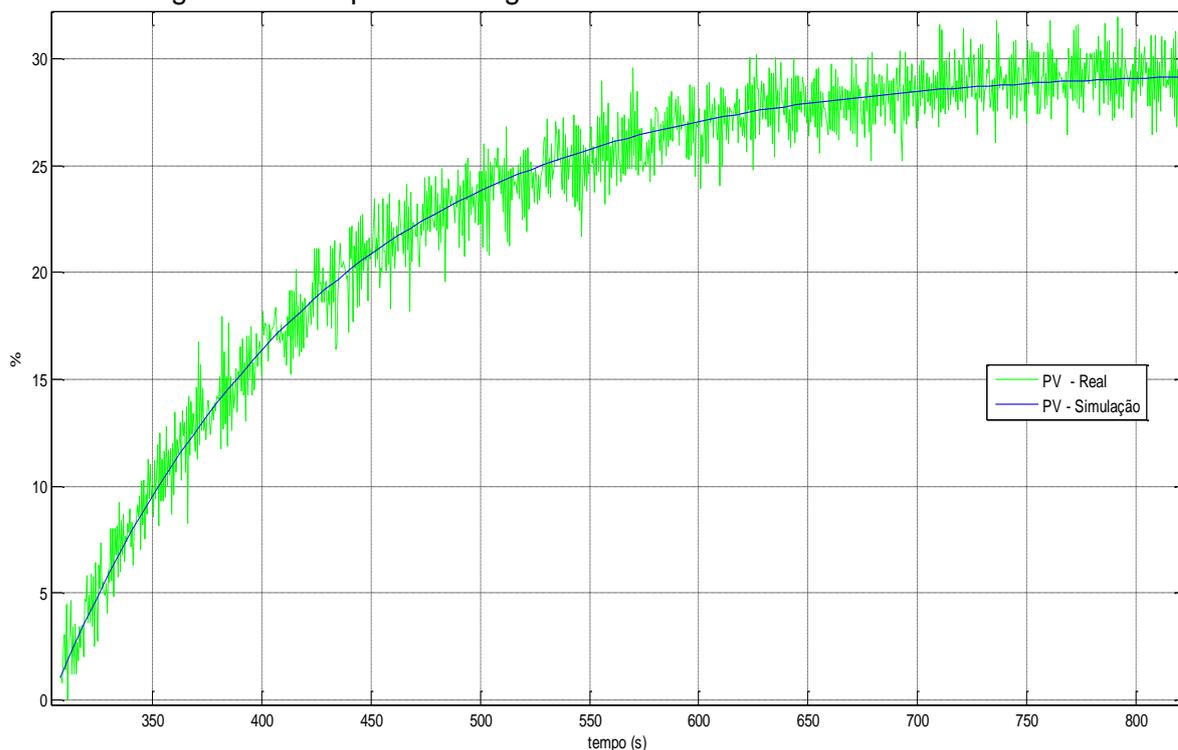
Fonte: Autoria própria.

Podemos verificar que nessa faixa de operação o sistema parece se comportar como sistema de primeira ordem, com ganho de 2,85 e constante de tempo de 120 segundos, que nos remete a seguinte função de transferência:

$$G = \frac{2,85}{120s + 1}$$

Utilizamos o software Matlab para simular uma resposta ao degrau do sistema identificado e plotamos sob os valores reais da planta.

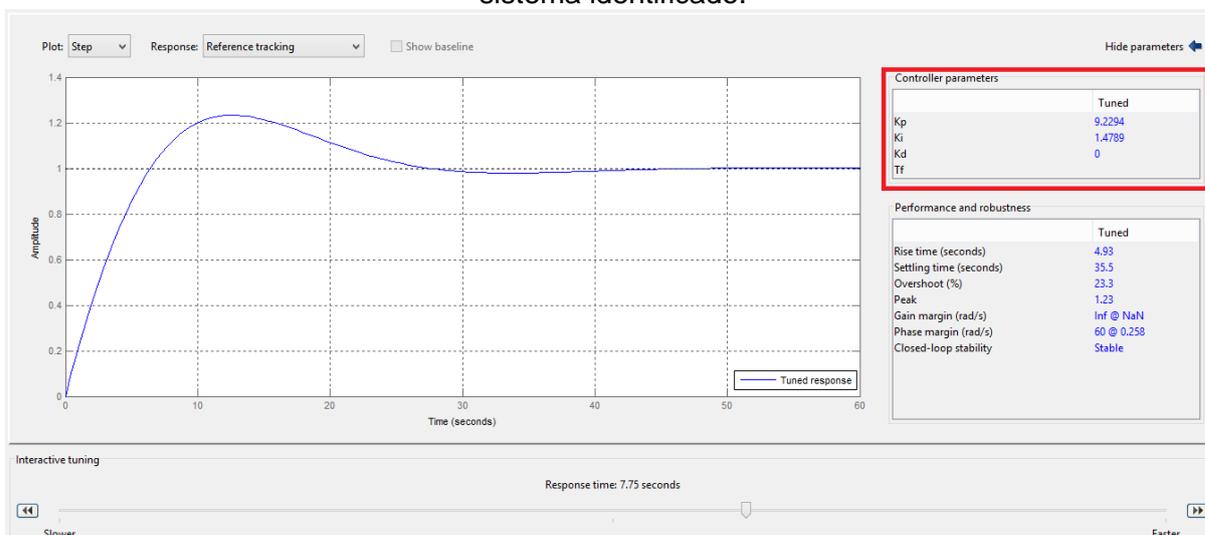
Figura 39 - Resposta ao degrau - Sistema identificado e sistema real.



Fonte: Autoria própria.

