

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS HENRIQUE SALAME DE ANDRADE

**ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA, AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE  
UMA PLANTA INDUSTRIAL DIDÁTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

LUCAS HENRIQUE SALAME DE ANDRADE

**ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA, AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE  
UMA PLANTA INDUSTRIAL DIDÁTICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Marcos Agulhari

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

**LUCAS HENRIQUE SALAME DE ANDRADE**

**ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA, AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE UMA  
PLANTA INDUSTRIAL DIDÁTICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às **14h e 00min** do dia **03** de **FEVEREIRO** de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no Programa de Graduação em Engenharia Industrial Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

**Prof. Dr. Cristiano Marcos Agulhari**  
Professor Orientador  
UTFPR/ Campus Cornélio Procopio

---

**Prof. Dr. Marcos Banheti Rabello Valim**  
Professor Convidado  
UTFPR/ Campus Cornélio Procopio

---

**Prof. Dr. Paulo Rogério Scalassara**  
Professor Convidado  
UTFPR/ Campus Cornélio Procopio

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por ter me concedido saúde, força, sabedoria e por ter colocado no meu caminho pessoas maravilhosas que me ajudaram a chegar até aqui.

Agradeço à toda minha família, em especial meu pai Waldir, minha mãe Lúcia, meus irmãos Danilo e Marcos, meus avós Urbano e Leonor e minha tia “Moçona” pelo amor, carinho e apoio que sempre me ajudaram a enfrentar os desafios da vida.

Agradeço ao meu ex-orientador, professor Bruno Augusto Angélico e ao meu orientador, professor Cristiano Marcos Agulhari, pela confiança, atenção e ajuda que me concederam para a realização deste trabalho.

Agradeço também aos meus amigos e colegas de trabalho do CIPECA pelo apoio e amizade que por diversas vezes me ajudaram a enfrentar as complicações do cotidiano.

## RESUMO

ANDRADE, L. H. S de. **Atualização Tecnológica, Automação e Controle de uma Planta Industrial Didática**. 2014. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Este trabalho consiste na realização de uma atualização tecnológica em uma planta industrial didática modificada do fabricante FESTO. A atualização consiste na implementação de um sistema de controle e supervisão, formado pelo *software* de programação gráfica LabVIEW e pelo PAC CompactRIO. Estratégias de controle PID e de controle *fuzzy* foram elaboradas e validadas através da aplicação prática das mesmas para o controle dos processos (temperatura, pressão, nível e vazão) presentes na planta industrial didática. Por meio da análise dos resultados obtidos foi possível constatar que tanto os sistemas de controle, como o de automação desenvolvidos, atenderam à todas as especificações solicitadas e o sistema de controle e supervisão criado tem potencial para auxiliar outros alunos no desenvolvimento de trabalhos relacionados à área de controle e automação de processos.

**Palavras-chave:** LabVIEW, CompactRIO, Controle PID e Controle *Fuzzy*.

## ABSTRACT

ANDRADE, L. H. S de. **Technological Upgrade, Automation and Control of a Didactic Industrial Plant.** 2014. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

This work consists of making a technological upgrade in a modified didactic industrial plant of manufacturer FESTO. The upgrade consists in implementation of a control and supervision system, formed by the graphical programming software LabVIEW and the PAC CompactRIO. Strategies of PID control and of fuzzy control were developed and validated through the practical application of the same for the control of processes (temperature, pressure, level and flow) in the didactic industrial plant. Through the analysis of the results was possible to show that both control systems, as developed automation, met all the required specifications and the control and supervision system created has the potential to assist other students in the development of works in related area of control and automation of process.

**Keywords:** LabVIEW, CompactRIO, PID Control e Fuzzy Control.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Representação com diagrama de blocos.....	18
FIGURA 2 – Sistema a malha aberta.....	19
FIGURA 3 – Sistema a malha fechada.....	19
FIGURA 4 – Resposta de um sistema de primeira ordem ao degrau unitário.....	21
FIGURA 5 – Curva de reação de um sistema de primeira ordem, método de Broida.....	21
FIGURA 6 – Método de Sundaresan e Krishnaswamy.....	22
FIGURA 7 – Curva de reação de um sistema de primeira ordem, método de Smith.....	23
FIGURA 8 – Resposta ao degrau unitário.....	25
FIGURA 9 – PID paralelo.....	26
FIGURA 10 – Sistema <i>fuzzy</i> .....	29
FIGURA 11 – Diagrama de blocos de uma estrutura de controle <i>fuzzy</i> .....	31
FIGURA 12 – Diagrama de blocos de um controlador <i>fuzzy</i> incremental.....	33
FIGURA 13 – Planta didática industrial readaptada.....	34
FIGURA 14 – Diagrama de instrumentação e tubulação – malha de temperatura	36
FIGURA 15 – Diagrama de instrumentação e tubulação – malha de pressão.....	37
FIGURA 16 – Diagrama de instrumentação e tubulação – malha de nível.....	39
FIGURA 17 – Diagrama de instrumentação e tubulação – malha de nível.....	41
FIGURA 18 – Programação em diagrama de blocos.....	43
FIGURA 19 – Estrutura interna do CompactRIO.....	44
FIGURA 20 – Interface de usuário da malha de temperatura.....	46
FIGURA 21 – Interface de usuário da malha de pressão.....	46
FIGURA 22 – Interface de usuário da malha de nível.....	47
FIGURA 23 – Interface de usuário da malha de temperatura.....	47
FIGURA 24 – Interface de usuário do sistema de manobra.....	48
FIGURA 25 – Tela de interface – seleção da manobra.....	50
FIGURA 26 – <i>System Manager</i> – monitoramento das E/S.....	50
FIGURA 27 – Tela de interface – sensor atuado.....	51
FIGURA 28 – <i>System Manager</i> – sensor atuado.....	51
FIGURA 29 – Identificação da malha de temperatura.....	52
FIGURA 30 – Funções de pertinência do erro – malha de temperatura.....	53
FIGURA 31 – Funções de pertinência da variação do erro – malha de temperatura.....	53
FIGURA 32 – Funções de pertinência da saída do controlador – malha de temperatura.....	54
FIGURA 33 – Sinal de saída do sistema – PID, malha de temperatura.....	54

FIGURA 34 – Sinal de saída do sistema – <i>fuzzy</i> , malha de temperatura.....	55
FIGURA 35 – Ação de controle – PID, malha de temperatura.....	55
FIGURA 36 – Ação de controle – <i>fuzzy</i> , malha de temperatura.....	56
FIGURA 37 – Identificação da malha de pressão.....	57
FIGURA 38 – Funções de pertinência do erro – malha de pressão.....	57
FIGURA 39 – Funções de pertinência da variação do erro – malha de pressão..	57
FIGURA 40 – Funções de pertinência da saída do controlador – malha de pressão.....	58
FIGURA 41 – Sinal de saída do sistema – PID, malha de pressão.....	58
FIGURA 42 – Sinal de saída do sistema – <i>fuzzy</i> , malha de pressão.....	59
FIGURA 43 – Ação de controle – PID, malha de pressão.....	60
FIGURA 44 - Ação de controle – <i>fuzzy</i> , malha de pressão.....	60
FIGURA 45 – Identificação da malha de nível.....	60
FIGURA 46 – Funções de pertinência do erro – malha de nível.....	61
FIGURA 47 – Funções de pertinência da variação do erro – malha de nível.....	61
FIGURA 48 – Funções de pertinência da saída do controlador – malha de nível.....	61
FIGURA 49 – Sinal de saída do sistema – PID, malha de nível.....	63
FIGURA 50 – Sinal de saída do sistema – <i>fuzzy</i> , malha de nível.....	63
FIGURA 51 – Ação de controle – PID, malha de nível.....	63
FIGURA 52 – Ação de controle – <i>fuzzy</i> , malha de nível.....	64
FIGURA 53 – Identificação da malha de vazão.....	64
FIGURA 54 – Funções de pertinência do erro – malha de vazão.....	65
FIGURA 55 – Funções de pertinência da variação do erro – malha de vazão.....	65
FIGURA 56 – Funções de pertinência da saída do controlador – malha de vazão.....	65
FIGURA 57 – Sinal de saída do sistema – PID, malha de vazão.....	66
FIGURA 58 – Sinal de saída do sistema – <i>fuzzy</i> , malha de vazão.....	66
FIGURA 59 – Ação de controle –PID, malha de vazão.....	67
FIGURA 60 – Ação de controle – <i>fuzzy</i> , malha de vazão.....	68



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Exemplos das ações de controle P, I e D.....	25
TABELA 2 – Sintonia do controlador PID, Chien – Hrones – Reswick.....	27
TABELA 3 – Sintonia do controlador PID, Cohen – Coon.....	27
TABELA 4 – Variações de controladores <i>fuzzy</i> PID.....	32
TABELA 5 – Descrição do diagrama da malha de controle de temperatura.....	35
TABELA 6 – Descrição do diagrama da malha de controle de pressão.....	38
TABELA 7 – Descrição do diagrama da malha de controle de nível.....	40
TABELA 8 – Descrição do diagrama da malha de controle de vazão.....	42
TABELA 9 – Tabela das regras de inferência – malha de temperatura.....	54
TABELA 10 – Máximos sobressinais, tempos de assentamento e erros em regime estacionário.....	55
TABELA 11 – Tabela das regras de inferência – malha de pressão.....	58
TABELA 12 – Máximos sobressinais, tempos de assentamento e erros em regime estacionário.....	59
TABELA 13 – Tabela das regras de inferência – malha de nível.....	62
TABELA 14 – Máximos sobressinais, tempos de assentamento e erros em regime estacionário.....	62
TABELA 15 – Tabela das regras de inferência – malha de vazão.....	66
TABELA 16 – Máximos sobressinais, tempos de assentamento e erros em regime estacionário.....	67

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	PROBLEMA	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	Objetivo geral	15
1.3.2	Objetivos específicos	15
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
<b>2</b>	<b>SISTEMAS DE CONTROLE</b>	<b>17</b>
2.1	FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE CONTROLE	17
2.2	IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS	19
2.3.1	Identificação pelo teste de resposta ao degrau	20
2.3	CONTROLADORES PID	23
2.4	SINTONIA DE CONTROLADORES PID	26
2.5	SISTEMAS <i>FUZZY</i>	28
2.6	CONTROLE <i>FUZZY</i>	31
<b>3</b>	<b>INSTRUMENTAÇÃO</b>	<b>34</b>
3.1	PLANTA INDUSTRIAL DIDÁTICA	34
3.1.1	Sistema de manobra de fluídos	34
3.1.2	Malha de controle de temperatura	35
3.1.3	Malha de controle de pressão	37
3.1.4	Malha de controle de nível	38
3.1.5	Malha de controle de vazão	40
3.2	LABVIEW	42
3.3	COMPACTRIO	43
<b>4</b>	<b>INTERFACES GRÁFICAS DE USUÁRIO</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>49</b>
5.1	SISTEMA DE AUTOMAÇÃO	49
5.2	SISTEMAS DE COTROLE PID	51
5.2.1	Malha de temperatura	52
5.2.2	Malha de pressão	56
5.2.3	Malha de nível	60
5.2.4	Malha de vazão	64
5.3	SISTEMAS DE CONTROLE <i>FUZZY</i>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
5.3.1	Malha de temperatura	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.3.2	Malha de pressão	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.3.3	Malha de nível	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.3.4	Malha de vazão	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>69</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS	70
6.2	ARTIGOS PUBLICADOS RELACIONADOS COM O TRABALHO	70
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade do homem em melhorar sua qualidade de vida, a partir da redução da dificuldade dos trabalhos envolvidos no seu dia a dia, do aumento na escala de produção e da melhora dos resultados finais de produtos utilizados em seu cotidiano, deu origem à automação.

O surgimento da Revolução Industrial, que iniciou na Inglaterra em meados do século XVIII, acarretou na mudança de uma sociedade agrícola, baseada na produção de bens de consumo próprio, para uma sociedade mais produtiva e voltada para o consumo coletivo, dando origem assim à produção em série. Tal fato, que somado à necessidade de atender um mercado consumidor crescente e ao desenvolvimento da tecnologia, impulsionou o desenvolvimento de sistemas automatizados cada vez mais diversificados e eficientes.

Inicialmente os processos automatizados, desprovidos de uma tecnologia mais desenvolvida, se resumiam à construção de equipamentos que evitassem a realização de trabalhos braçais repetitivos. Segundo Ogata (2000), atualmente os sistemas automatizados estão presentes em diversos segmentos da engenharia, como controle digital de máquinas – ferramentas das indústrias manufatureiras, no projeto de pilotagem automática da indústria aeroespacial e no projeto de carros e caminhões, desempenhando papel fundamental em todos eles. São também essenciais nas operações industriais, tais como: controle de temperatura, pressão, nível e vazão nas indústrias de processo.

O controle e automação de um processo industrial têm como objetivo produzir bens com menor custo, maior quantidade, menor tempo e maior qualidade, ou seja, é empregada para otimizar a produção (DORF; BISHOP, 2001).

Para o desenvolvimento de sistemas de controle, uma das estratégias mais utilizadas é o controle PID (Proporcional Integral Derivativo), cujos parâmetros podem ser baseados em equações matemáticas que representam as principais características da dinâmica do processo a ser considerado. Devido ao grande emprego deste tipo de controle, muitas pesquisas foram desenvolvidas visando, principalmente, obter um melhor desempenho referente às respostas desejadas do sistema (LI; ANG; CHONG, 2006).

Para a síntese de um controlador PID, é necessário obter algum tipo de modelo matemático do sistema. No entanto, determinados tipos de sistemas possuem uma modelagem matemática bastante complexa, fato este que pode ocorrer, por exemplo, devido a dinâmicas não lineares ou existência de elementos externos que influenciam no comportamento do sistema, como a presença de distúrbios inesperados. Para a solução de problemas como esses, foram propostos na literatura métodos alternativos para realizar o controle de sistemas sem ser necessária a obtenção do modelo matemático dos mesmos, tais como as técnicas de controle *fuzzy* (Berk et al., 2011).

No ambiente de controle e automação de processos existem alguns *softwares* propostos na literatura, como os que utilizam a linguagem gráfica de programação, que permitem uma atuação do usuário nos sistemas de controle. Tais ferramentas proporcionam ao usuário uma maneira mais fácil e intuitiva de criação de uma lógica para execução de tarefas. Além de tais ferramentas, estão presentes os controladores programáveis para automação, da sigla em inglês PAC (*Programmable Automation Controller*), que foram desenvolvidos para atender as necessidades apresentadas por máquinas em expansão e sistemas industriais cada vez mais modernos.

O presente trabalho visa promover o controle e automação de todos os processos existentes em uma planta industrial didática readaptada da FESTO (FESTO DIDACTIC, 2006) utilizando um ambiente e plataforma alternativos ao sistema já existente, composto pelo software supervisor Elipse SCADA (ELIPSE SCADA, 2002) e pelo CLP (Controlador Lógico Programável) da fabricante Altus, série Ponto (ALTUS S.A., 2007). No esquema atual, segundo ALMEIDA (2012), tanto a automação como o controle baseado em estrutura PID dos processos são implementados no CLP.

O novo sistema de controle é composto pelo *software* de programação gráfica LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) e pelo PAC CompactRIO (RIO – *Reconfigurable Inputs and Outputs*). Para testar e validar o sistema de controle proposto, foram implementadas estratégias de controle PID e controle *fuzzy*.

## 1.1 PROBLEMA

Segundo Bolton (2006), os CLPs têm sido amplamente utilizados em ambientes industriais devido à sua robustez quanto a vibrações, variações de temperatura e umidade, por possuírem interfaces de entradas e saídas de fácil acesso e por serem facilmente programados. Porém, com o constante desenvolvimento da tecnologia, os CLPs estão perdendo território para os PACs, pois estes últimos possuem mais opções de protocolos de comunicação, maior desempenho e uma melhor interface de usuário, combinando o desempenho de um CLP e a funcionalidade de um computador.

A planta industrial didática utilizada para a realização deste trabalho é parte fundamental de estudos e validações de estratégias de controle, realizados por alunos do programa de iniciação científica e alunos do PPGEE (Programa de Pós – Graduação de Engenharia Elétrica). Até o momento, todos os trabalhos desenvolvidos na planta se resumem a sistemas monovariáveis de baixa complexidade. Diante disto, vê-se a necessidade da criação de um novo sistema de controle composto por uma plataforma de maior poder computacional e de programação mais flexível, aumentando assim a possibilidade de estratégias de controle que poderão ser utilizadas na mesma, como as baseadas em sistemas inteligentes, inclusive para sistemas multivariáveis.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os controladores PID são certamente uma das metodologias mais utilizadas em sistemas de controle dos processos industriais (KNOSPE, 2006). O sucesso do controle PID é caracterizado pela sua simplicidade estrutural e potencialidades de aplicação.

Todavia, determinados tipos de sistemas possuem características como a presença de distúrbios e ruídos, que dificultam a obtenção de um modelo matemático dos mesmos para o desenvolvimento de controles clássicos como o PID. Devido a este fato outras estratégias de controles estão sendo desenvolvidas, como o controle *fuzzy*, que não é modelado através de equações matemáticas e sim

através de conhecimentos empíricos do sistema que se deseja controlar (PASSINO; YURKOVICH, 1998).

Controladores Programáveis para Automação (PACs) foram desenvolvidos para atender as necessidades apresentadas por máquinas em expansão e sistemas industriais cada vez mais modernos, combinando o desempenho de um CLP com a funcionalidade de um computador. Estes controladores possibilitam a construção de sistemas avançados incorporando capacidades de *software* como controle avançado, comunicação, armazenamento de dados e processamento de sinais com um controlador robusto, realizando lógica e controle de processos (NATIONAL INSTRUMENTS, 2013).

A arquitetura PAC do CompactRIO é programável através do *software* LabVIEW, uma linguagem de programação gráfica que é muito utilizada em plataformas de *hardware* PAC com sistema operacional em tempo real.

De acordo com Bitter; Mohiuddin; Nawrocki (2001) a natureza gráfica do LabVIEW o torna ideal para desempenhar funções de testes e medições, análise de aplicação de dados e controle de instrumentos, além de possibilitar também a interação com códigos criados em outra linguagem, como C e MATLAB® (NATIONAL INSTRUMENTS, 2013).