Nenhum dos métodos de Ziegler-Nichols apresentou as respostas desejadas na planta de nível, portanto não puderam ser aplicados para sintonia do controlador PID. Pela imagem anterior visualiza-se que foi possível identificar o sistema de forma satisfatória, sendo assim, utilizamos a *toolbox* do Matlab *PID Tuning*, que através de uma função de transferência, define os parâmetros do controlador para determinado tempo de resposta. A imagem a seguir mostra a ferramenta *PID Tuning* com a resposta em degrau do sistema identificado com os ganhos determinados pelo tempo de resposta escolhido (*Response time*: 7,75s; $K_p = 9,2294$; $K_i = 1,4789$; $K_d = 0$).

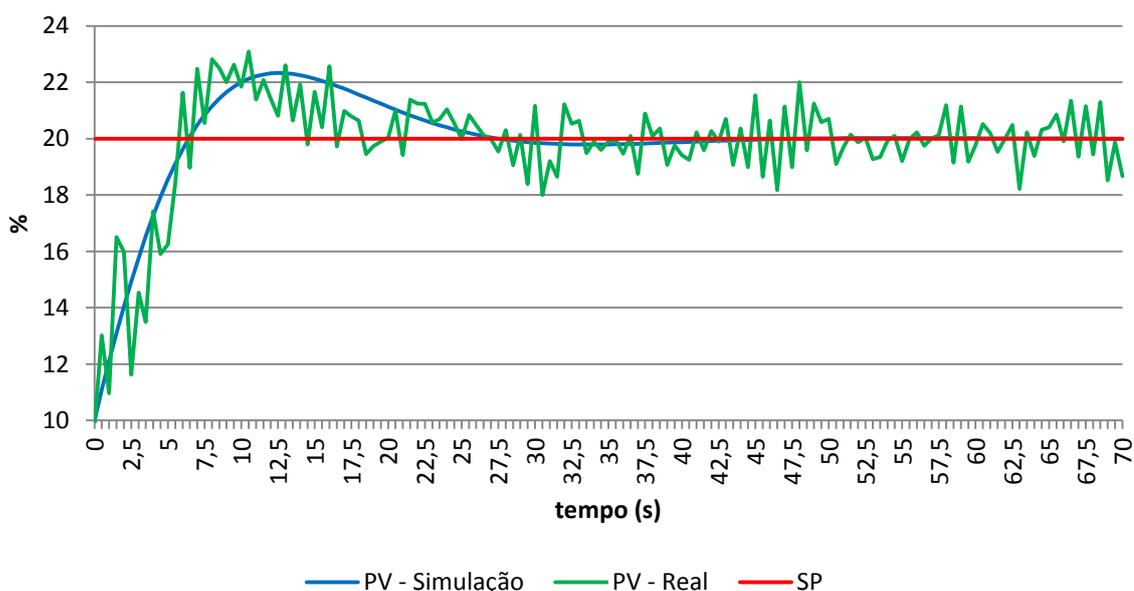
Figura 40 – *Toolbox - PID Tuning*. Determinação dos parâmetros do controlador PID para o sistema identificado.



Fonte: Autoria própria.

Utilizando o Matlab simulamos a resposta em degrau do sistema com os ganhos encontrados pelo *PID Tuning* e plotamos sobre a resposta do sistema real para o mesmo degrau (SP=10 para SP=20). Como o degrau foi feito dentro da faixa cujo sistema foi identificado, a resposta da planta assimilou-se satisfatoriamente com a resposta da simulação, validando assim os ganhos encontrados para o controlador PID.

Figura 41 - Resposta ao degrau utilizando os parâmetros encontrados para o controlador PID.



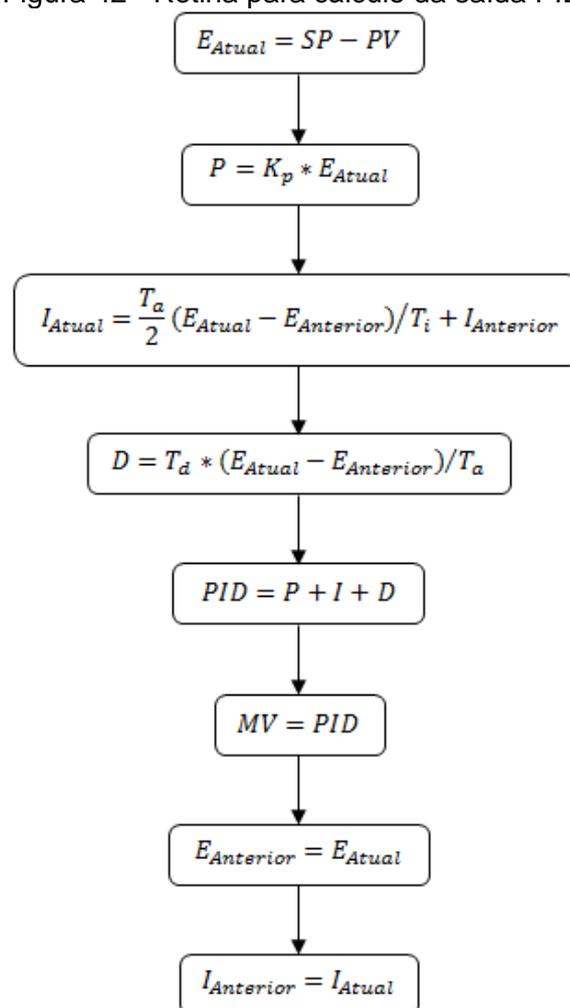
Fonte: Autoria própria.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DOS CONTROLADORES

Para implementar os controladores desse trabalho utilizamos um temporizador no *Visual Studio* que executa uma rotina a cada período determinado pelo tempo de amostragem estabelecido na janela de configuração do software de supervisão. Assim, em cada intervalo de tempo, fazemos a leitura da PV e realizamos os devidos cálculos para o controlador que está sendo executado e definimos o valor de MV que proporcionará a ação de controle desejada.

A rotina de cálculo do controlador PID é bastante simples e foi implementada em poucas linhas de programação. Utilizamos a estrutura PID paralela, onde há uma maior independência entre os ajustes dos ganhos. A seguir é apresentado um fluxograma mostrando as etapas para se calcular a saída desse controlador.

Figura 42 - Rotina para cálculo da saída PID.