A combinação das ferramentas LabVIEW e CompactRIO para o controle e automação de processos resulta em uma plataforma de maior poder computacional e de programação mais flexível do que a existente na planta didática em questão, promovendo assim uma atualização tecnológica na mesma. Com isso, será possível utilizar a planta tanto para implementação e validação de algoritmos de controle PID, quanto de algoritmos de controles mais avançados como os baseados em sistemas inteligentes.

A planta industrial em questão permaneceu fora de operação durante um período de tempo relativamente longo, e seu processo de reabilitação tem sido resultado de diversos trabalhos, tanto de conclusão de curso quanto de iniciação científica e mestrado. A atualização proposta neste trabalho se insere neste processo de reabilitação, adicionando características que não haviam no projeto original (ALMEIDA, 2012). Assim, ao término deste trabalho, alunos do programa de iniciação científica e do PPGEE poderão utilizar a planta industrial didática em questão para realizar estudos mais avançados, possibilitando desta maneira a

elaboração de trabalhos acadêmicos, artigos, trabalhos de conclusão de curso e dissertações de mestrado, com níveis de complexidade mais elevados que os atuais.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo geral

Realizar o controle e automação de todos os processos existentes em uma planta industrial didática do Centro Integrado de Pesquisa de Controle e Automação, CIPECA, por meio de algoritmos de controle PID e controle *fuzzy* elaborados através de um *software* de programação gráfica e implementados através de um PAC.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Abaixo estão listados os objetivos específicos:

- Estudar a planta didática a ser controlada, o *software* de programação gráfica LabVIEW, o PAC CompactRIO e as teorias de controle e automação utilizadas, no caso os sistemas de controle PID e controle *fuzzy*;
- Realizar a automação do processo de manobra de fluídos entre os reservatórios da planta didática;
- Desenvolver, implementar e validar sistemas de controle utilizando algoritmos PID e lógica *fuzzy*, para o controle dos módulos de temperatura, pressão, nível e vazão, presentes na planta didática;
- Desenvolver interfaces gráficas para a automação e controle que serão desenvolvidos.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura textual do trabalho está disposta da seguinte forma:

- No capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica do trabalho, abrangendo os fundamentos de sistemas de controle, controle PID, lógica *fuzzy* e sistemas de controle *fuzzy*;

- No capítulo 3, são abordadas as ferramentas utilizadas para a realização deste trabalho;
- No capítulo 4, são apresentadas as interfaces gráficas desenvolvidas tanto para a manobra de fluidos como para o controle das malhas da planta didática;
- No capítulo 5, são mostrados os resultados obtidos pelos sistemas de controle desenvolvidos nos ensaios realizados na planta;
- Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros e os resumos dos artigos produzidos relacionados ao trabalho.



## 2 SISTEMAS DE CONTROLE

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica das teorias e conceitos utilizados para a realização deste trabalho, onde são apresentados os conteúdos de sistemas de controle, controladores PID, identificação de sistemas, sintonia de controladores PID, sistemas *fuzzy* e controle *fuzzy*.

### 2.1 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE CONTROLE

Para o estudo sobre sistemas de controle inicialmente é necessário definir alguns termos básicos, para possibilitar uma maior compreensão da teoria abordada (OGATA, 2000) como:

- Variável controlada e variável manipulada: A variável controlada é a grandeza de saída do sistema que será medida e que se deseja controlar. Variável manipulada é a grandeza ou condição que será modificada pelo controlador para que se obtenha o comportamento desejado na variável controlada.
- Planta: É o sistema a ser controlado. Pode ser definida como a parte de um equipamento ou até mesmo o conjunto de máquinas que tem como finalidade a execução de uma determinada operação.
- Processo: Operação ou desenvolvimento natural, que evolui contínua e progressivamente, caracterizado por mudanças graduais que se sucedem umas às outras, visando sempre atingir um objetivo pré – determinado.
- Sistema: Combinação de componentes que atuam em conjunto para realizar um determinado objetivo. Não é conceituado apenas como algo físico, pode também ser aplicado a fenômenos abstratos e dinâmicos, como na economia.
- Distúrbio: Consiste em um sinal que tende a afetar de modo indesejado o valor da variável de saída de um sistema. É definido como distúrbio interno se o mesmo for gerado internamente no sistema e externo se originado fora do sistema.

De maneira geral, os itens citados acima são parte integrante de um sistema de controle, e possuir o conhecimento dos mesmos é necessário para que se possa realizar uma análise ou mesmo o controle de um sistema.

Dorf e Bishop (2001) definem que “um sistema de controle é a interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzirá uma resposta desejada do sistema [...]”. No estudo em questão, as análises realizadas são embasadas nos fundamentos da teoria de sistemas lineares e considera-se que os sistemas analisados são causais.

Segundo Nise (2002) um sistema de controle consiste na reunião de subsistemas e processos, a fim de controlar suas saídas. Na sua forma mais simples, fornece uma resposta para cada sinal ou estímulo de entrada, podendo ser representado por um diagrama de blocos como na Figura 1.

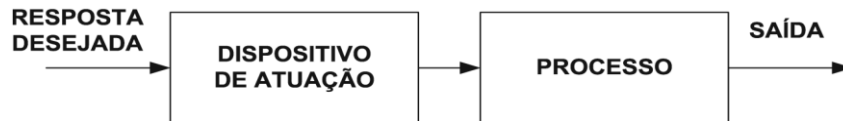


Figura 1: Representação com diagrama de blocos  
Fonte: DORF; BISHOP (2001)

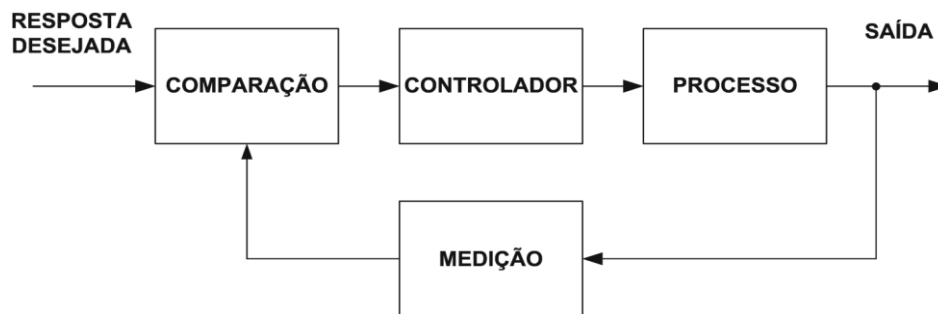
Estes sistemas de controle podem possuir duas características importantes, que segundo Ogata (2000) são:

- Sistemas de controle a malha aberta: São sistemas nos quais o sinal de saída não afeta a ação de controle, ou seja, não existe uma comparação entre os sinais de entrada e saída dos mesmos. São em geral sistemas de menor complexidade. Porém, na presença de distúrbios, este tipo de sistema deixa a desejar, não desempenhando corretamente seu papel;
- Sistemas de controle a malha fechada: São sistemas com retroação, ou seja, o sinal de saída é comparado com o de entrada. O objetivo do controle é anular o sinal de erro, que é a diferença entre os sinais de referência de entrada e saída, o controlador é acionado de modo a reduzi-lo.

As Figuras 2 e 3 mostram os diagramas de blocos de um sistema de controle a malha aberta e um sistema de controle a malha fechada, respectivamente.



**Figura 2: Sistema a malha aberta**  
 Fonte: DORF; BISHOP (2001)



**Figura 3: Sistema a malha fechada**  
 Fonte: DORF; BISHOP (2001)

Observando as Figuras 2 e 3, pode-se reforçar que, no sistema de controle em malha aberta, utiliza-se de um dispositivo de atuação para alcançar a resposta desejada, sem nenhuma comparação com o sinal de saída do sistema. Já no sistema em malha fechada, existe um bloco responsável pela medição e outro pela comparação do sinal de saída do sistema com o sinal de referência do mesmo, enviando assim a diferença entre eles para o controlador, que atuará no processo de forma automática. No presente trabalho, os sistemas de controle escolhidos para serem utilizados em todas as malhas da referida planta didática são em malha fechada.

## 2.2 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Segundo Aguirre (2007), a identificação de sistemas consiste na obtenção de um modelo matemático que explique, pelo menos em parte e de forma aproximada, a relação de causa e efeito presente entre a entrada e a saída do sistema.

Os modelos matemáticos podem assumir muitas formas diferentes e a seleção de qual modelo é mais adequado depende das circunstâncias particulares de cada aplicação. Por exemplo, em problemas de controle ótimo, é vantajoso usar representações no espaço de estado. Por outro lado, a representação através de função de transferência pode ser mais conveniente do que qualquer outra para a

análise de resposta transitória ou de resposta de frequência de sistemas monovariáveis lineares e invariantes no tempo (OGATA, 2000), como é o caso dos sistemas controlados neste trabalho.

Segundo Coelho e Coelho (2004) os procedimentos envolvidos na elaboração de modelos matemáticos são usualmente classificados em:

- Análise físico – matemática: baseia-se nas leis da física que caracterizam um sistema particular, como as leis de conservação de massa, energia e momento;
- Análise experimental: baseia – se nas medidas ou observações do sistema.

Diferentes métodos de análise experimental podem ser utilizados para geração do sinal de entrada, medição da saída e armazenamento dos dados, como por exemplo, identificação *off-line*, identificação *on-line*, o método de identificação pelo teste da resposta em frequência e identificação pelo teste da resposta ao degrau. Este último foi escolhido para a realização deste trabalho, devido ao fato de que os sistemas que foram controlados serem de primeira ordem e lineares. E na subseção abaixo está descrito o método utilizado.

### 2.3.1 Identificação pelo teste de resposta ao degrau

Este procedimento é caracterizado pela aplicação de um sinal do tipo degrau na entrada de um processo e é realizado o armazenamento dos dados do sinal de saída do mesmo. Através da curva de reação do processo é possível aplicar diferentes técnicas gráficas, numéricas ou computacionais para modelar o sistema por funções de primeira ou segunda ordem. Vale ressaltar que este tipo de teste só é válido para sistemas lineares ou para processos não lineares que sejam aproximadamente lineares na vizinhança do ponto de operação (COELHO; COELHO, 2004).

A resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem é ilustrada na Figura 4, onde sistemas com resposta ao degrau na forma de “s” podem ser aproximados por uma função de transferência de primeiro grau com atraso de transporte, conforme a Equação (1), que rege a dinâmica da curva de reação do sistema,

mostrada na Figura 4. Na Equação (1)  $K$  é o ganho estático do processo,  $L$  é o atraso de transporte e  $T$  é a constante de tempo (OGATA, 2000).

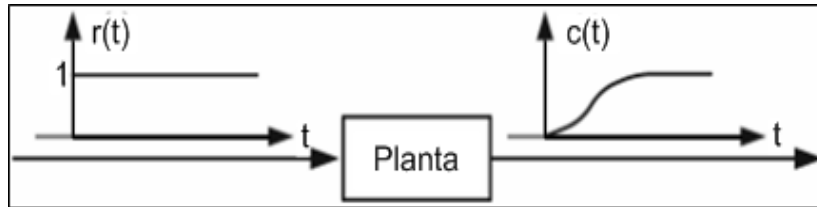


Figura 4: Resposta de um sistema de primeira ordem ao degrau unitário  
Fonte: OGATA (2000)

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (1)$$

Existem alguns métodos baseados no teste ao degrau para a modelagem de processos de primeira e segunda ordem propostos na literatura, como o de Ziegler e Nichols, Sundaresan e Krishnaswamy, Smith, (COELHO; COELHO, 2004) e Broida (HAMITI, 1996).

Neste trabalho, foram testados em cada malha de controle os quatro métodos de identificação citados no parágrafo anterior e o método que obteve em cada caso uma função de transferência com uma curva de resposta estimada mais próxima à curva de resposta medida, foi o método escolhido. Resultando assim na utilização de três métodos diferentes, que serão descritos a seguir.

- Método de Broida:

Este método consiste na determinação de instantes  $t_1$  e  $t_2$ , que são os instantes de tempo nos quais a saída (que é igual a  $K$  em regime permanente) é igual, respectivamente, a  $0,28 \cdot K$  e  $0,4 \cdot K$ , conforme ilustrado na Figura 5.

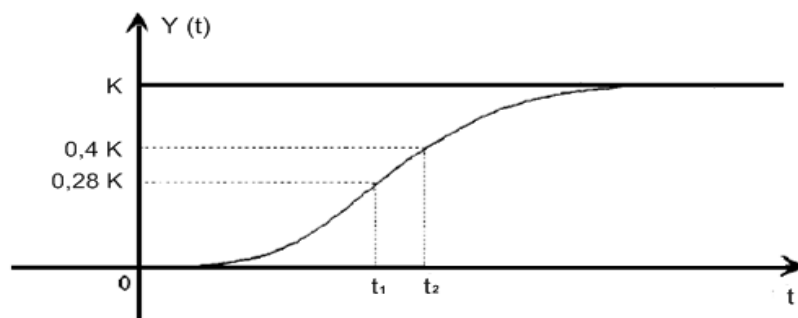


Figura 5: Curva de reação de um sistema de primeira ordem, método de Broida  
Fonte: HAMITI (1996)

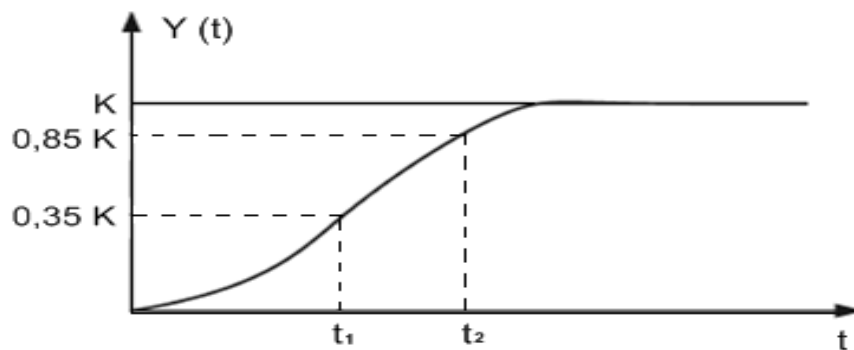
De acordo com os valores obtidos de  $t_1$  e  $t_2$ , os parâmetros T e L podem ser definidos, respectivamente, a partir das Equações (2) e (3):

$$T = 5,5 \cdot (t_2 - t_1) \quad (2)$$

$$L = 2,8 \cdot t_1 - 1,8 \cdot t_2 \quad (3)$$

- Método de Sundaresan e Krishnaswamy

A partir de  $t_1$  e  $t_2$ , obtidos através do modo ilustrado na Figura 6, são determinados os parâmetros T e L, que são calculados, respectivamente, através das equações (4) e (5).



**Figura 6: Método de Sundaresan e Krishnaswamy**  
Fonte: COELHO e COELHO (2004)

$$T = 0,67 \cdot (t_2 - t_1) \quad (4)$$

$$L = 1,3 \cdot t_1 - 0,29 \cdot t_2 \quad (5)$$

- Método de Smith

A partir de  $t_1$  e  $t_2$ , determinados como ilustrado na Figura 7, obtêm-se os parâmetros T e L, respectivamente, através das Equações (6) e (7).

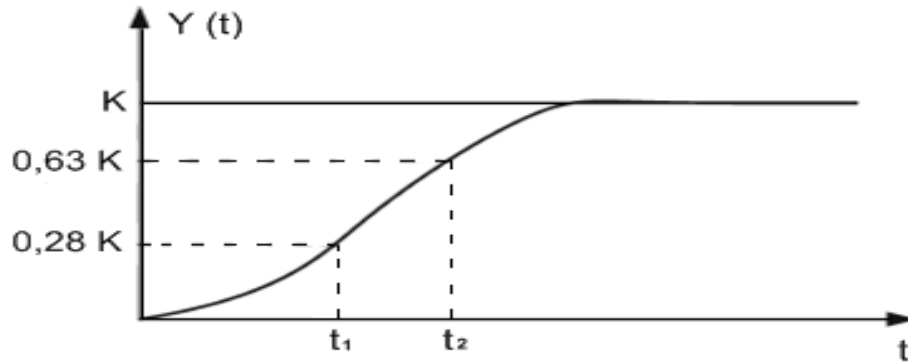


Figura 7: Curva de reação de um sistema de primeira ordem, método de Smith  
Fonte: COELHO e COELHO (2004)

$$T = 1,5 \cdot (t_2 - t_1) \quad (6)$$

$$L = t_2 - T \quad (7)$$

### 2.3 CONTROLADORES PID

Ogata (2000) afirma que mesmo com tantos recursos de inteligência computacional, os controladores mais utilizados em plantas industriais, ainda são da forma PID. Ao longo dos últimos anos, pesquisadores de universidades e de indústrias concentraram-se em melhorias dos controles, principalmente nas áreas de identificação de sistemas.

Em um projeto clássico de sistema de controle, é necessário ter o prévio conhecimento do modelo matemático do processo e do controlador a ser utilizado. O modelo do processo a ser controlado é geralmente uma representação inexata do sistema físico real. Segundo Dorf e Bishop (2001), este fato se deve a:

- Mudanças de parâmetros;
- Dinâmica não modelada;
- Retardos não incluídos no modelo matemático;
- Mudanças no ponto de equilíbrio (ponto de operação);
- Ruídos no sensor;
- Perturbações imprevisíveis.

Para garantir o efetivo desempenho de um sistema de controle sujeito a imprecisões, distúrbios e oscilações do processo, é necessário que o mesmo seja robusto. Dorf e Bishop (2001) afirmam que um sistema é considerado robusto quando apresenta um desempenho aceitável no tratamento das alterações ou inexatidões, que podem ser resultantes da obtenção do modelo matemático do sistema a ser controlado e de possíveis interferências decorrentes de perturbações imprevisíveis no mesmo, como a presença de ruídos externos e internos.