Fonte: Autoria própria.

Foi necessário a utilização de muitas linhas de programação para implementar o controlador fuzzy, uma vez que o software desenvolvido deveria interpretar as configurações do processo inseridas pelo especialista, como as entradas e a saída fuzzy e sua base de conhecimento (regras fuzzy).

Toda essa rotina pode ser visualizada no arquivo do *Visual Studio* do projeto do software no ANEXO A. A seguir iremos descrever como o cálculo da saída do controlador foi estruturado.

Primeiramente, devemos calcular as entradas fuzzy “erro atual” e “derivada do erro” para que depois percorramos todas as regras inseridas pelo usuário, uma a uma.

Para cada regra iremos:

- Verificar qual é o conjunto da variável de entrada Fuzzy “Erro” da regra;
- Verificar qual é o conjunto da variável de entrada Fuzzy “Derivada do Erro” da regra;
- Calcular o grau de pertinência das variáveis em seus conjuntos, levando em consideração os vértices dos triângulos que determinam as funções de pertinência;
- Verificar qual é o conjunto da variável de saída Fuzzy “Abertura da Válvula” da regra e;
- Atribuir o grau de pertinência ao conjunto de saída da regra, levando em consideração o operador mínimo entre o grau de pertinência das entradas.

Após esse processo, calculamos o centroide da figura formada pelos conjuntos de saída com grau de pertinência maior que zero, utilizando o valor do centroide do triângulo de cada conjunto e a área entre o grau de pertinência e sua base.

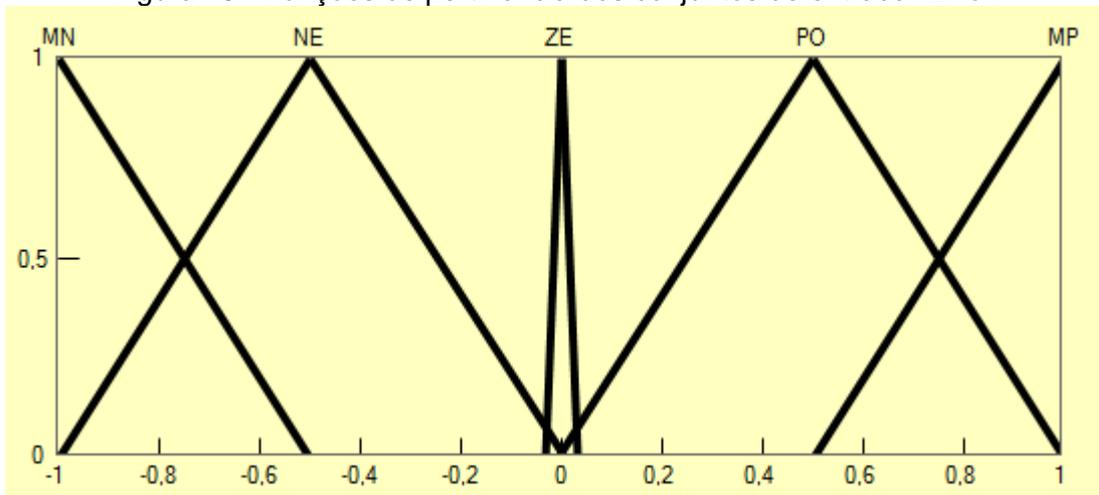
Após todos os cálculos, teremos um valor que corresponde ao valor de MV, de 0 a 100%.

5 RESULTADOS

Os testes para comparação de resultados foram realizados através da aplicação de degraus no set-point utilizando a função "teste" disponível no software de supervisão.

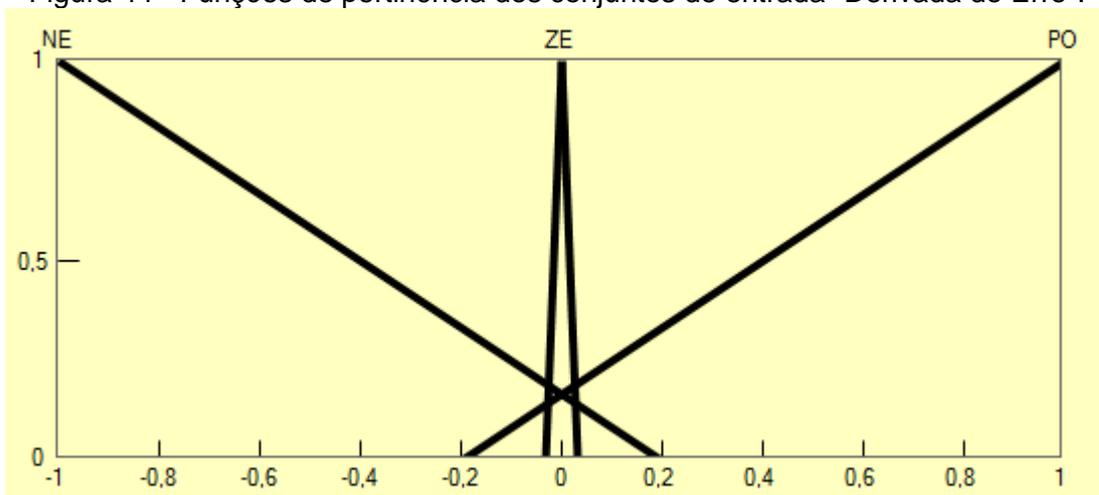
O controlador fuzzy foi ajustado da seguinte maneira:

Figura 43 - Funções de pertinência dos conjuntos de entrada "Erro".



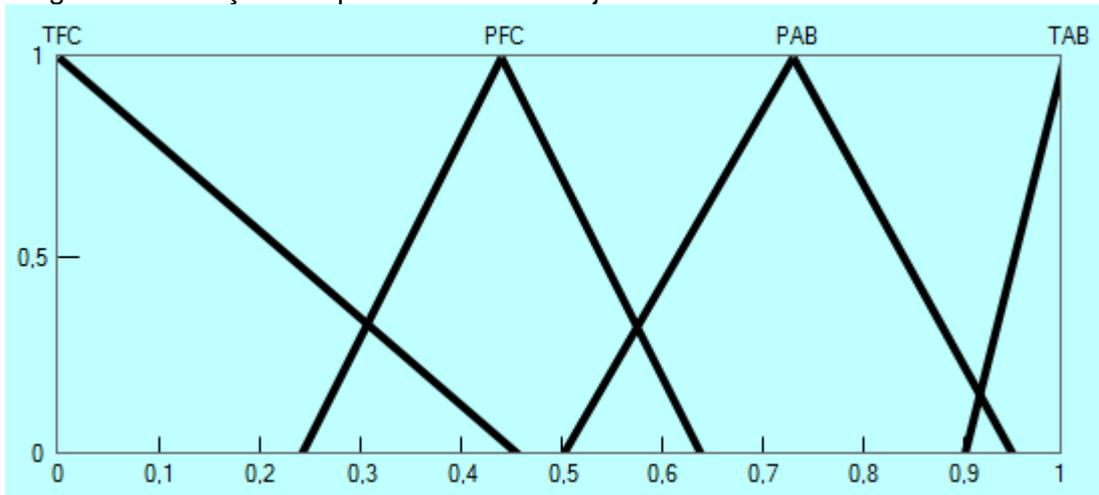
Fonte: Autoria própria.

Figura 44 - Funções de pertinência dos conjuntos de entrada "Derivada do Erro".



Fonte: Autoria própria.

Figura 45 - Funções de pertinência dos conjuntos de saída "Abertura da Válvula".



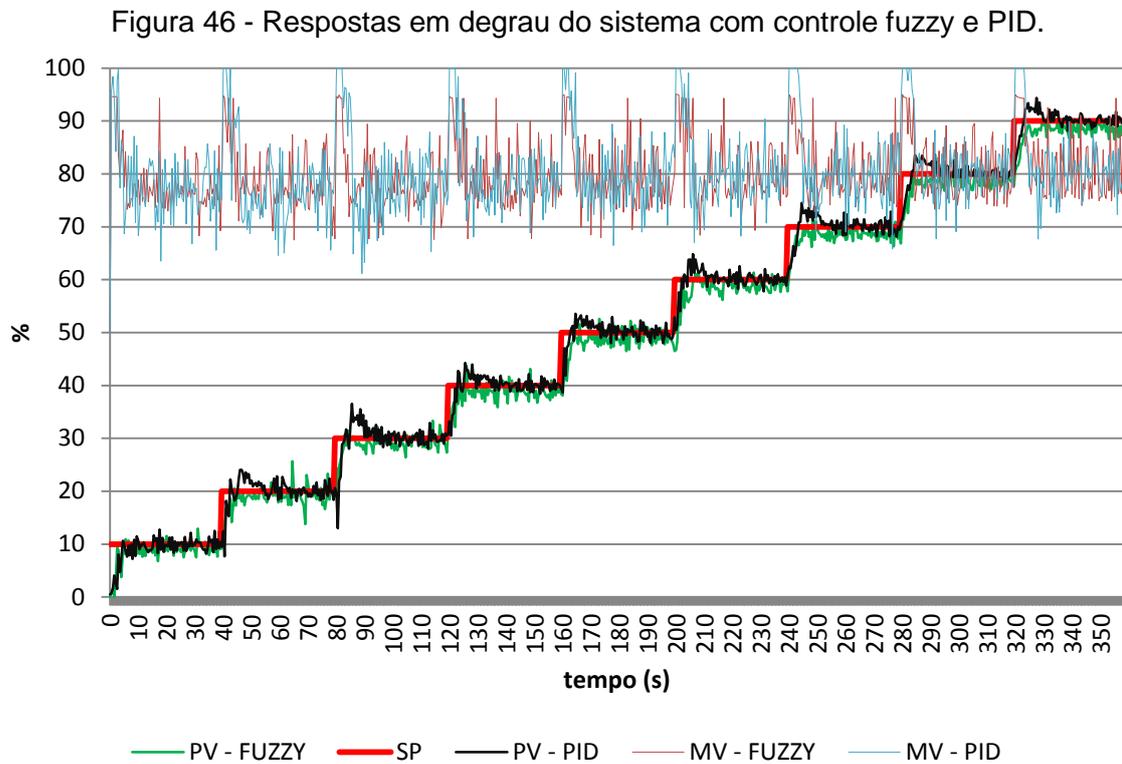
Fonte: Autoria própria.

As regras utilizadas no teste que melhor representaram o sistema foram:

01. Se (Erro = MN) e (Derivada do Erro = NE) então (Válvula = TFC)
02. Se (Erro = MN) e (Derivada do Erro = ZE) então (Válvula = TFC)
03. Se (Erro = MN) e (Derivada do Erro = PO) então (Válvula = TFC)
04. Se (Erro = NE) e (Derivada do Erro = NE) então (Válvula = TFC)
05. Se (Erro = NE) e (Derivada do Erro = ZE) então (Válvula = TFC)
06. Se (Erro = NE) e (Derivada do Erro = PO) então (Válvula = PFC)
07. Se (Erro = ZE) e (Derivada do Erro = NE) então (Válvula = PFC)
08. Se (Erro = ZE) e (Derivada do Erro = ZE) então (Válvula = PFC)
09. Se (Erro = ZE) e (Derivada do Erro = PO) então (Válvula = PAB)
10. Se (Erro = PO) e (Derivada do Erro = NE) então (Válvula = PAB)
11. Se (Erro = PO) e (Derivada do Erro = ZE) então (Válvula = TAB)
12. Se (Erro = PO) e (Derivada do Erro = PO) então (Válvula = TAB)
13. Se (Erro = MP) e (Derivada do Erro = NE) então (Válvula = TAB)
14. Se (Erro = MP) e (Derivada do Erro = ZE) então (Válvula = TAB)
15. Se (Erro = MP) e (Derivada do Erro = PO) então (Válvula = TAB)

Utilizamos os valores fornecidos pela ferramenta *PID Tuning* do *Matlab* para parametrizar o controlador PID. São eles: $K_p = 9,2294$; $T_i = 0,6762$ e $T_d = 0$.