De acordo com Dorf e Bishop (2001), “a popularidade dos controladores PID pode ser atribuída parcialmente ao seu bom desempenho em uma ampla faixa de condições de operação e parcialmente à sua simplicidade funcional [...]”. Este controlador tem uma função de transferência com três termos bem definidos, o termo proporcional, termo integrativo e o termo derivativo com seus respectivos ganhos,  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ . A Equação (8) mostra esta função de transferência, obtida pela relação entre o sinal de saída  $U(s)$  e o sinal de entrada  $E(s)$  deste tipo de controlador. (DORF; BISHOP, 2001).

$$G_{pid}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (8)$$

E a equação de saída no domínio do tempo de  $u(t)$  é:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

Que pode ser reescrita como:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (10)$$

Os ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , podem ser variados individualmente, e sua influência na resposta a uma entrada degrau de um sistema de controle a malha fechada é mostrado na Tabela 1:



Tabela 1: Exemplos das ações de controle P, I e D

	Tempo de Subida	Sobressinal	Tempo de Assentamento	Erro em Regime	Estabilidade
$\uparrow K_p$	Decresce	Aumenta	Aumenta pouco	Decresce	Degrada
$\uparrow K_i$	Decresce pouco	Aumenta	Aumenta	Decresce muito	Degrada
$\uparrow K_d$	Decresce pouco	Decresce	Decresce	Influi pouco	Melhora*

\* Desde que não haja ruídos significativos no sistema.

Fonte: LI; CHONG (2006)

Para consolidar as terminologias listadas na Tabela 1, a Figura 8 demonstra a resposta do sistema diante de um degrau unitário na entrada.

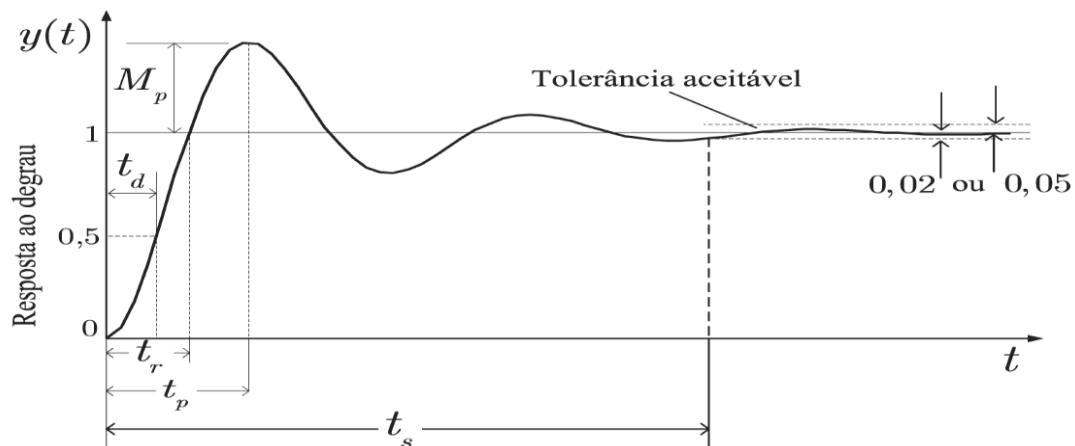


Figura 8: Resposta ao degrau unitário  
Fonte: OGATA (2000)

Mediante a esta resposta do sistema em malha fechada, as terminologias utilizadas são (OGATA, 2000):

- Tempo de atraso,  $t_d$ : é o tempo necessário para que a resposta alcance, pela primeira vez, a metade do valor final.
- Tempo de subida,  $t_r$ : é o tempo necessário para que a resposta aumente de 10% a 90%, de 5% a 95%, ou de 0% a 100% de seu valor final, que foi o critério utilizado neste trabalho.
- Tempo de pico,  $t_p$ : é o tempo necessário para que a resposta alcance o primeiro pico de ultrapassagem.
- Máximo sobressinal,  $M_p$ : é a diferença entre o máximo valor de pico do sobressinal e a resposta final.

- Tempo de assentamento,  $t_s$ : Tempo necessário para que a curva de resposta alcance valores dentro de uma faixa em torno do valor final e ali permaneça, esta faixa é especificada por uma porcentagem absoluta do valor final, e normalmente é de 2% ou 5%. Neste trabalho foi utilizada a faixa de 2%.
- Erro em regime,  $e_{ss}$ : é a diferença entre o valor da variável de saída em regime e a variável de referência.

Em Visioli (2006), são propostas três topologias de controladores PID propostas por paralela, série e *ISA*. Neste trabalho, será utilizada a topologia paralela, que está representada em diagrama de blocos na Figura 9.

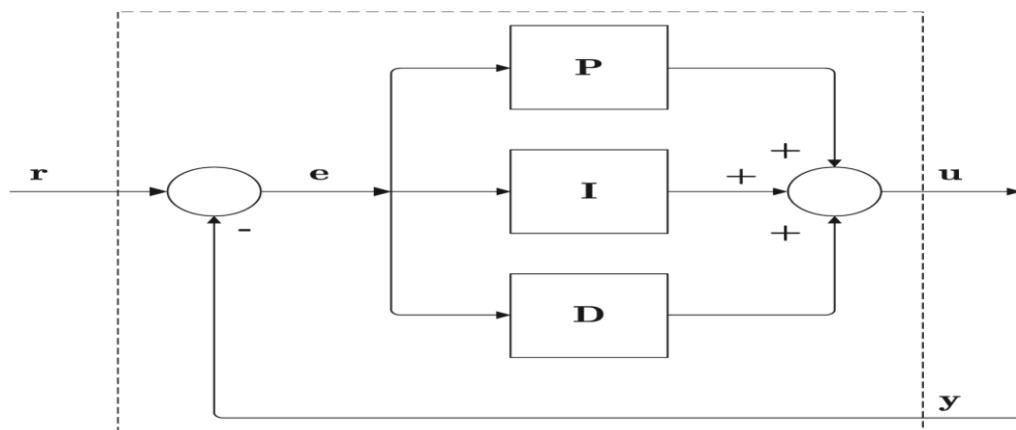


Figura 9: PID paralelo  
Fonte: VISIOLI (2006)

Para se obter os melhores valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , é necessário utilizar os métodos de sintonia de controladores PID propostos na literatura. Os métodos utilizados neste trabalho estão abordados na seguinte seção.

## 2.4 SINTONIA DE CONTROLADORES PID

Depois de realizada a sintonia do sistema a ser controlado, obtendo-se assim os parâmetros  $K$ ,  $L$  e  $T$ , é necessário efetuar a sintonia do controlador PID, o que consiste em determinar os parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  que compõem o mesmo.

Existem alguns métodos propostos na literatura como o de Ziegler e Nichols, Cohen-Coon e Chien-Hrones-Reswick (CHR). Neste trabalho foram utilizados os dois últimos citados, conforme apresentado a seguir.

- Método de Chien – Hrones – Reswick

Este método possui dois critérios de sintonia: resposta com 0% de sobressinal e resposta com 20% de sobressinal. Os parâmetros do controlador podem ser calculados de acordo com a Tabela 2, onde  $T_i = K_p/K_i$  e  $T_d = K_d/K_p$ .

**Tabela 2: Sintonia do controlador PID, Chien – Hrones – Reswick**

Sobressinal	0%			20%		
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$\frac{0,3T}{KL}$			$\frac{0,7T}{KL}$		
<b>PI</b>	$\frac{0,35T}{KL}$	1,2T		$\frac{0,6T}{KL}$	T	
<b>PID</b>	$\frac{0,6T}{KL}$	T	0,5L	$\frac{0,95T}{KL}$	1,4T	0,47L

Fonte: ASTROM; HAGGLUND (1995)

- Método de Cohen – Coon

Neste método os parâmetros do controlador são definidos de acordo com a Tabela 3.

**Tabela 3: Sintonia do controlador PID, Cohen – Coon**

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$\frac{T}{KL} \left( 1 + \frac{0,35\tau}{1-\tau} \right)$		
<b>PI</b>	$\frac{0,9T}{KL} \left( 1 + \frac{0,92\tau}{1-\tau} \right)$	$\frac{3,3 - 3\tau}{1 + 1,2\tau}$	
<b>PID</b>	$\frac{1,35T}{KL} \left( 1 + \frac{0,18\tau}{1-\tau} \right)$	$\frac{2,5 - 2\tau}{1 - 0,39\tau} L$	$\frac{0,37 - 0,37\tau}{1 - 0,81\tau} L$

Fonte: ASTROM; HAGGLUND (1995)

O parâmetro  $\tau$  apresentado na Tabela 3 varia entre 0 e 1 e é definido como  $\tau = L/(L + T)$ . Este parâmetro pode ser utilizado para caracterizar a dificuldade em

se controlar um processo, onde quanto maior  $\tau$ , mais difícil se torna o controle, pois são processos com tempo morto dominante.

## 2.5 SISTEMAS FUZZY

Os sistemas *fuzzy*, introduzidos por Zadeh (1973), consistem em modelos computacionais que tentam explorar as formas que o cérebro humano usa para o tratamento de informações qualitativas (ROSS, 2004). Nestes tipos de sistemas, a decisão de uma máquina não se resume apenas a um “sim” ou “não”, mas também a decisões abstratas do tipo “próximo de”, “em torno de”, “muito boa”, etc (PEDRYCZ; GOMIDE, 1998).

A constatação de que o operador humano pode controlar sistemas complexos de maneira satisfatória, por meio de conhecimentos adquiridos sobre o mesmo através de observações, deu origem à aplicação de sistemas *fuzzy* para controle (CAMPOS; SAITO, 2004).

Para a aplicação deste tipo de estratégia de controle não é necessário o prévio conhecimento da expressão matemática que represente a dinâmica completa do sistema a ser controlado. Devido a isto, a lógica *fuzzy* é utilizada principalmente em sistemas de dinâmica complexa cuja identificação não é trivial, como os que possuem características não lineares, presença de distúrbios inesperados, sinais ruidosos e/ou que possuem múltiplas entradas e múltiplas saídas.

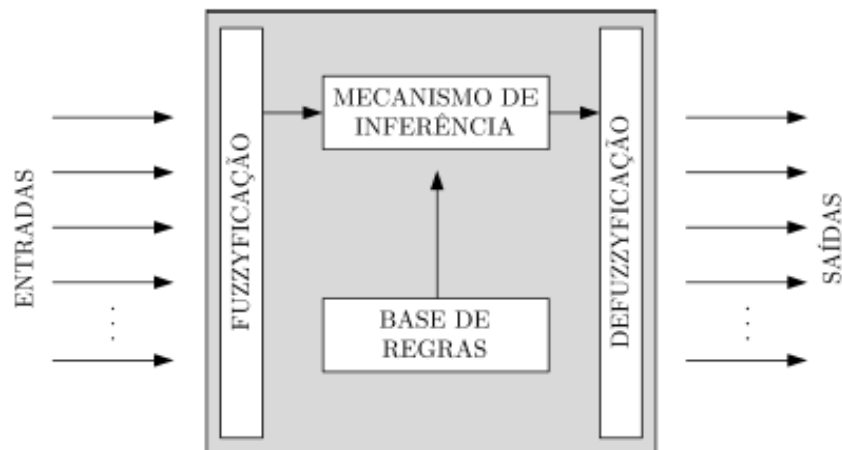
As características de um sistema *fuzzy* são as seguintes:

- São sistemas baseados em regras linguísticas.
- Expressa imprecisões e incertezas, atribuídas através do emprego das variáveis linguísticas.
- O raciocínio é executado de modo aproximado.
- As conclusões são obtidas de forma paralela: mais de uma regra pode ser executada ao mesmo tempo.

A título de demonstração de como ocorre o processo de elaboração de um sistema *fuzzy*, considere uma determinada situação real de um ambiente industrial, como por exemplo, a intensidade da atuação de um controlador sob uma resistência

aplicada em um processo de aquecimento de água. A ação de controle aplicada pode ser dimensionada por um “especialista”, no processo a ser controlado, em três situações de intensidade: “fraca”, “média” e “forte”.

O processamento das informações relacionadas à ação de controle é realizado de acordo com a estrutura e funcionamento de um sistema *fuzzy*, que pode ser representada pela Figura 10.



**Figura 10: Sistema *fuzzy***  
**Fonte: PASSINO; YURKOVICH (1998)**

Na Figura 10, podem ser destacados quatro principais componentes (Passino e Yurkovich, 1998).

- Fuzzyficação: responsável por normalizar os sinais de entrada para que os mesmos possam ser analisados de acordo com a base de regras agregada.
- Base de Regras: local onde são armazenadas as informações relevantes de operação do sistema a ser considerado. Estas informações são sintetizadas em um conjunto de regras constituídas por relações de causa e consequência do tipo “se - então”.
- Mecanismo de Inferência: componente do sistema que avalia qual regra será utilizada e determina qual será a saída do sistema *fuzzy*. Um dos métodos de inferência mais utilizados, inclusive neste trabalho, é o modelo de Mandani (MANDANI; ASSILIAN, 1975).
- Defuzzyficação: converte a saída resultante atribuída pelo mecanismo de inferência em sinais para o meio externo, compatíveis com a aplicação considerada.

O primeiro passo que deve ser feito para a elaboração de um sistema *fuzzy* é a formulação das funções de pertinência (conjuntos *fuzzy*), que mapeiam os valores escalares das variáveis de entrada e saída de um determinado sistema em números limitados entre 0 e 1, o que indica o grau de pertinência desses valores aos conjuntos.

Existem diferentes tipos de funções de pertinência que podem ser utilizadas para o desenvolvimento de um sistema *fuzzy*, onde a escolha de qual utilizar depende da variável que se deseja representar. As funções mais utilizadas são a triangular, a trapezoidal e a gaussiana descritas, respectivamente, pelas Equações (11), (12) e (13). Neste trabalho foram utilizadas as funções triangular e trapezoidal, devido às características das variáveis envolvidas nos processos controlados.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{se } x \in [m, b] \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } x \in [a, m] \\ 1 & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{se } x \in [n, b] \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_A(x) = e^{-\beta(x-m)^2} \quad (13)$$

A função de pertinência  $\mu_A(x)$  varia no intervalo [0,1] e representa o quanto o parâmetro  $x$  pertence ao conjunto *fuzzy* A. e  $m$ ,  $a$  e  $b$  são as constantes que definem o formato de cada função.

Depois de realizada a formulação das funções de pertinência, as regras de inferência devem ser definidas para determinar o funcionamento do sistema em

seguida deve ser escolhido o método de inferência e por fim o de defuzzyficação.

## 2.6 CONTROLE FUZZY

De acordo com Passino (1998), o controle *fuzzy* proporciona uma metodologia formal para representação, manipulação e implementação do conhecimento heurístico do ser humano sobre o controle de um determinado sistema.

O diagrama de blocos de um controlador *fuzzy* inserido em um sistema de controle em malha fechada é mostrado na Figura 11. A entrada de referência do sistema (que pode ser mais de uma) é denotada por  $r(t)$ , a saída do controlador *fuzzy* e entrada da planta são representadas por  $u(t)$  e a saída do sistema é denotada por  $y(t)$ .

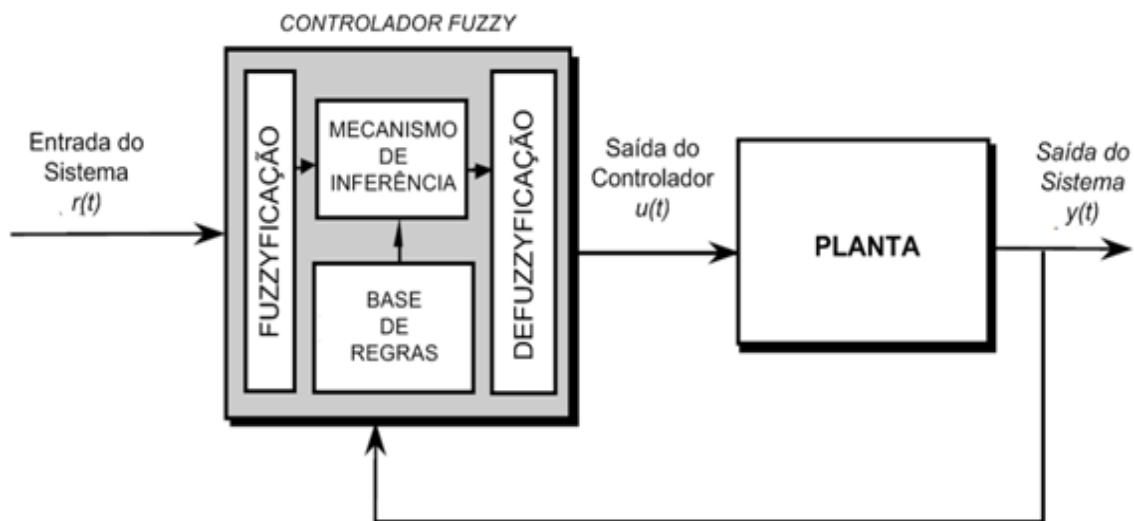


Figura 11: Diagrama de blocos de uma estrutura de controle *fuzzy*.  
Fonte: PASSINO (1998)

Como pode ser observado na Figura 11, um conjunto de entradas do controlador *fuzzy* são as entradas do sistema e são elas que definem o tipo do controlador. Alguns controladores *fuzzy* são projetados para responder de forma semelhante a controladores convencionais, como os do tipo PID e suas derivações: Proporcional (P), Proporcional – Derivativo (PD) e Proporcional – Integrativo (PI) (JANTZEN, 2007). Nestes métodos consideram-se as entradas do controlador em função do erro, conforme representa a Equação (14). A notação discreta será utilizada a partir de agora, pois facilita a compreensão dos itens que serão

abordados. Vale ressaltar que o processo de conversão das variáveis contínuas em discretas, neste trabalho, são realizadas automaticamente pelas ferramentas utilizadas.

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (14)$$

onde:

- $e(k)$ : erro atual;
- $r(k)$ : sinal de referência;
- $y(k)$ : saída atual do processo.

A Tabela 4 mostra as entradas dos controladores *fuzzy* P, PD, PI e PID, em tempo discreto.