A seguir apresentamos o resultado que servirá como base para a análise de desempenho dos controladores. Os dados foram exportados pelo software de supervisão desenvolvido por nós e os gráficos foram gerados utilizando o software *Microsoft Excel*.

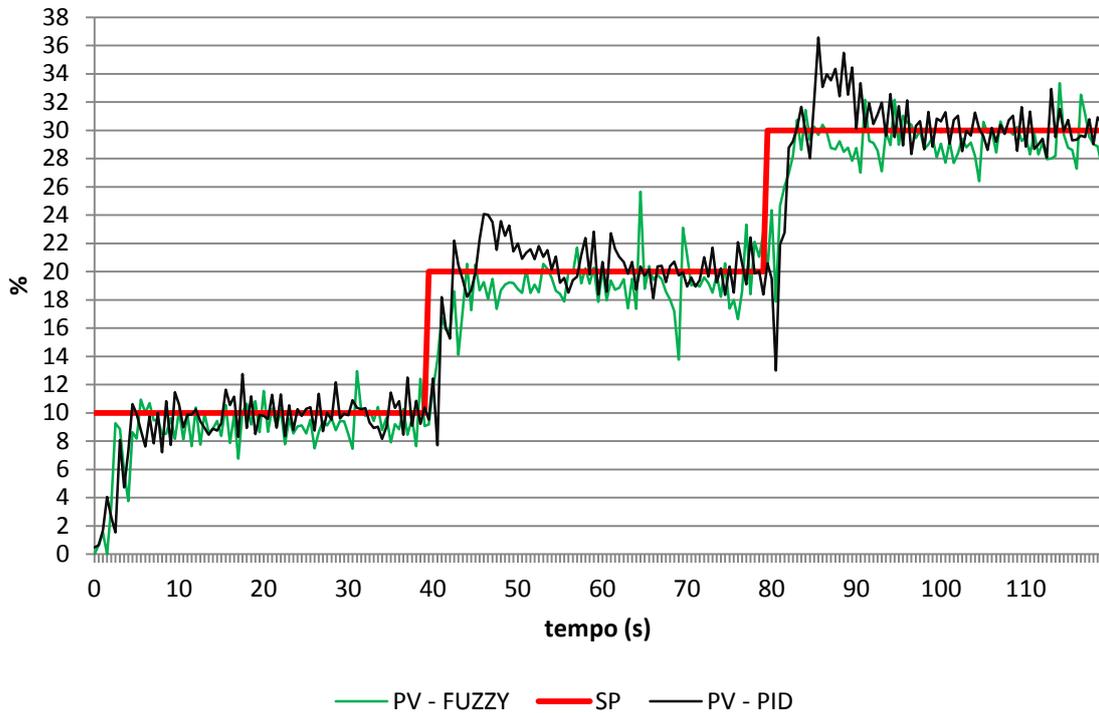


Fonte: Autoria própria.

Analisando a imagem, notamos que os valores de MV mantiveram-se dentro de uma pequena faixa de valores, variando entre aproximadamente 70 a 90%, com alguns picos em 100% na MV do controlador PID. Esse valor não foi atingido pela MV no controlador fuzzy pelo fato de que o centro de massa da figura formada pelos conjuntos de saídas ativados (ou seja, com grau de pertinência maior que zero) nunca ficará em 1, que é o valor máximo da abcissa dos conjuntos de saída fuzzy. Embora muito parecidas, notamos uma maior suavidade na MV do controlador fuzzy, quando comparada a variável do controlador PID.

As imagens seguintes mostram mais detalhes dos degraus aplicados ao set-point. Nesta primeira, apresentamos os degraus que estão dentro da faixa cujo sistema foi identificado.

Figura 47 - Comparação entre a variável de processo dos controladores fuzzy e PID.
Degraus: 10, 20 e 30.



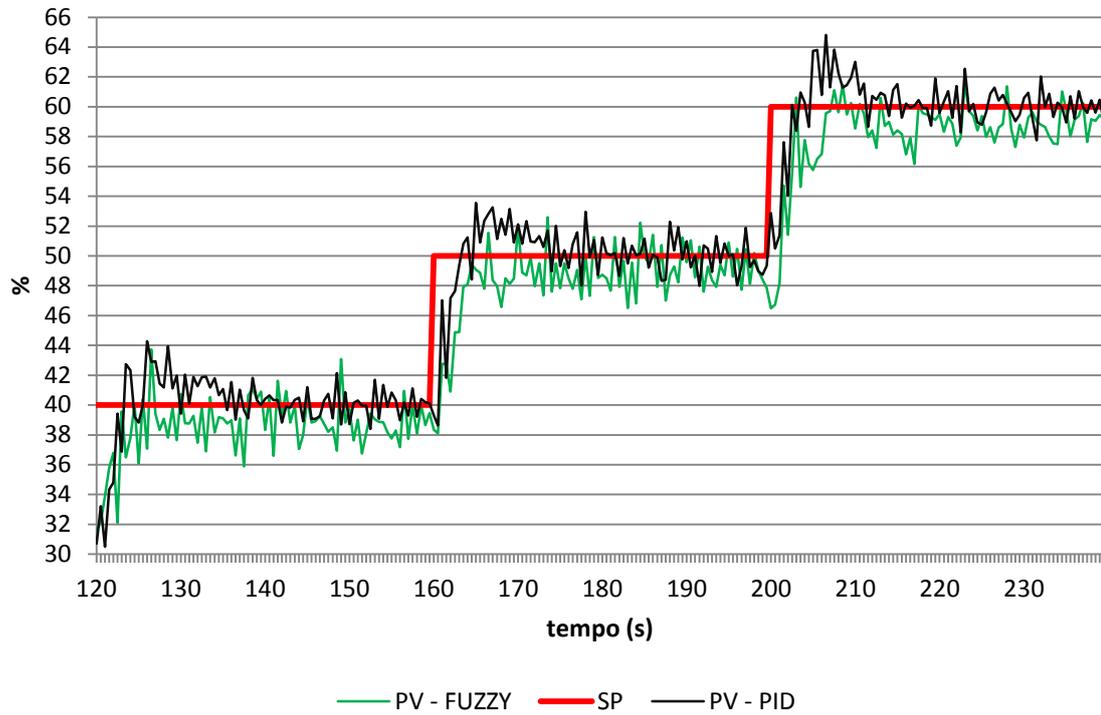
Fonte: Autoria própria.

Notamos um bom desempenho do controlador PID nos dois primeiros degraus. Isso se deve pelo fato de termos definido seus parâmetros dentro dessa faixa de operação. Percebe-se que conforme aumentamos o SP há tendência de aumento do overshoot e do tempo de acomodação (degraus 2 e 3).

O controlador fuzzy apresentou desempenho bem uniforme nos três degraus, assemelhando-se com a resposta do primeiro degrau utilizando PID.

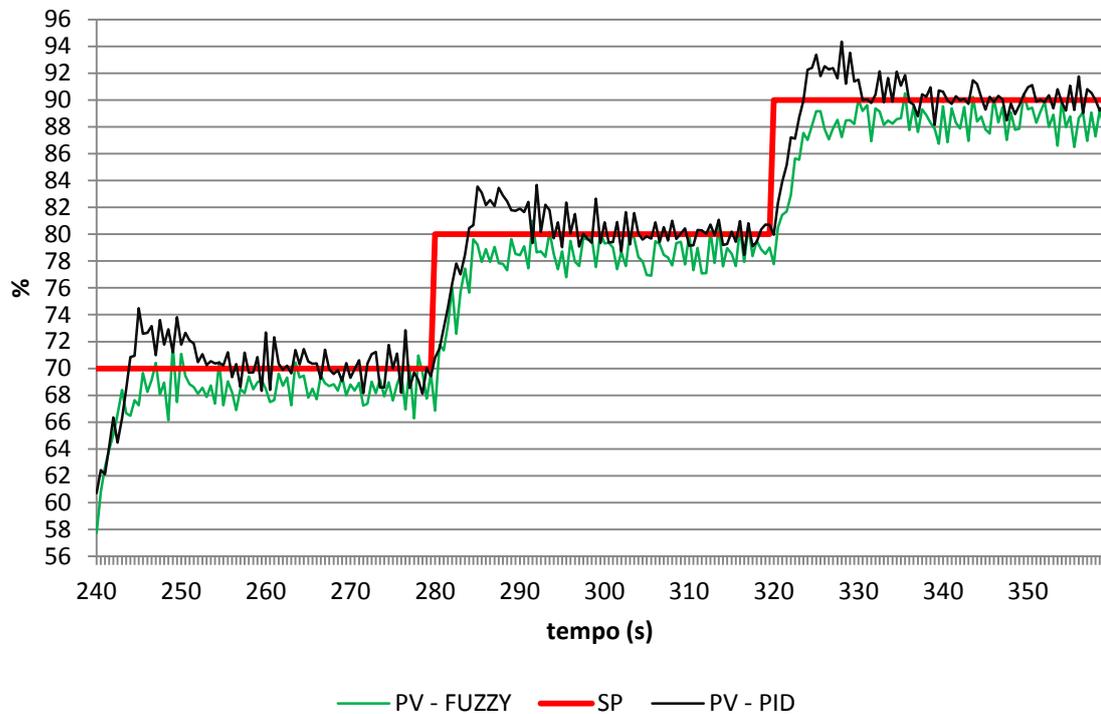
As próximas figuras nos mostram as respostas para os degraus seguintes.

Figura 48 - Comparação entre a variável de processo dos controladores fuzzy e PID.
Degraus: 40, 50 e 60.



Fonte: Autoria própria.

Figura 49 - Comparação entre a variável de processo dos controladores fuzzy e PID.
Degraus: 70, 80 e 90.

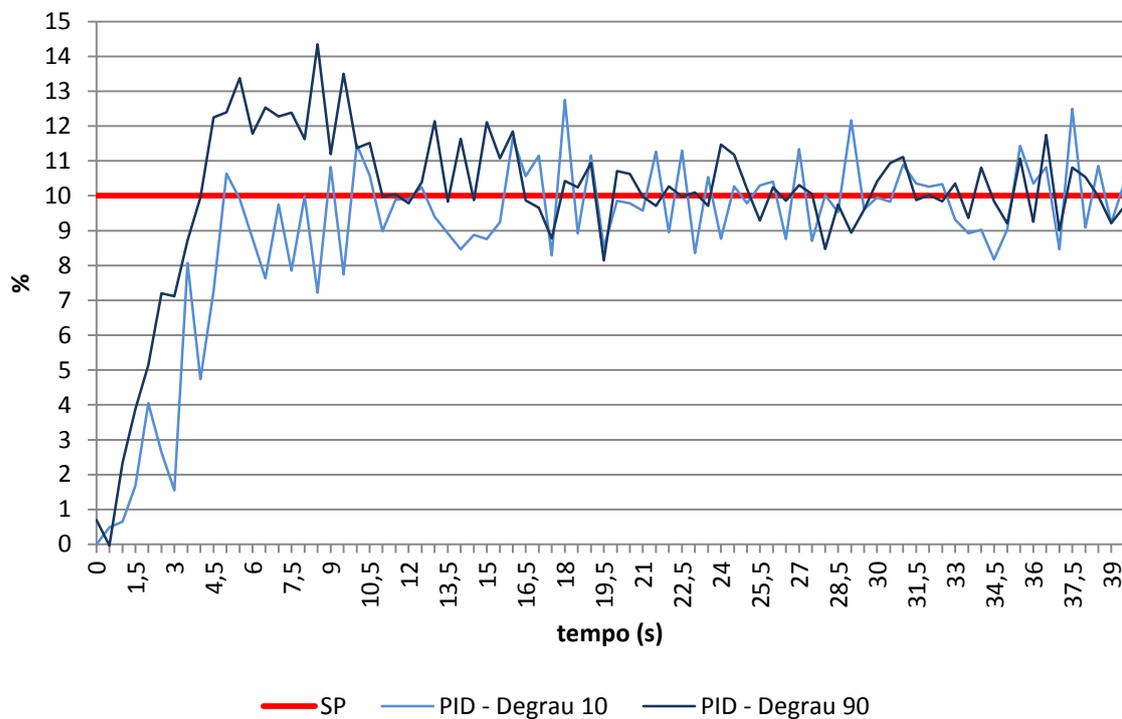


Fonte: Autoria própria.