**Tabela 4: Variações de controladores *fuzzy* PID.**

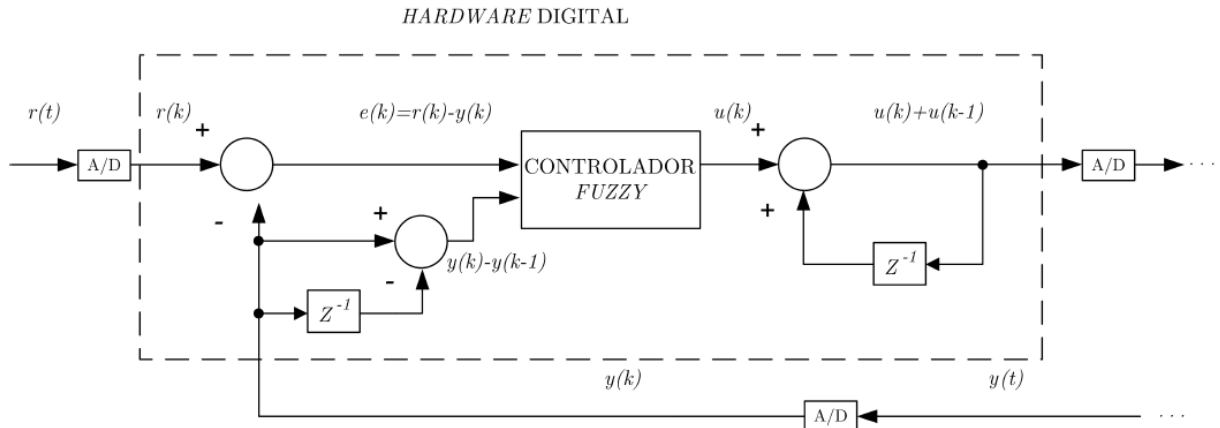
Tipo	Entradas
P	$e(k) = r(k) - y(k)$
PD	$e(k) = r(k) - y(k)$ $\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1)$
PI	$e(k) = r(k) - y(k)$ $\sum_{i=1}^k e(i) = e(k) + e(k - 1) + e(k - 2) + \dots$
PID	$e(k) = r(k) - y(k)$ $\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1)$ $\sum_{i=1}^k e(i) = e(k) + e(k - 1) + e(k - 2) + \dots$

Fonte: Autoria própria

Segundo Jantzen (2007) outra maneira de se obter um controlador *fuzzy* PI é através da utilização de um termo integrativo na saída de um controlador *fuzzy* PD, cujas entradas são de erro e variação do erro. Este tipo de controlador é



denominado como controlador *fuzzy* incremental e foi a estrutura escolhida para a elaboração dos quatro sistemas de controle *fuzzy* utilizados neste trabalho. A Figura 12 mostra o diagrama de blocos da estrutura utilizada.



**Figura 12: Diagrama de blocos de um controlador *fuzzy* incremental.**  
**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 12, é possível observar que as variáveis de entrada e saída do sistema sofrem um processo de discretização o qual, no caso deste trabalho, foi realizado automaticamente pelo sistema do PAC utilizado, conforme já citado. É possível observar também que ao invés de ser utilizada a variação do sinal de erro, foi utilizada a variação do sinal de saída do sistema, uma vez que esta apresentou distúrbios menores devido à presença de ruídos nos sinais.

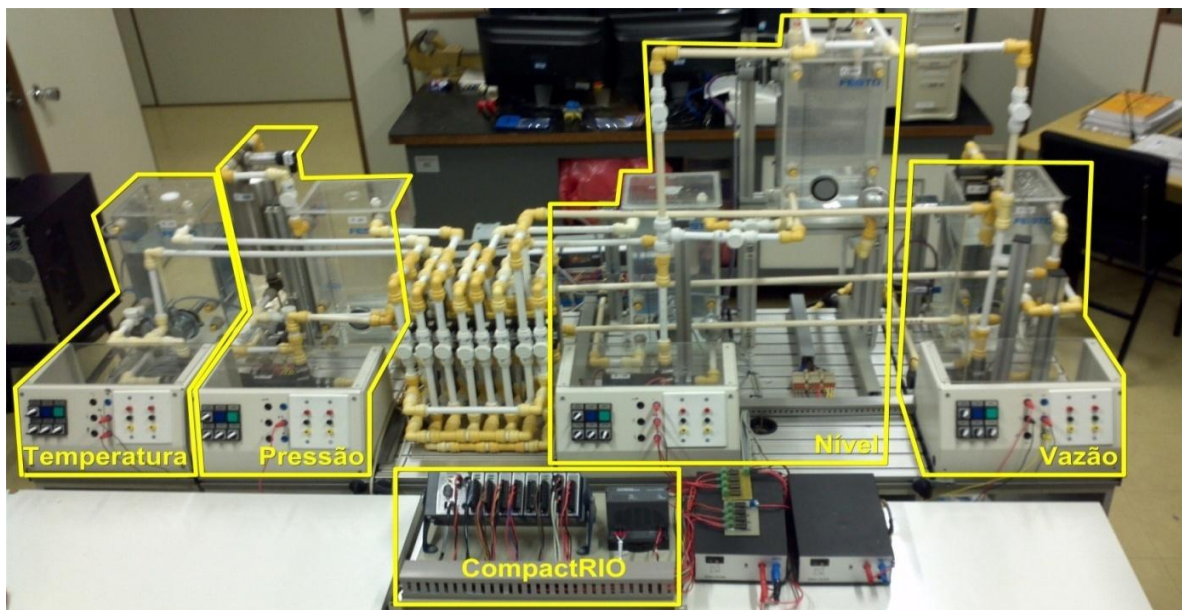
Como o sistema de controle *fuzzy* de cada uma das malhas da planta industrial didática possuem uma composição diferente no que diz respeito às funções de pertinências, eles serão detalhados posteriormente.

### 3 INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo são abordadas as ferramentas utilizadas para a realização deste trabalho, que são: a planta industrial didática modificada da fabricante Festo, o *software* de programação gráfica LabVIEW e o PAC CompactRIO.

#### 3.1 PLANTA INDUSTRIAL DIDÁTICA

A planta didática em questão, apresentada na Figura 13, possui quatro malhas de controle, que são: malha de controle de temperatura, malha de controle de pressão, malha de controle de nível e malha de controle de vazão. Possui também um sistema de manobra referente à troca de fluídos entre os reservatórios de tais malhas. (ALMEIDA, 2012).



**Figura 13: Planta didática industrial readaptada**  
**Fonte: Autoria própria**

##### 3.1.1 Sistema de manobra de fluídos

Este sistema interliga os reservatórios de água dos quatro módulos de controle da planta, sendo que cada módulo possui para o funcionamento do mesmo: uma bomba centrífuga para realizar o deslocamento da água; duas válvulas solenoides, sendo uma para a entrada de água no reservatório e outra para a saída e; dois sensores capacitivos, um para medir o nível mínimo de água e outro para o nível máximo de cada reservatório. Esses componentes possuem dois estados, um ligado

e outro desligado, sendo assim, as variáveis referentes ao funcionamento dos mesmos são discretas.

Existem 16 operações possíveis neste sistema de manobra, uma vez que deve ser possível para cada malha remanejar água para as demais e inclusive fazer a circulação de água pela mesma.

### 3.1.2 Malha de controle de temperatura

Esta malha possibilita uma faixa de controle que se estende da temperatura ambiente até 60° C, devido à limitação de segurança da resistência de aquecimento existente na mesma.

A Figura 14 ilustra o diagrama de instrumentação e tubulação desta malha de controle e a Tabela 5 fornece a descrição deste diagrama.

**Tabela 5: Descrição do diagrama da malha de controle de temperatura.**

Item	Descrição
UIC-01	Controlador Programável para Automação
B-10	Bomba centrífuga
T-11	Reservatório (300 mm)
V-12	Válvula solenoide
V-13	Válvula manual
V-14	Válvula solenoide
V-15	Válvula manual
V-16	Válvula manual
V-17	Válvula manual
LSH-18	Indicador e transmissor de nível
LSL-19	Indicador e transmissor de nível
TT-100	Transmissor de temperatura
R-101	Resistência de aquecimento

Fonte: ALMEIDA (2012)

No processo de controle de temperatura estão envolvidos o transmissor TT-100 para o monitoramento da temperatura e a resistência R-101 para o aquecimento da água dentro do reservatório T-11. A válvula manual V-16 é utilizada para o

esvaziamento do reservatório, a válvula manual V-17 para promover a circulação de água no próprio reservatório e os demais componentes listados na Tabela 5 fazem parte do processo de manobra de água entre as malhas de controle.

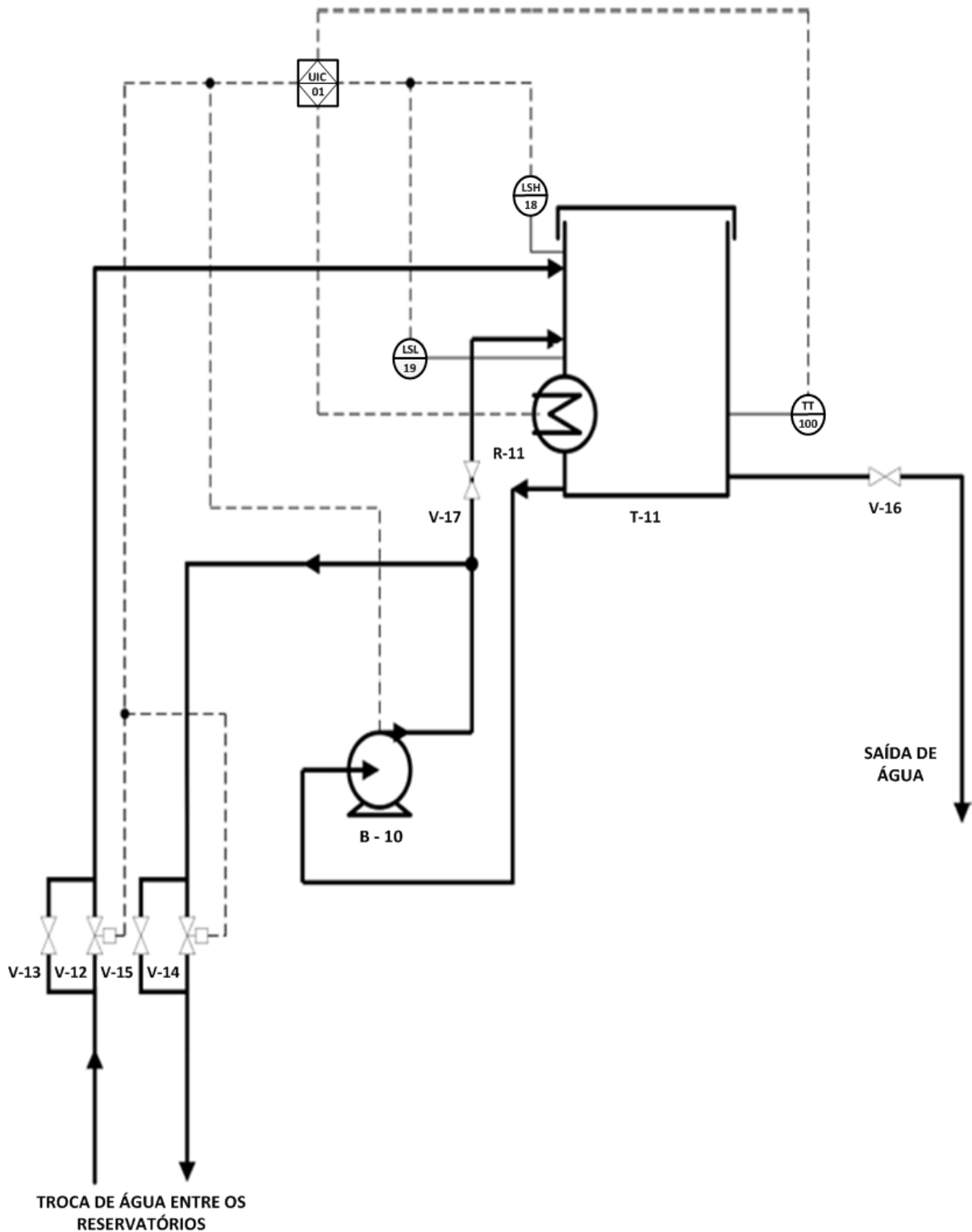


Figura 14: Diagrama de instrumentação e tubulação – malha de temperatura  
Fonte: ALMEIDA (2012)

### 3.1.3 Malha de controle de pressão

Esta malha possibilita uma faixa de controle pressão de 35 mbar a 100 mbar, sendo que a pressão máxima é limitada pela faixa de operação do sensor que mensura a mesma e a mínima é determinada pela pressão inicial existente no reservatório no qual é realizada a medição.

A Figura 15 ilustra o diagrama de instrumentação e tubulação desta malha de controle e a Tabela 6 fornece a descrição deste diagrama.

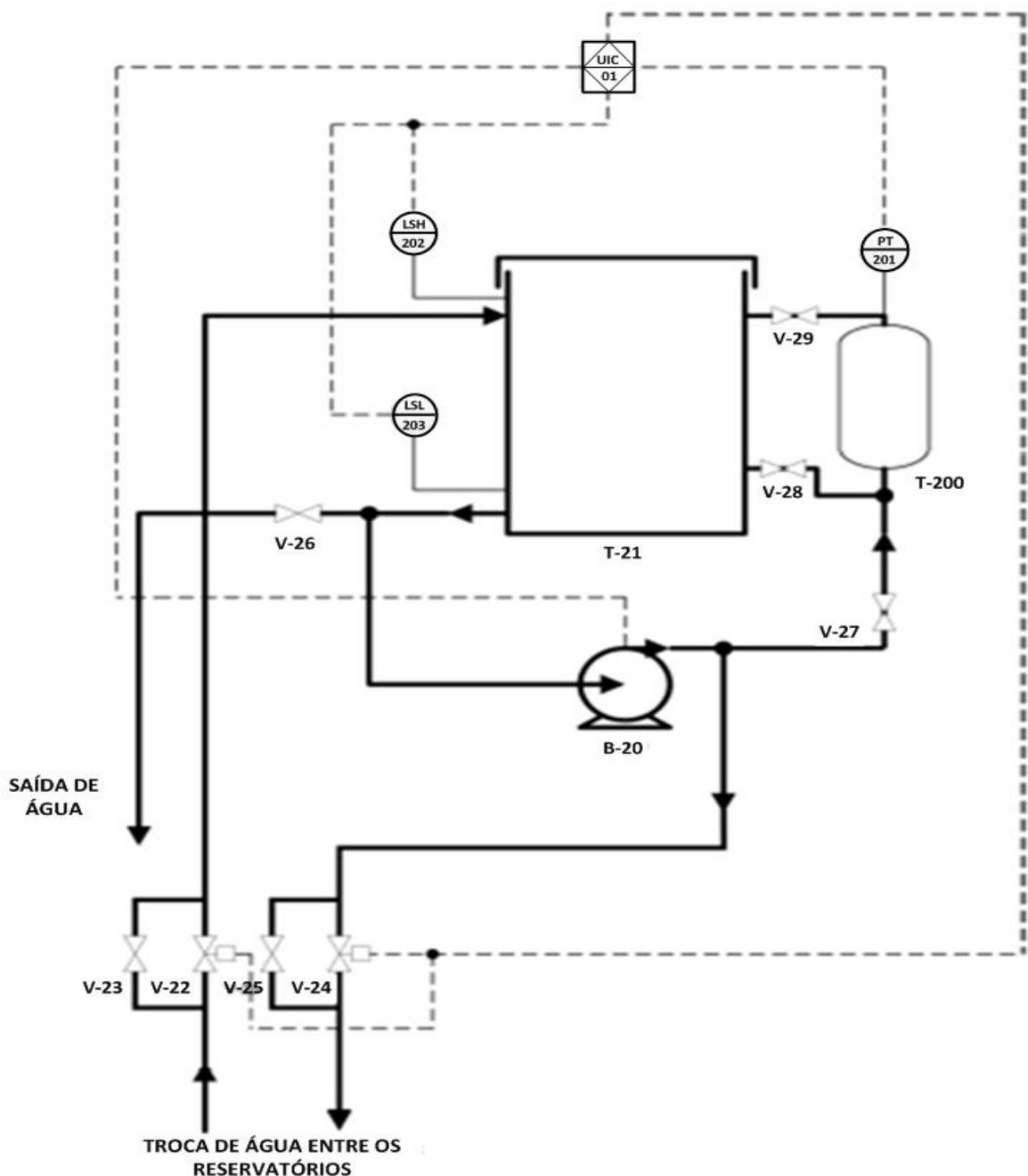


Figura 15: Diagrama de instrumentação e tubulação – malha de pressão  
Fonte: ALMEIDA (2012)

**Tabela 6: Descrição do diagrama da malha de controle de pressão.**

Item	Descrição
UIC-01	Controlador Programável para Automação
B-20	Bomba centrífuga
T-21	Reservatório (300 mm)
V-22	Válvula solenoide
V-23	Válvula manual
V-24	Válvula solenoide
V-25	Válvula manual
V-26	Válvula manual
V-27	Válvula manual
V-28	Válvula manual
V-29	Válvula manual
T-200	Reservatório
PT-201	Transmissor de pressão
LSH-202	Indicador e transmissor de nível
LSL-203	Indicador e transmissor de nível

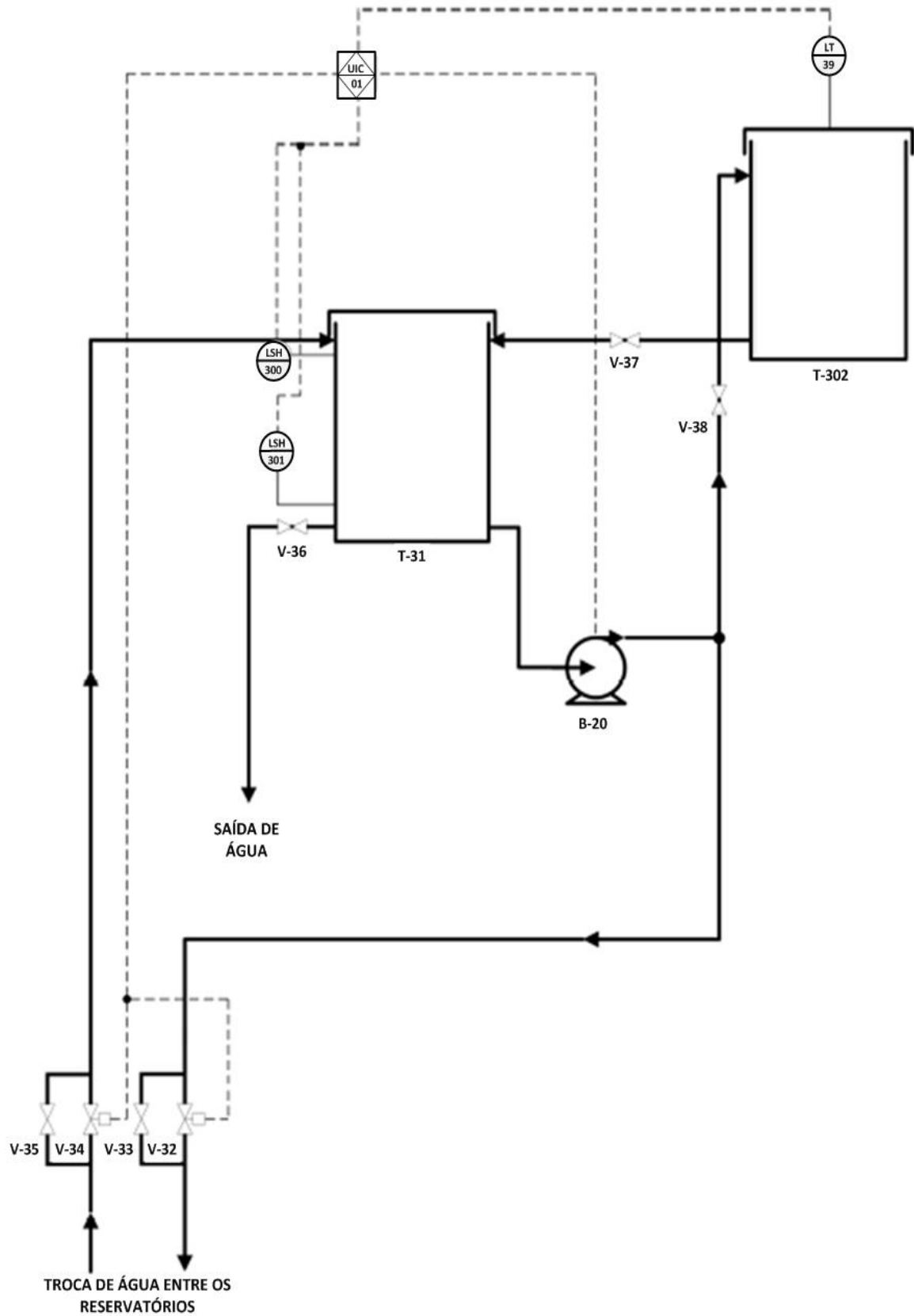
Fonte: ALMEIDA (2012)

No processo do controle de pressão estão envolvidos, a bomba B-20 para realizar o deslocamento de água do reservatório T-21 para o reservatório T-200, onde é realizada a medição de pressão através do sensor PT-201. As válvulas manuais V-27, V-28 e V-29, também fazem parte deste processo. A válvula manual V-26 é utilizada para o esvaziamento do reservatório T-21 e os demais componentes listados na Tabela 6 são parte integrante do processo de troca de fluidos entre as malhas de controle.