Podemos reparar que a variável de processo continuou com as mesmas características mostradas anteriormente para o controlador fuzzy, bem uniformes, sem overshoot. A resposta com controle PID também apresentou resultados uniformes, porem com algumas variações no sobressinal.

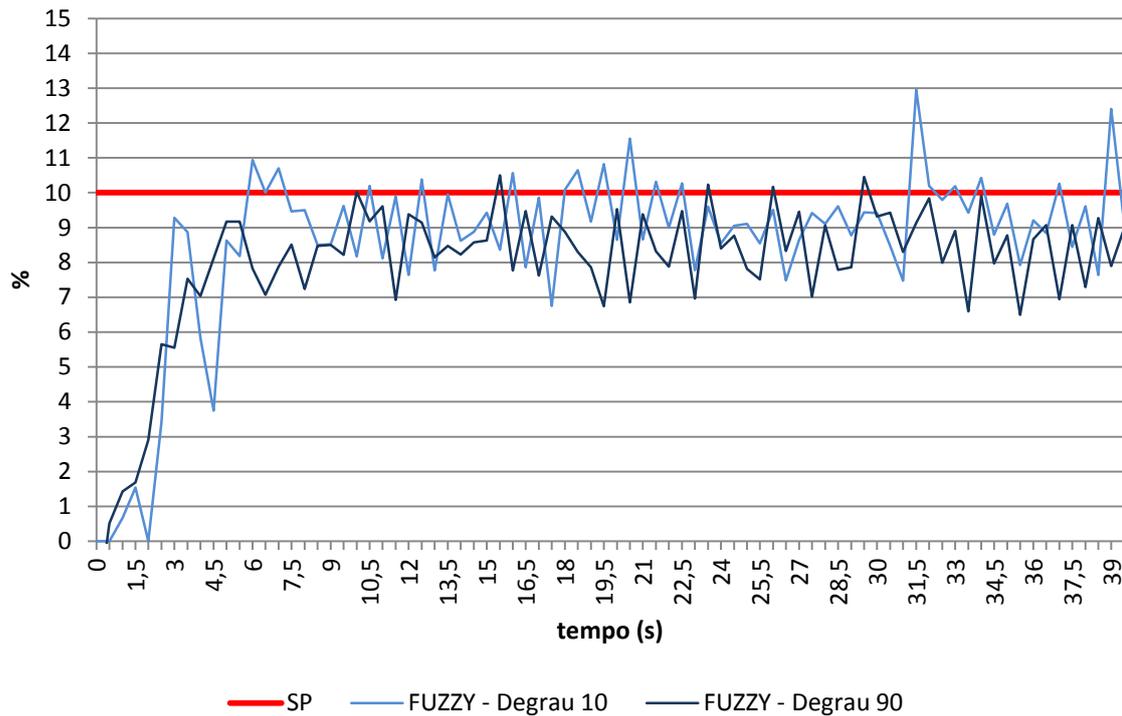
Nas figuras a seguir podemos comparar a resposta do sistema para faixas de operação diferentes com o mesmo controlador. Utilizamos os degraus com SP=10 e SP=90, plotados sob a mesma escala.

Figura 50 - Resposta do sistema em duas faixas de operação diferentes utilizando PID.



Fonte: Autoria própria.

Figura 51 - Resposta do sistema em duas faixas de operação diferentes utilizando fuzzy.

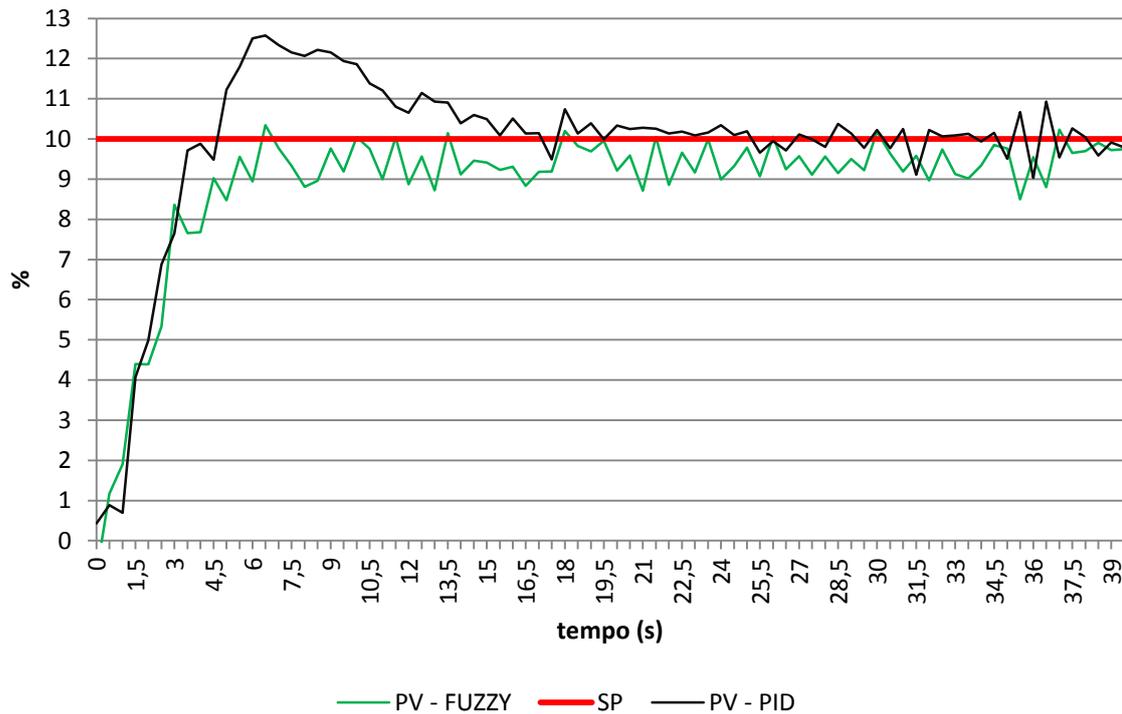


Fonte: Autoria própria.