#### 3.1.4 Malha de controle de nível

Esta malha possibilita uma faixa de controle nível entre 50 mm e 280 mm, tanto o nível mínimo como o máximo são determinados pelas características do sensor que é utilizado para a medição.

A Figura 16 ilustra o diagrama de instrumentação e tubulação desta malha de controle e a Tabela 7 fornece a descrição deste diagrama.



**Figura 16: Diagrama de instrumentação e tubulação – malha de nível**  
 Fonte: ALMEIDA (2012)

**Tabela 7: Descrição do diagrama da malha de controle de nível.**

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>
UIC-01	Controlador Programável para Automação
B-30	Bomba centrífuga
T-31	Reservatório
V-32	Válvula solenoide
V-33	Válvula manual
V-34	Válvula solenoide
V-35	Válvula manual
V-36	Válvula manual
V-37	Válvula manual
V-38	Válvula manual
LT-39	Transmissor de nível
LSH-300	Indicador e transmissor de nível
LSL-301	Indicador e transmissor de nível
T-302	Reservatório

Fonte: ALMEIDA (2012)

Nesta malha de controle nível os componentes que compõem a mesma para esta finalidade são: a bomba centrífuga B-40 utilizada para promover o deslocamento de água do reservatório T-31 para o T-302 onde é realizado o monitoramento do nível do mesmo através do sensor LT-39. As válvulas manuais V-36 e V-37 também fazem parte deste processo. A válvula manual V-38 é utilizada para esvaziar o reservatório T-31 e os demais componentes listados na Tabela 7 fazem parte do sistema de manobra de fluidos entre os reservatórios das malhas de controle.

### 3.1.5 Malha de controle de vazão

Esta malha possibilita uma faixa de controle nível vazão entre 0,5 l/min e 2,15 l/min, onde o nível máximo é limitado pelo máxima potência da bomba centrífuga que promove o deslocamento de água e o nível mínimo é limitado pelo sensor que realiza a medição da vazão. Porém vale ressaltar que somente a partir de



aproximadamente 1 l/min de vazão que o sensor utilizado fornece um sinal sem muita influencia de ruídos e possíveis turbulências geradas pelo fluxo de água.

A Figura 17 ilustra o diagrama de instrumentação e tubulação desta malha de controle e a Tabela 8 fornece a descrição deste diagrama.

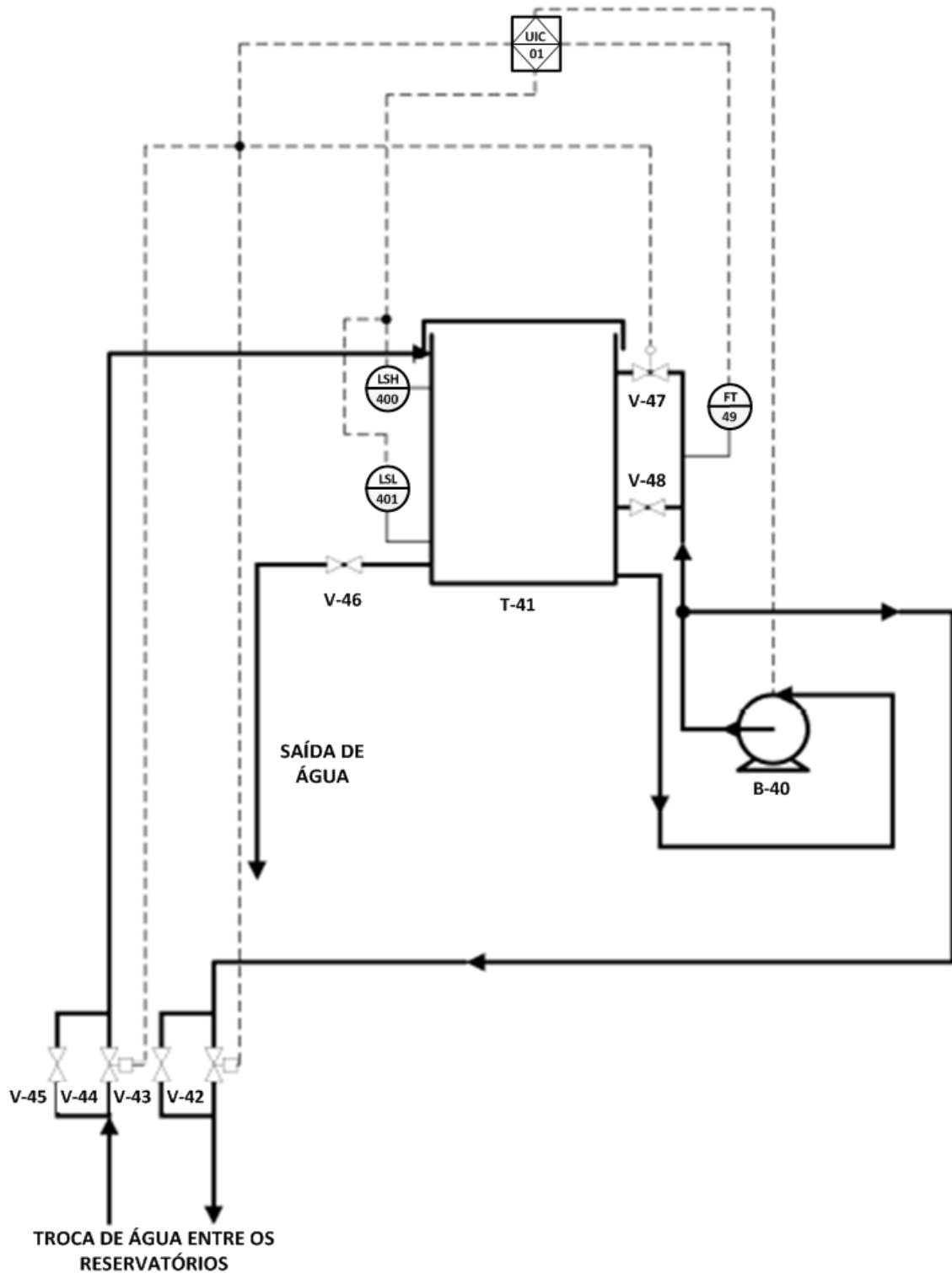


Figura 17: Diagrama de instrumentação e tubulação – malha de vazão  
Fonte: ALMEIDA (2012)

**Tabela 8: Descrição do diagrama da malha de controle de vazão.**

Item	Descrição
UIC-01	Controlador Programável para Automação
B-40	Bomba centrífuga
T-41	Reservatório (300 mm)
V-42	Válvula solenoide
V-43	Válvula manual
V-44	Válvula solenoide
V-45	Válvula manual
V-46	Válvula manual
V-47	Válvula proporcional
V-48	Válvula manual
FT-49	Transmissor de vazão
LHS-400	Indicador e transmissor de nível
LSL-401	Indicador e transmissor de nível

Fonte: ALMEIDA (2012)

Fazem parte do processo de controle de vazão a bomba B-40 que realiza a circulação de água pelo sensor FT-49, que por sua vez realiza a medida da vazão controlada através da válvula proporcional V-47. A válvula manual V-46 realiza o esvaziamento do reservatório T-41 e os demais componentes listados na Tabela 8 fazem parte do sistema de manobra entre os reservatórios das malhas de controle.

### 3.2 LabVIEW

O LabVIEW é um *software* utilizado em processos de controle e automação baseado em linguagem de programação gráfica, fabricado pela *National Instruments*, que emprega ícones ao invés de textos para criar aplicações, ou seja, o programa é feito na forma de um diagrama de blocos, como mostra a Figura 18.

Todo programa elaborado no LabVIEW é chamado de instrumento virtual (VI- *Virtual Instrument*) devido à sua aparência e operação assemelharem-se às de instrumentos de medição e controle reais. Um VI é constituído por duas partes, que são:

- Diagrama de blocos – é a estrutura do programa onde a programação é realizada, ou seja, é parte que contém o código fonte construído de forma gráfica pelo usuário;
- Painel frontal – é a interface com o usuário, onde são alocados todos os controles, gráficos e indicadores, resultando em uma tela que simula o painel físico de um instrumento.

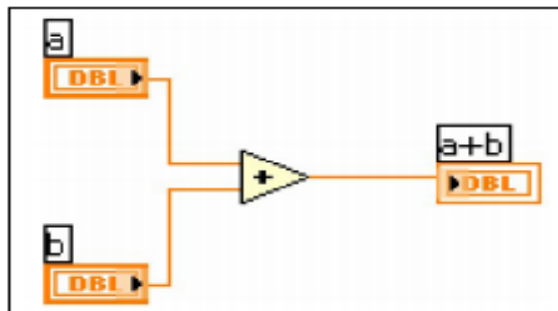


Figura 18: Programação em diagrama de blocos  
Fonte: Autoria própria

Inicialmente, este *software* foi desenvolvido apenas para facilitar a coleta de dados dos instrumentos de laboratório, provenientes de sistemas de aquisição. Atualmente, o LabVIEW pode ser utilizado para adquirir dados de instrumentos, análise e processamento de dados, automação e para controlar instrumentos e equipamentos (LARSEN, 2011).

Este *software* possibilita, através do módulo LabVIEW *Real-Time*, a realização de vários tipos de operações em tempo real e determinado. Tais operações podem ir desde uma simples indicação gráfica do sinal proveniente de um sistema de medição até o desenvolvimento de um sistema de controle.

### 3.3 CompactRIO

O CompactRIO consiste em um PAC fabricado pela National Instruments, formado por um chassi reconfigurável baseado na tecnologia FPGA (*Field – Programmable Gate Array*).

Cada chassi aloja um processador de ponto flutuante embarcado com operação em tempo real, um FPGA de alto desempenho, módulos de E/S (entradas e saídas) com troca a quente. Cada módulo de E/S é conectado diretamente ao FPGA, promovendo um rápido processamento de sinais. A conexão entre o FPGA e

o processador embarcado é realizada através de uma rede PCI de alta velocidade (BILIK et al., 2008). A Figura 19 ilustra a estrutura interna citada acima.

A programação deste dispositivo, tanto do processador quanto do FPGA, é realizada por meio do *software* LabVIEW através de dois modos, LabVIEW FPGA e *Scan mode*, sendo que ambos estão alocados no módulo *Real-Time* do programa. O primeiro é mais utilizado em sistemas que exigem *loops* de controle analógico acima de 1kHz e com taxa de atualizações de E/S acima de 20kHz e o segundo possui uma programação menos complexa, porém deve ser utilizado em sistemas com exigências inferiores às citadas acima.

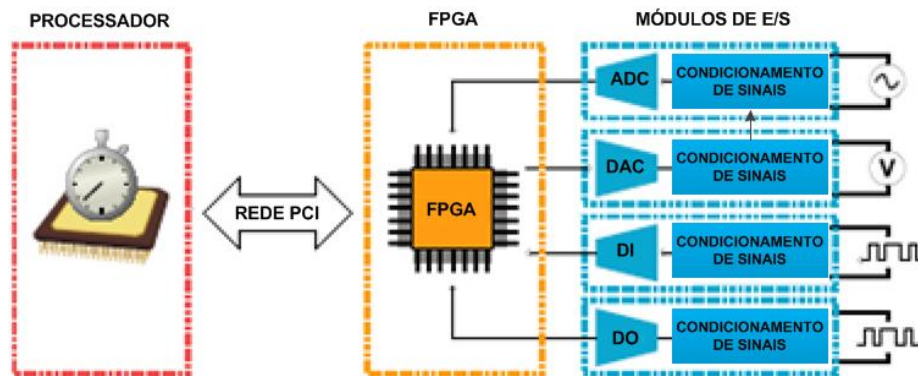


Figura 19: Estrutura interna do CompactRIO  
Fonte: BILIK et al. (2008)

## 4 INTERFACES GRÁFICAS DE USUÁRIO

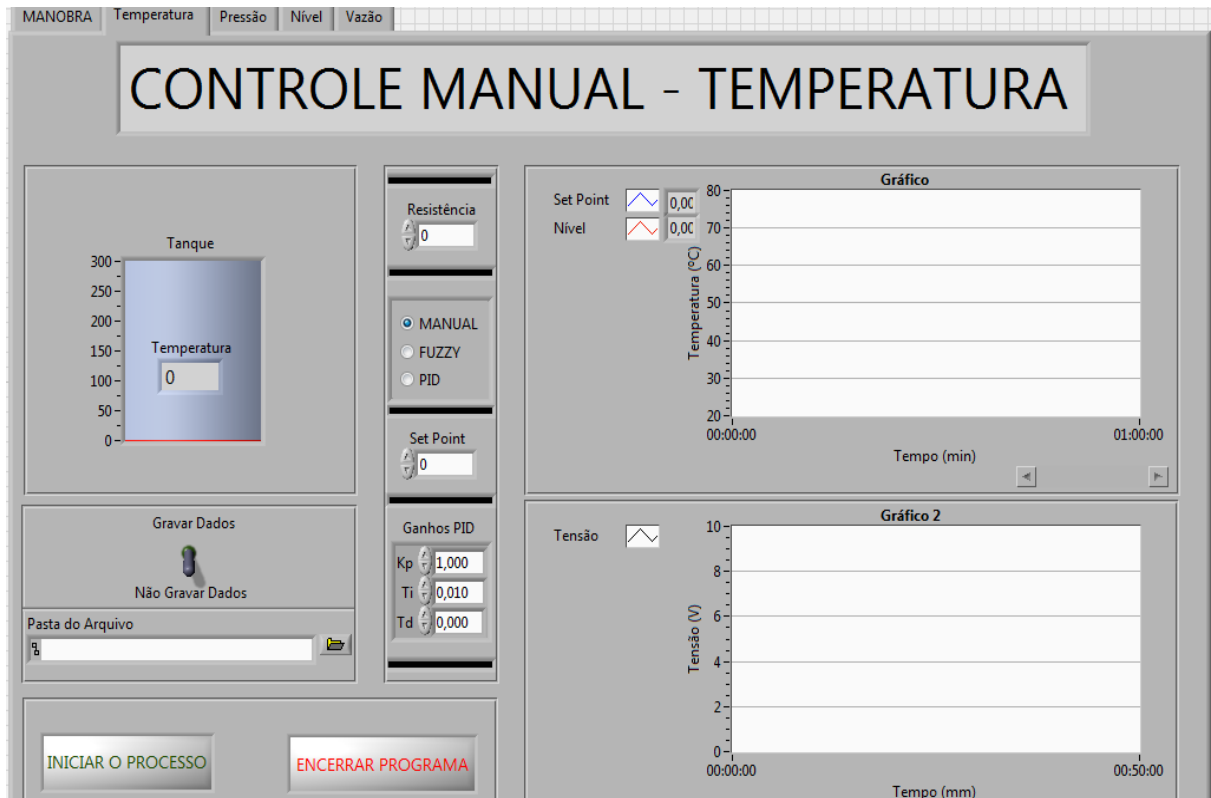
Foram desenvolvidas cinco interfaces gráficas neste trabalho, sendo uma para o processo de automação do sistema de manobra de água entre as malhas de controle da planta industrial didática e uma para cada módulo de controle.

Para a elaboração das interfaces dos sistemas de controle foi realizado um levantamento de requisitos que deveriam compor as mesmas, de modo a facilitar tanto a utilização, como a visualização dos resultados obtidos em cada sistema. Assim, as quatro interfaces criadas para os sistemas de controle seguiram o mesmo padrão, e possuem:

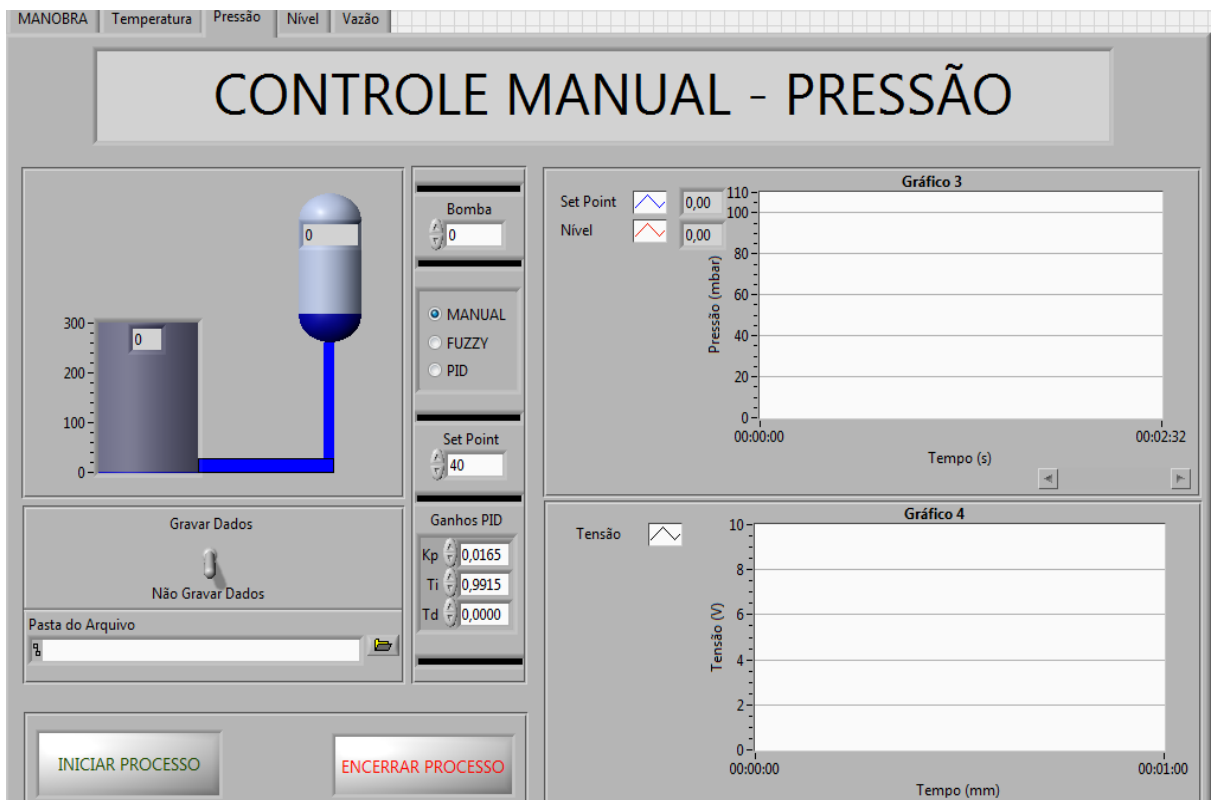
- A animação do processo em questão;
- Opções de controle manual, PID e *fuzzy*;
- Um gráfico contendo as informações do set point escolhido e a resposta de saída do sistema;
- Um gráfico contendo a ação de controle do sistema;
- Botão para a seleção da gravação dos dados e seleção da pasta para a gravação dos mesmos;
- Botões para iniciar e finalizar a aplicação.

As Figuras 20, 21, 22 e 23 mostram, respectivamente, as interfaces de usuário do sistema de controle de temperatura, pressão, nível e vazão. É válido ressaltar que através da forma como foi realizada a programação, os quatro sistemas de controle estão no mesmo VI e uma vez selecionada uma opção das opções de controle não é necessário interromper a execução do VI para selecionar outra ou selecionar outra malha para realizar o controle. Sendo que em cada interface depois de iniciado o processo fica disponível para o usuário parar somente a opção já selecionada para escolher outra ou interromper a execução do VI.

A interface de usuário do processo de automação do sistema de manobra de água difere das outras interfaces criadas para os sistemas de controle como pode ser observado na Figura 24, porém também está alocado no mesmo VI que as outras interfaces, sendo assim também pode ser selecionado sem que seja necessário a interrupção da execução do programa.



**Figura 20: Interface de usuário da malha de temperatura**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 21: Interface de usuário da malha de pressão**  
**Fonte: Autoria própria**

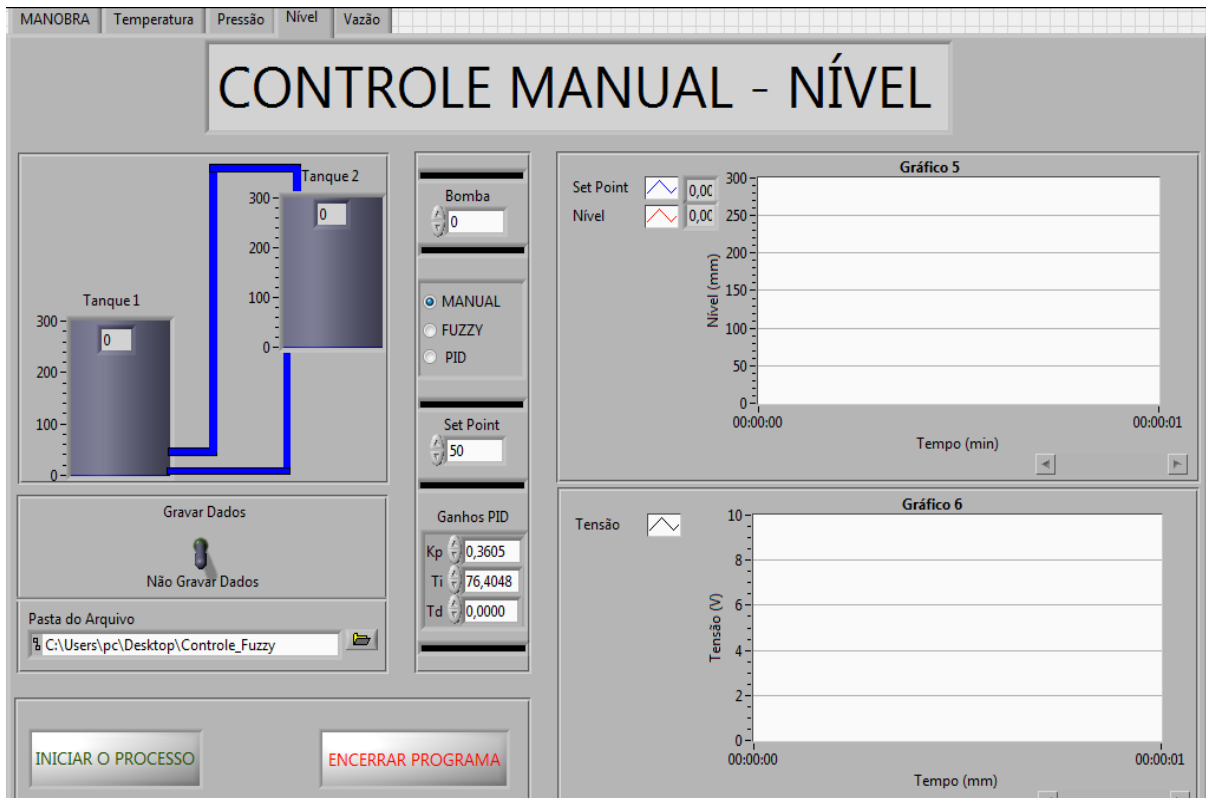


Figura 22: Interface de usuário da malha de nível  
Fonte: Autoria própria

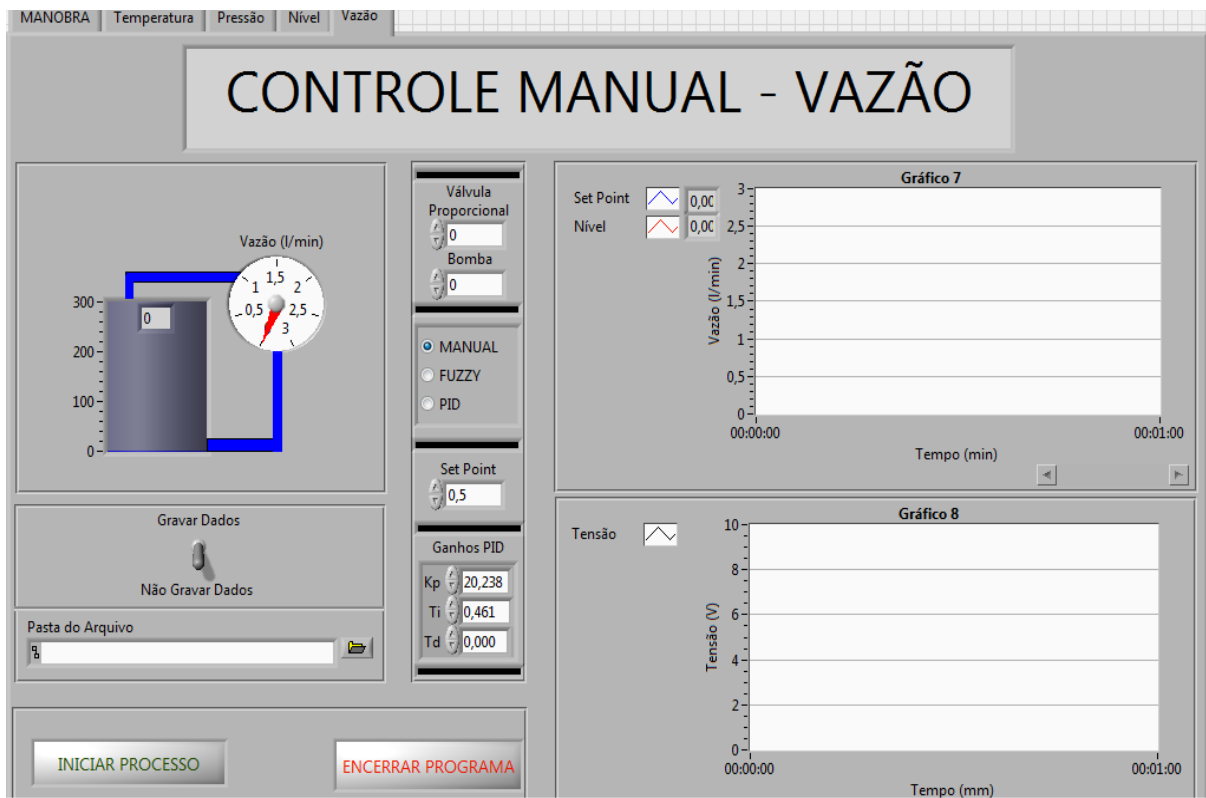
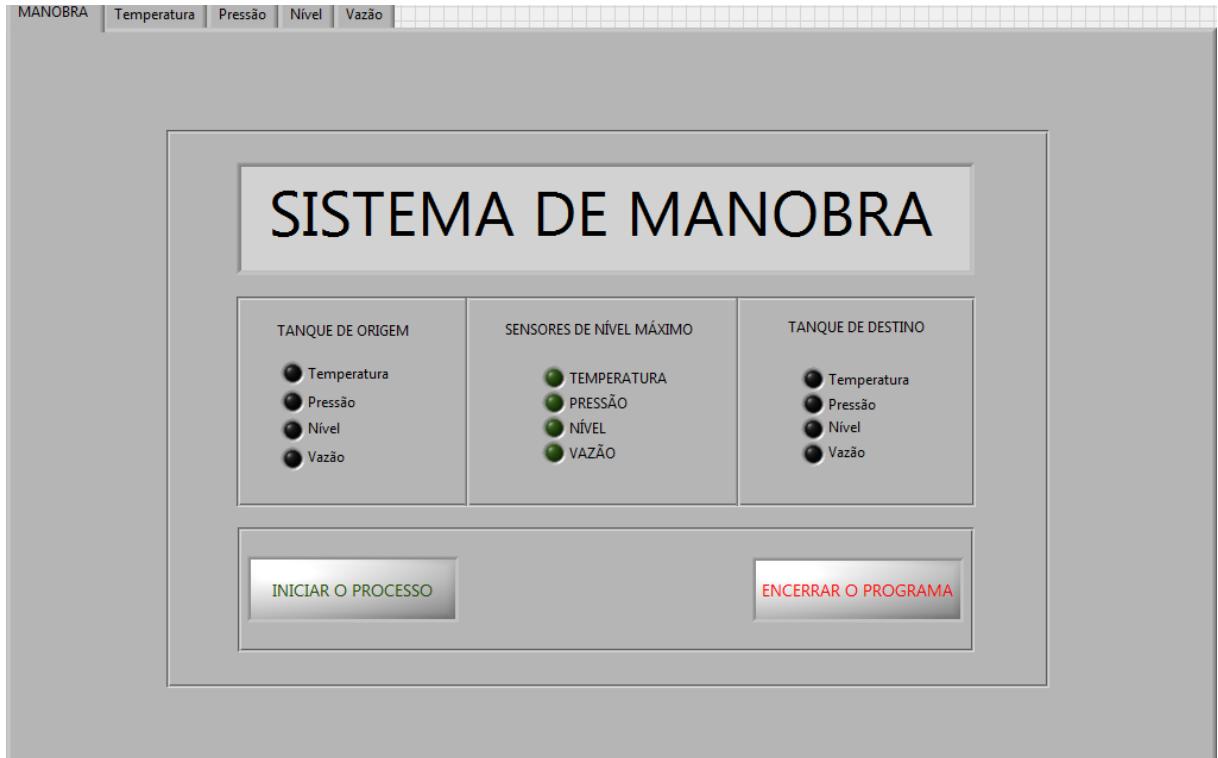


Figura 23: Interface de usuário da malha de temperatura  
Fonte: Autoria própria



**Figura 24: Interface de usuário do sistema de manobra**  
**Fonte: Autoria própria**



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos sistemas de automação e de controle desenvolvidos neste trabalho. Onde, para demonstrar os resultados do sistema de automação será apresentada a simulação de um dos processos pertencentes ao mesmo e no caso dos sistemas de controle serão ilustrados os gráficos da saída e da ação de controle de cada sistema, bem como as curvas de identificação e sintonia para os sistemas PID e para os sistemas *fuzzy* as funções de pertinência e as regras de inferência utilizadas.

Vale ressaltar que para a validação dos sistemas de controle das malhas de pressão, nível e vazão foram propostas três regiões de operação (*set points*) em cada sistema, sendo o primeiro em uma região intermediária, o segundo próximo ao limite superior e o terceiro próximo do limite inferior do *range* de saída de cada malha. Já para a de temperatura foram determinados somente dois *set points*, um intermediário e outro próximo ao limite superior do *range* de saída da mesma, uma vez que não existe nenhum dispositivo que diminua a temperatura deste sistema, levaria algumas horas para diminuir a temperatura da água contida no reservatório do mesmo, inviabilizando a aplicação de um degrau negativo no valor do *set point*.

### 5.1 SISTEMA DE AUTOMAÇÃO

A simulação da manobra de água entre as malhas de temperatura e pressão, realizada através do *System Manager*, que consiste em uma das ferramentas do *software* LabVIEW, será aqui demonstrada.

Para o funcionamento da mesma, primeiramente as opções da malha de origem e destino devem ser selecionadas, como mostra a Figura 25. Os comandos dados ao CompactRIO são demonstrados na Figura 26, onde é possível visualizar que a saída referente à válvula de saída do reservatório de pressão V-24 e a de entrada do reservatório de temperatura V-12 são energizadas e também a da bomba centrífuga da malha de pressão B-20, onde através da programação realizada o acionamento desta última, por segurança, ocorre 500 ms após o das válvulas.

Após energizar a entrada digital referente ao sensor LIT-18, simulando assim a atuação do sensor de nível máximo de água do reservatório da malha de temperatura, o processo é encerrado desligando as válvulas e a bomba que

estavam acionadas e impossibilitando o remanejamento de água para este reservatório enquanto o mesmo estiver em seu nível máximo. As demais operações como, a manobra de fluido deste reservatório para qualquer um dos demais e a circulação de água dentro da própria malha em questão, podem ser selecionadas pelo usuário mesmo com o sensor atuado, pois o VI só para de executar quando o botão ENCERRAR O PROGRAMA é selecionado. A Figura 27 mostra a mudança ocorrida no painel de interface e a Figura 28 a mudança ocorrida nas E/S do CompactRIO quando o sensor é atuado.