Nota-se uma maior aproximação entre as respostas utilizando o controlador fuzzy do que utilizando o controlador PID, para diferentes faixas de operação. Para a resposta com PID, vemos o aparecimento de um overshoot, fato que não ocorre com o controlador fuzzy que, diferentemente, tende a ter um erro de regime.

A figura a seguir apresenta a média aritmética entre todas as respostas para cada controlador para que possamos ter uma visão geral do desempenho dos controladores em todas as faixas de operação.

Figura 52 - Resposta média de todos os degraus para cada controlador.



Fonte: Autoria própria.

A resposta utilizando o controlador PID tende a ter um overshoot de aproximadamente 25% e um tempo de acomodação de aproximadamente 18 segundos. Utilizando o controlador fuzzy, a resposta tende a ser criticamente amortecida, atingindo o valor final em aproximadamente 9 segundos, mas com um pequeno erro de regime.

6 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento da interface gráfica de supervisão da planta didática de nível pudemos monitorar as variáveis envolvidas no processo e implementar as estratégias de controle PID e fuzzy. Utilizando esse software, exportamos os resultados obtidos para análise de desempenho.

Foi possível identificar o sistema em uma faixa de operação e utilizou-se a *toolbox PID tuning* do Matlab para determinar os parâmetros do controlador PID. Com o conhecimento das características da planta de nível, modelamos o sistema fuzzy definindo a forma das funções de pertinência de cada conjunto e editando suas regras.

A técnica baseada em lógica fuzzy mostrou-se bastante eficaz para o controle de uma planta comprovadamente não-linear. Embora tenhamos obtidos resultados satisfatórios utilizando o controlador PID, com a estratégia de controle fuzzy obtivemos resultados mais uniformes para todas as faixas de operação.

Verificamos o constante aparecimento de overshoot na resposta com controle PID, exceto para o primeiro degrau. Utilizando o controle fuzzy, notamos o surgimento de um pequeno erro de regime conforme aumentávamos o valor de SP. Esse fato poderia ter sido reduzido com uma melhor representação do sistema pelas funções de pertinência das entradas e da saída fuzzy.

Para trabalhos futuros, sugerimos a implementação de um controlador PID na planta didática de nível do laboratório do CEFET-MG utilizando a lógica fuzzy para determinação de seus parâmetros, como também o desenvolvimento de um sistema de controle híbrido utilizando lógica fuzzy e redes neurais (sistema neurofuzzy) para a mesma planta.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WEBER, L.; KLEIN, P. A. **Aplicação Da Lógica Fuzzy Em Software E Hardware**. Editora da ULBRA, 2003.
2. ALMEIDA, Eduardo Herculano. **Estudo de controladores baseados em lógica fuzzy**. 2006. 59 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Automação e Controle) – UFOP, Ouro Preto.
3. SEGET – SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 7., 2010. **Identificação e Controle Fuzzy de uma Planta Didática de Nível**.
4. MARTINS, Euclides Edson. **Controle fuzzy através de sistema de supervisão**.
5. FERREIRA, Cesar. **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. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2009.
6. MORÉ, Jesus. **Aplicação da lógica fuzzy na avaliação da confiabilidade humana nos ensaios não destrutivos por ultra-som**. 2004. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2004.
7. FERREIRA, L.; JUNIOR, T. Y.; LOPES, A. Z.; LACERDA, W. S. **Desenvolvimento de uma rede neuro-fuzzy para predição da temperatura retal de frangos de corte**. *RITA*. Lavras, v. 17, n. 2, p. 221-233, 2010.
8. CAMPESTRINI, Lucíola. **Sintonia de controladores PID descentralizados baseada no método do ponto crítico**. 2006. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.
9. DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.
10. BARROS, R. R.; ALMEIDA, S. J. N. **Projeto e implementação de um controlador fuzzy para temperatura de topo de uma coluna de destilação didática**. 2009. 41 f. Monografia (Graduação em Tecnologia em Automação Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campos dos Goytacazes.
11. ASTROM, K. J.; HAGGLUND, T. **PID controllers. Theory, design and tuning**. Instruments Society of America, North Carolina, USA. 2001.

12. MACHADO, N. J.; CUNHA, M. O. **Lógica e linguagem cotidiana. Verdade, coerência, comunicação, argumentação.** Autêntica Editora, 2005.
13. VALENCIA, Luis A. L.. **Estudo de Algoritmos de Controle Semi-ativo Aplicados a Amortecedores Magnetorreológicos.** 2011. 253 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília. 2011.
14. OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** 3. ed. Livros Técnicos e Científicos S.A., 1998.
15. CONNEPI, 7, 2012. **Implementação de um Controlador Fuzzy para um Sistema de Controle de Nível.**
16. Congresso Brasileiro de Automática, 6. **Controle Fuzzy Para Sistema de Nível de Líquidos.**

8 ANEXO A

SOFTWARE DE CONTROLE E SUPERVISÃO

Disponível em

http://www.4shared.com/rar/0_nsMNE7/Software_Control_e_Superviso.html?

Software_Control_e_Supervisão.rar

Senha: anexotcc