Figura 25: Tela de interface – seleção da manobra  
Fonte: Autoria própria

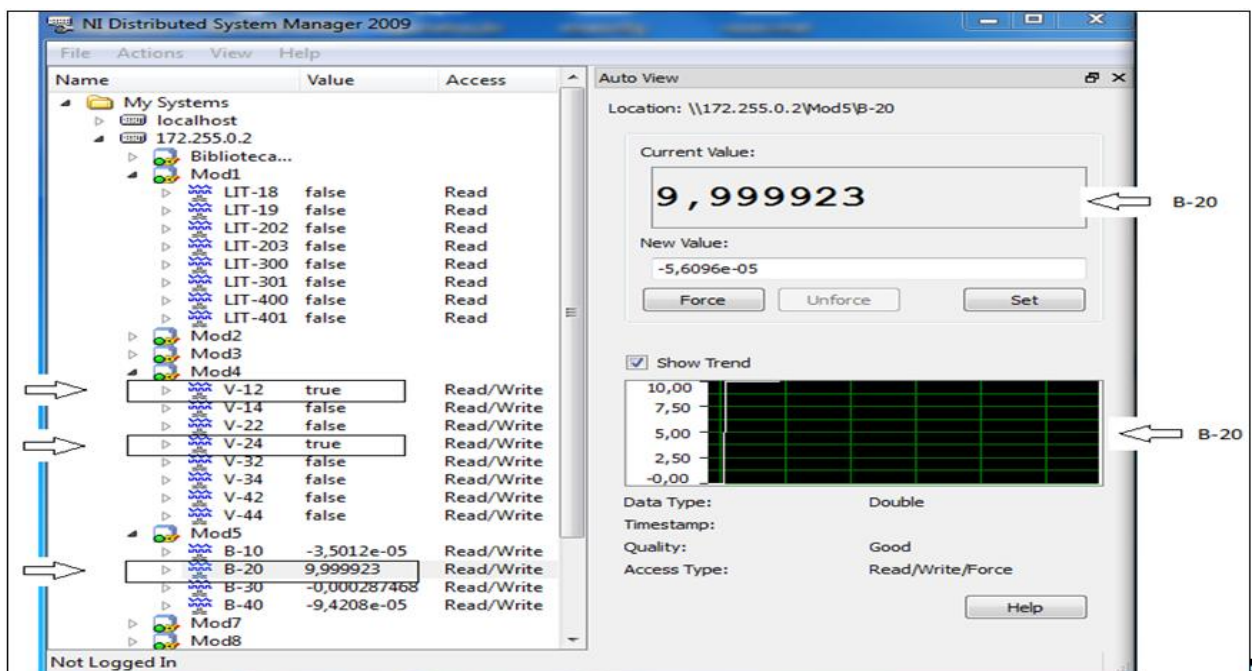


Figura 26: System Manager – monitoramento das E/S  
Fonte: Autoria própria

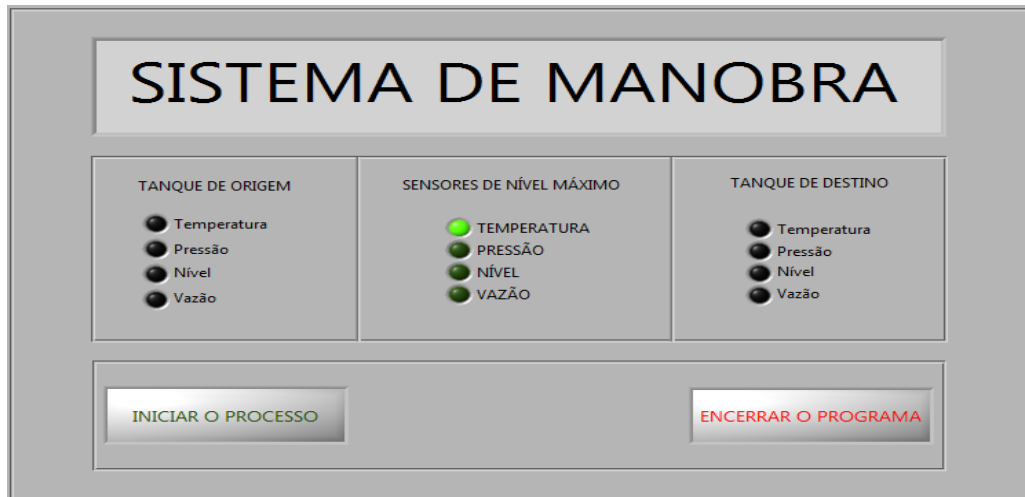


Figura 27: Tela de interface – sensor atuado  
Fonte: Autoria própria

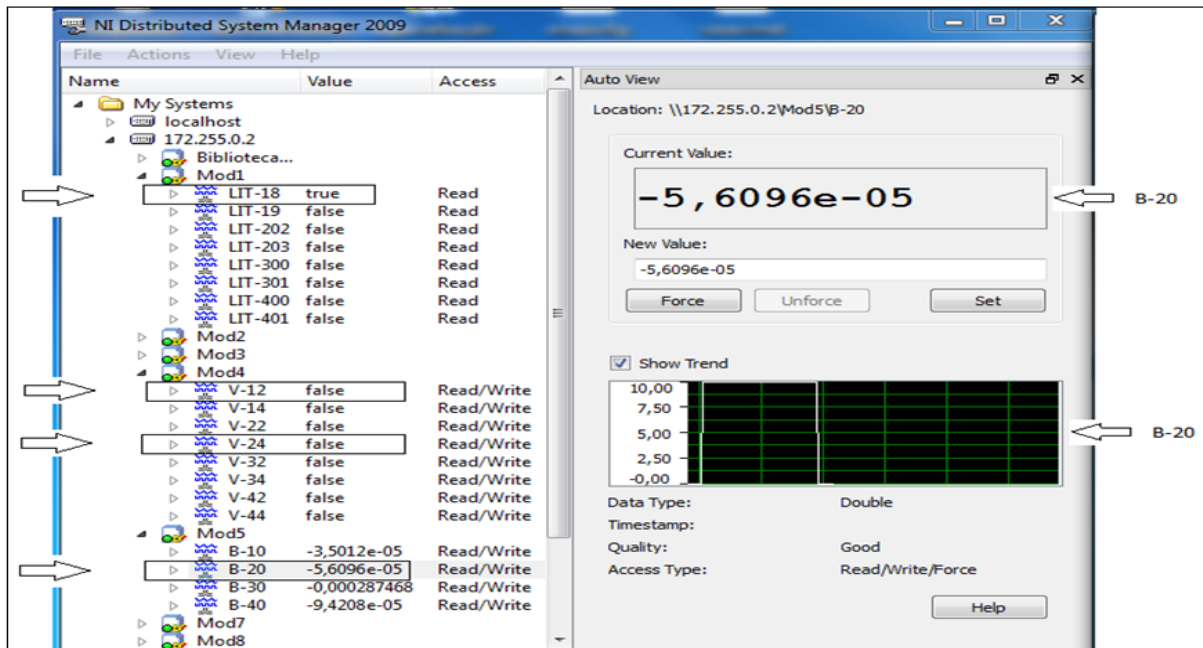


Figura 28: System Manager – sensor atuado  
Fonte: Autoria própria

## 5.2 SISTEMAS DE CONTROLE PID E FUZZY

Aqui serão apresentados a composição dos sistemas de controle implementados em cada uma das quatro malhas da planta industrial didática, seguido pelos resultados obtidos pelos mesmos.

No caso dos controladores PID serão mostrados a identificação de cada sistema, sintonia dos controladores PID e os resultados obtidos em cada sistema. Para os controladores *fuzzy*, serão mostradas as funções de pertinência e as regras

de inferência utilizadas em cada caso e por ultimo os resultados de cada sistema de controle.

Para à análise dos resultados, considera-se satisfatório que os sistemas de controle estabilizem as malhas da planta industrial didática, nos *set points* definidos, com máximo sobressinal igual ou inferior a 3% e erro em regime igual ou inferior a 2% (OGATA, 2000).

Como poderá ser observado nos itens seguintes foi utilizado um controlador do tipo PI nas quatro malhas. A escolha deste controlador ao invés do tipo PID foi devido ao fato de que em todos os casos aqui tratados a parcela derivativa amplificou em demasia os ruídos existentes em cada sistema, inviabilizando assim a utilização da mesma na composição dos controladores.

Também poderá ser observado que todos os sistemas de controle *fuzzy* possuem duas entradas, sendo que uma corresponde ao erro, que neste trabalho, consiste na diferença entre um determinado *set point* escolhido e o valor da saída do sistema medido pelo sensor respectivo de cada malha e a outra é a variação do erro que é medida a cada ciclo de atualização das E/S do PAC CompactRIO.

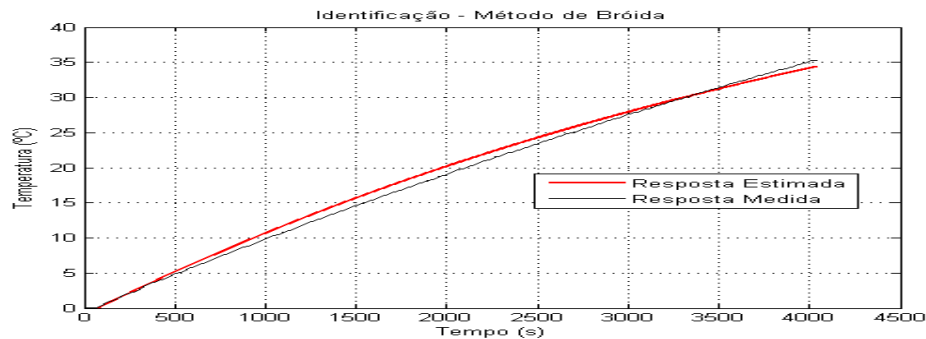
### 5.2.1 Malha de temperatura

Para a obtenção do modelo matemático da malha de temperatura foi realizado um ensaio em malha aberta (desconsiderando a temperatura ambiente) e utilizado o método de Bróida para a identificação. A função de transferência obtida é mostrada na Equação (15) e a Figura 29 ilustra as curvas das respostas medidas e estimadas do sistema. Neste caso não foi possível obter o valor de saturação da variável medida, devido a limitações técnicas da resistência de aquecimento desta malha, sendo assim, foi necessário realizar uma extrapolação da curva obtida, que resultou num valor máximo de 60°C de variação de temperatura.

$$G(s) = \frac{61,32}{4800s + 1} e^{-80s} \quad (15)$$

Para a obtenção dos ganhos (sintonia) do controlador PI foi utilizado o método de Cohen Coon (ASTROM; HÄGGLUND, 1995). Onde os parâmetros encontrados foram:

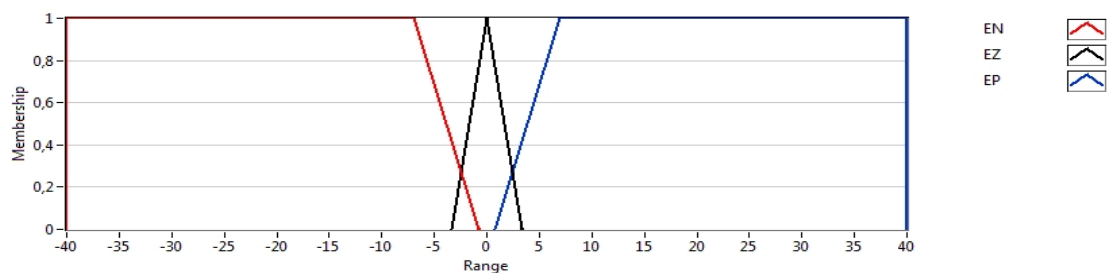
- $K_p = 2,998$ .
- $T_i = 3,188$ .



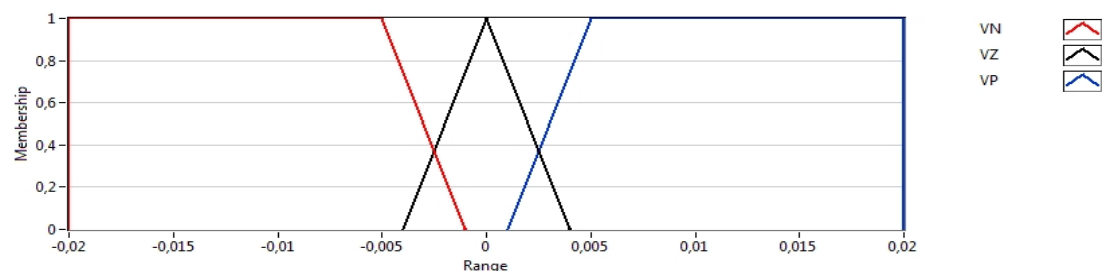
**Figura 29: Identificação da malha de temperatura**  
**Fonte: Autoria própria**

Como pode ser observado na Figura 29, a curva de identificação do sistema (resposta estimada) ficou um pouco diferente da curva de resposta medida, fato este que implicou na necessidade de realizar um ajuste no ganho proporcional para melhorar o desempenho do controlador, resultando num valor  $K_p = 5,00$ .

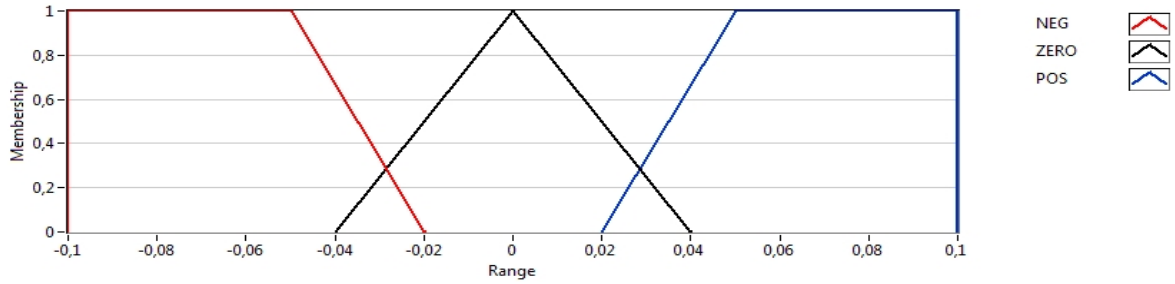
As funções de pertinência definidas para cada uma das variáveis envolvidas no processo de controle *fuzzy* da malha de temperatura estão ilustradas nas Figuras 30, 31 e 32. Onde a primeira corresponde ao erro, a segunda à variação do erro e a última à saída do controlador.



**Figura 30: Função de pertinência do erro – malha de temperatura**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 31: Função de pertinência da variação do erro – malha de temperatura**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 32: Função de pertinência da saída do controlador – malha de temperatura**  
**Fonte: Autoria Própria**

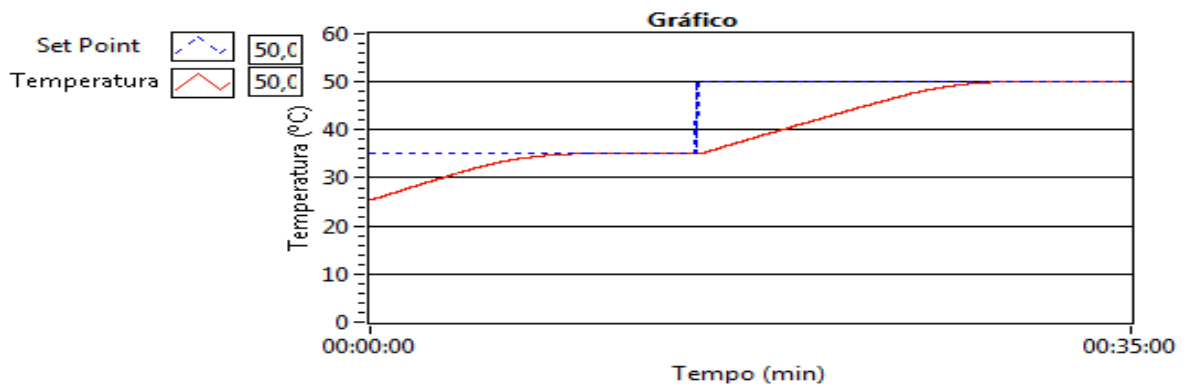
Na Tabela 9 estão apresentadas as regras de inferências do sistema de controle da malha de temperatura.

**Tabela 9: Tabela das regras de inferência – malha de temperatura.**

Saída		Variação do Erro		
		VN	VZ	VP
Erro	EN	NEG	NEG	NEG
	EZ	POS	ZERO	NEG
	EP	POS	POS	POS

Fonte: Autoria própria

Para a validação dos sistemas de controle foram definidos dois *set points*, o primeiro em 35° C e o segundo 50° C. As Figuras 33 e 34 mostram, respectivamente, o sinal de saída do sistema – PID e o sinal de saída do sistema – *fuzzy*.



**Figura 33: Sinal de saída do sistema – PID, malha de temperatura**  
**Fonte: Autoria própria**

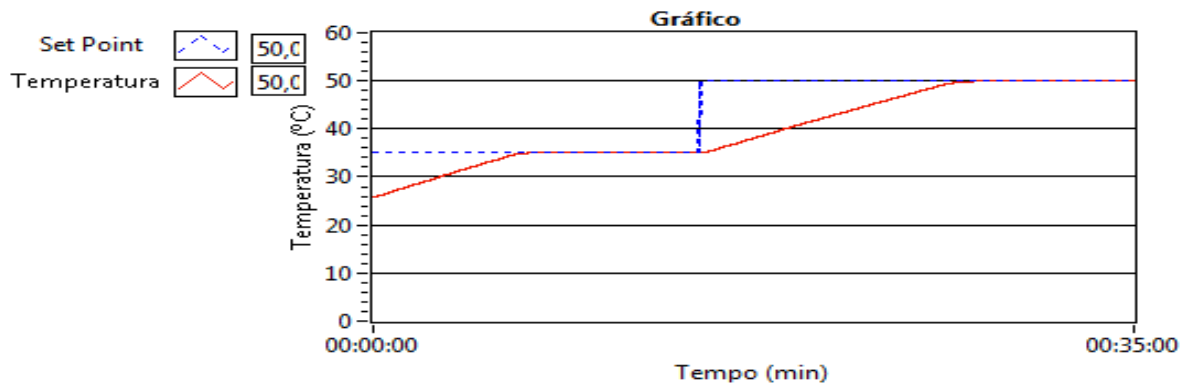


Figura 34: Sinal de saída do sistema – *fuzzy*, malha de temperatura  
Fonte: Autoria própria

Como é possível observar nas Figuras 33 e 34, tanto o sistema de controle PID, como o sistema de controle *fuzzy* estabilizaram a malha de temperatura nos *set points* definidos sem apresentar erro em regime permanente e sobressinal. No entanto, o controlador *fuzzy* obteve um desempenho superior que o PID, pois teve tempos de subida e assentamento em média 16,87% mais rápidos, como pode ser observado através dos dados mostrados na Tabela 10, onde  $M_p$  representa o máximo sobressinal,  $t_s$  representa os tempos de subida e assentamento, pois no caso são iguais e  $e_{ss}$  representa o erro em regime.

Tabela 10: Máximos sobressinais, tempos de assentamento e erros em regime.

	1º SET POINT (35° C)			2º SET POINT (50° C)		
	$M_p$ (%)	$t_s$ (min)	$e_{ss}$ (%)	$M_p$ (%)	$t_s$ (min)	$e_{ss}$ (%)
<b>PID</b>	0	8,4	0	0	13,4	0
<b>FUZZY</b>	0	6,7	0	0	12,3	0

Fonte: Autoria própria

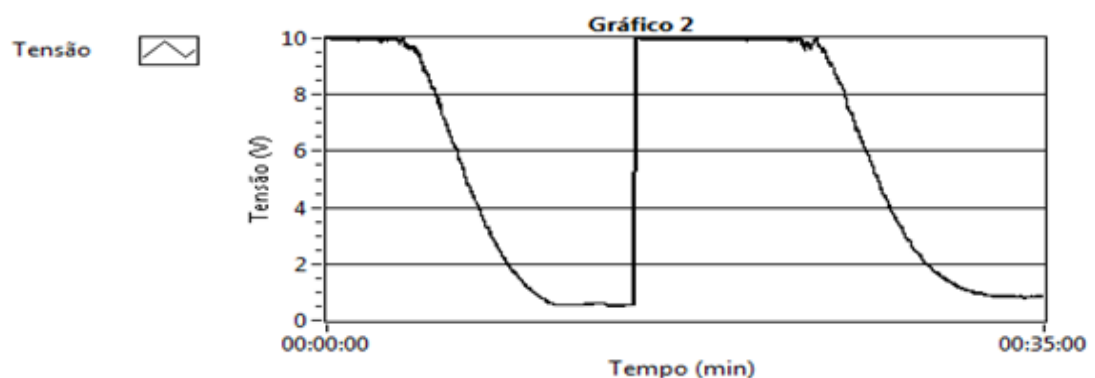
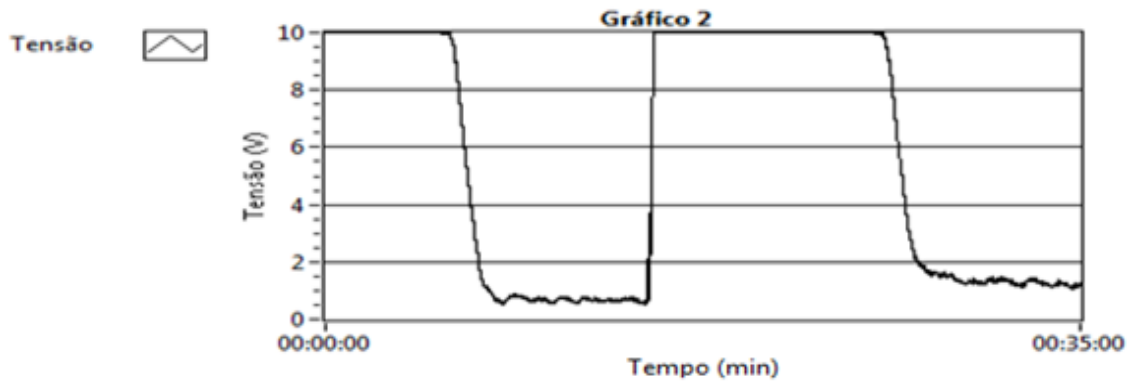


Figura 35: Ação de controle – PID, malha de temperatura  
Fonte: Autoria própria



**Figura 36: Ação de controle – fuzzy, malha de temperatura**  
**Fonte: Autoria própria**

As Figuras 35 e 36 mostram, respectivamente, a ação de controle – PID e a ação de controle – *fuzzy*. E como pode ser observados nas mesmas, ambos sistemas aplicaram uma boa ação de controle, com ausência de ruídos.

Neste caso, é importante ressaltar a facilidade do desenvolvimento do sistema *fuzzy* da malha de temperatura quando comparado com o do sistema PID da mesma malha. Esta malha apresenta uma dificuldade extra em relação às outras malhas, devido à proteção da resistência de aquecimento, que desliga automaticamente a resistência ao alcançar uma determinada temperatura. Com isso, não foi possível chegar a um valor de regime na identificação do sistema, e uma extrapolação na curva de resposta ao degrau foi necessária para obter os parâmetros de sintonia do PID. No entanto, para o controle *fuzzy*, tal aspecto não representou problemas, uma vez que não é necessário identificar o sistema.

### 5.2.2 Malha de pressão

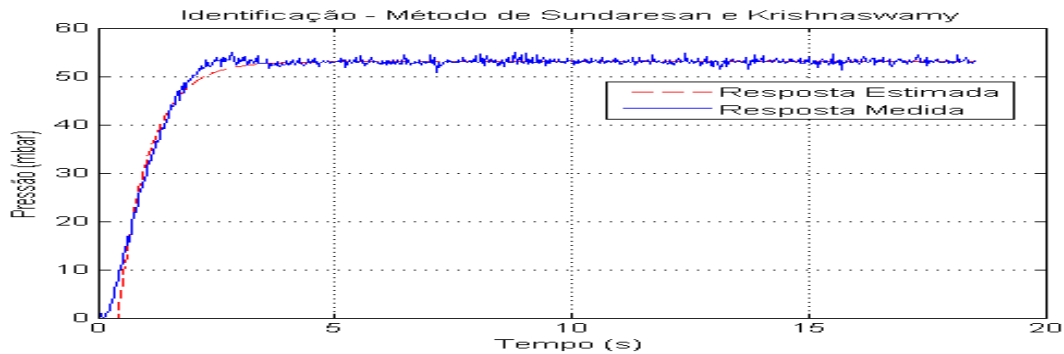
Para a obtenção do modelo matemático da malha de pressão foi utilizado o método de Sundaresan e Krishnaswamy no processo de identificação. A função de transferência obtida é mostrada na Equação (16) e a Figura 37 ilustra as curvas de respostas medidas e estimadas.

$$G(s) = \frac{53,65}{0,6442s + 1} e^{-0,449s} \quad (16)$$



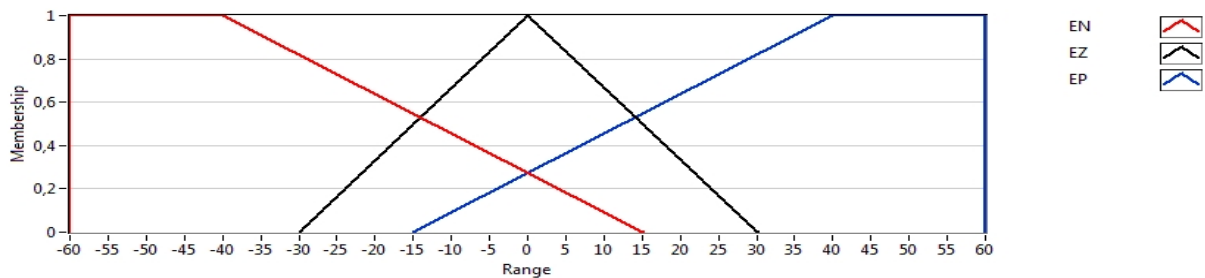
Para a sintonia do controlador PI foi utilizado o método de Chien-Hrones-Reswick (CHR) – 0% (ASTROM; HÄGGLUND, 1995). Onde os parâmetros encontrados foram:

- $K_p = 0,0165$ .
- $T_i = 0,9915$ .

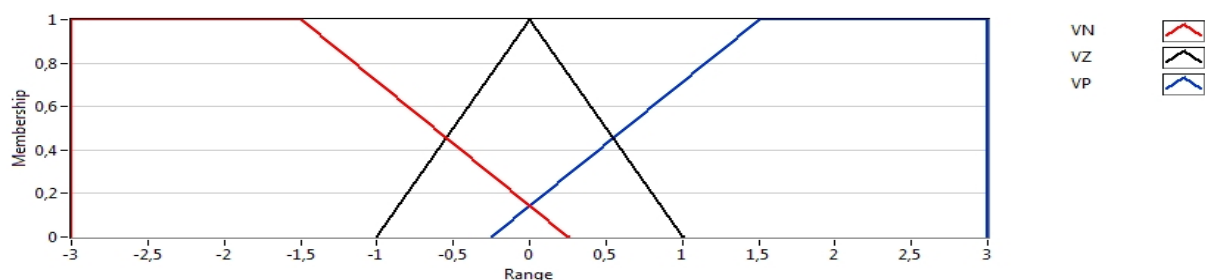


**Figura 37: Identificação da malha de pressão**  
Fonte: Autoria própria

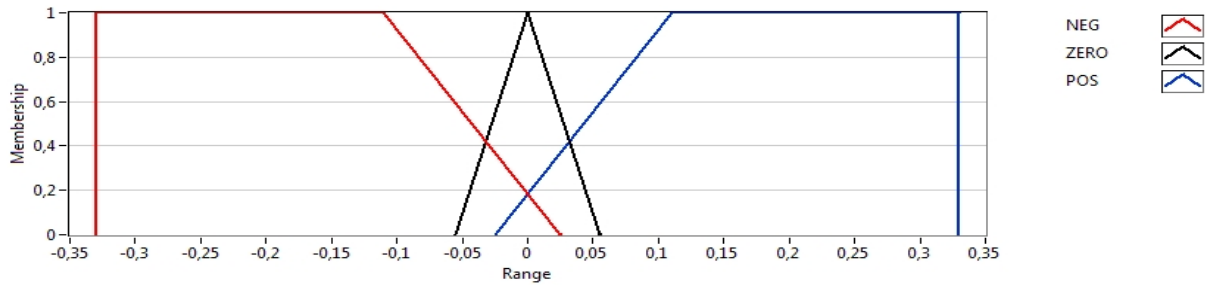
As funções de pertinência definidas para cada uma das variáveis envolvidas no processo de controle *fuzzy* da malha de pressão estão ilustradas nas Figuras 38, 39 e 40. Onde a primeira corresponde ao erro, a segunda à variação do erro e a última à saída do controlador.



**Figura 38: Função de pertinência do erro – malha de pressão**  
Fonte: Autoria própria



**Figura 39: Função de pertinência da variação do erro – malha de pressão**  
Fonte: Autoria própria



**Figura 40: Função de pertinência da saída do controlador – malha de pressão**  
**Fonte: Autoria própria**

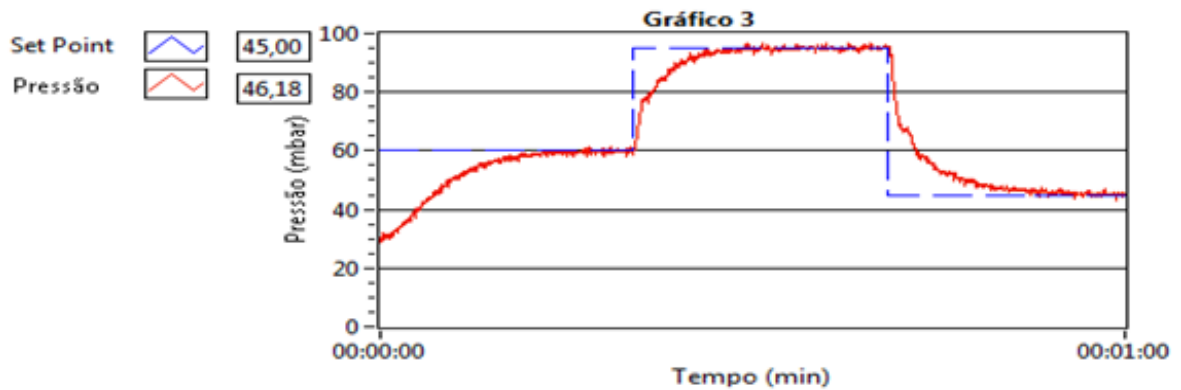
Na Tabela 11 estão apresentadas as regras de inferências do sistema de controle da malha de pressão.

**Tabela 11: Tabela das regras de inferência – malha de pressão.**

Saída		Variação do Erro		
		VN	VZ	VP
Erro	EN	NEG	NEG	NEG
	EZ	POS	ZERO	NEG
	EP	POS	POS	POS

Fonte: Autoria própria

Para a validação dos sistemas de controle foram definidos três *set points*, o primeiro em 60 mbar, o segundo em 95 mbar e o terceiro em 45 mbar. As Figuras 41 e 42 mostram, respectivamente, o sinal de saída do sistema – PID e o sinal de saída do sistema – *fuzzy*.



**Figura 41: Sinal de saída do sistema – PID, malha de pressão**  
**Fonte: Autoria própria**

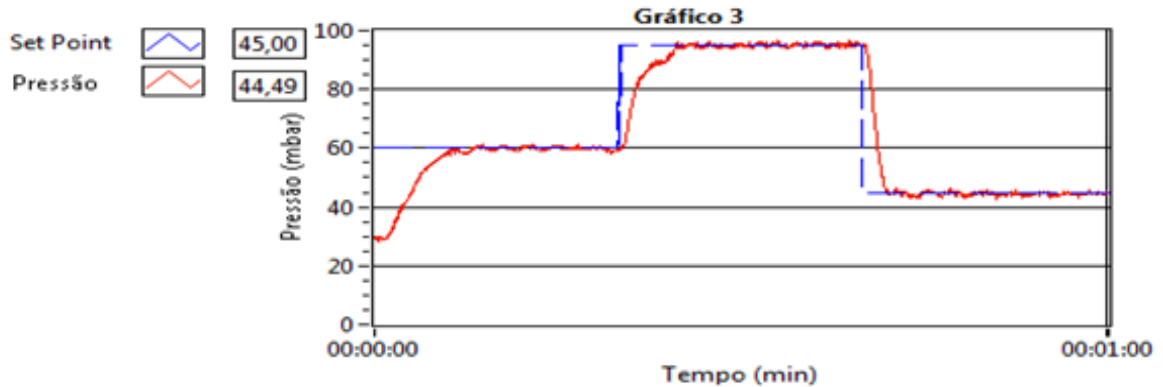


Figura 42: Sinal de saída do sistema – *fuzzy*, malha de pressão  
Fonte: Autoria própria

Como é possível observar nas Figuras 41 e 42, tanto o sistema de controle PID, como o sistema de controle *fuzzy* estabilizaram a malha de pressão nos *set points* definidos, apresentando erro em regime permanente inferior a 2% e ausência de sobressinal. No entanto, o controlador *fuzzy* obteve um desempenho superior que o PID, pois teve tempos de subida e assentamento em média 52,33% mais rápidos, como pode ser observado através dos dados mostrados na Tabela 12, onde  $M_p$  representa o máximo sobressinal,  $t_s$  representa os tempos de subida e assentamento, pois no caso são iguais e  $e_{ss}$  representa o erro em regime.

Tabela 12: Máximos sobressinais, tempos de assentamento e erros em regime.

	1º SET POINT (60 mbar)			2º SET POINT (90 mbar)			3º SET POINT (45 mbar)		
	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)	$e_{ss}$ (%)	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)	$e_{ss}$ (%)	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)	$e_{ss}$ (%)
<b>PID</b>	0	13,1	1,5	0	8,3	1,5	0	14,3	1
<b>FUZZY</b>	0	6,9	1	0	5,0	1	0	12,5	1

Fonte: Autoria própria

As Figuras 43 e 44 mostram, respectivamente, a ação de controle – PID e a ação de controle – *fuzzy*. E como pode ser observados nas mesmas, ambos sistemas aplicaram uma boa ação de controle, com ausência de ruídos.

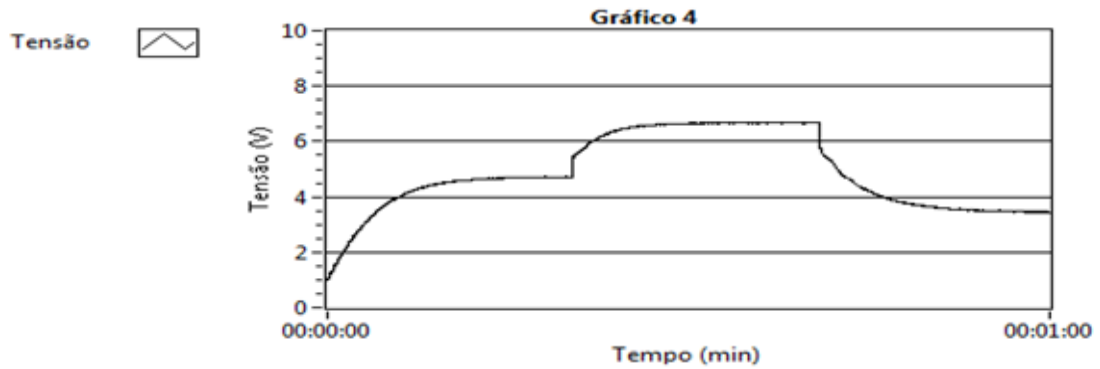


Figura 43: Ação de controle – PID, malha de pressão  
Fonte: Autoria própria

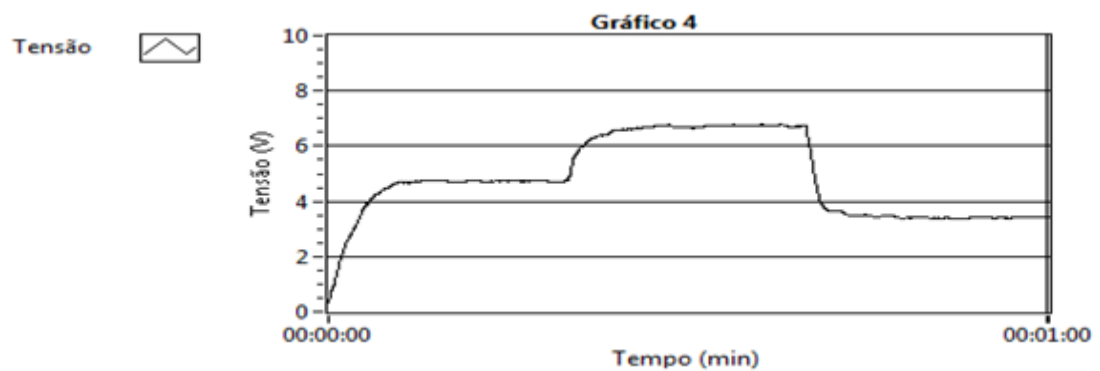


Figura 44: Ação de controle – fuzzy, malha de pressão  
Fonte: Autoria própria

### 5.2.3 Malha de nível

Para a obtenção do modelo matemático da malha de nível foi utilizado o método de Smith para a identificação. A função de transferência obtida é mostrada na Equação (17) e a Figura 45 ilustra as curvas de respostas medidas e estimadas.

$$G(s) = \frac{203}{76,4s + 1} e^{-0,626s} \quad (17)$$

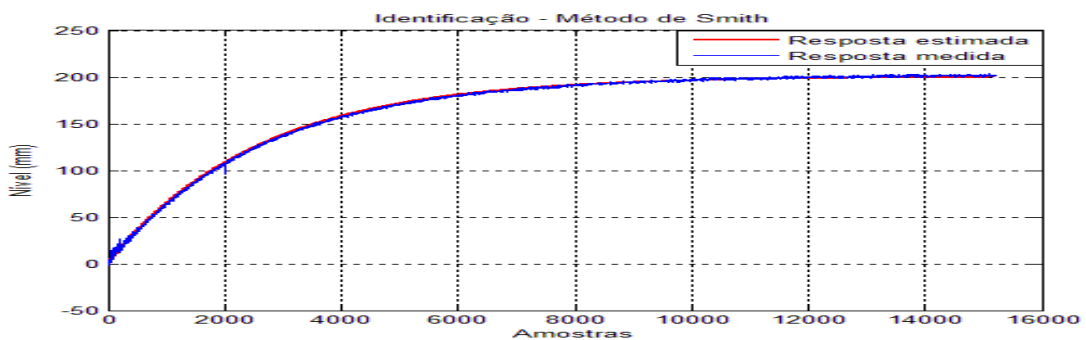
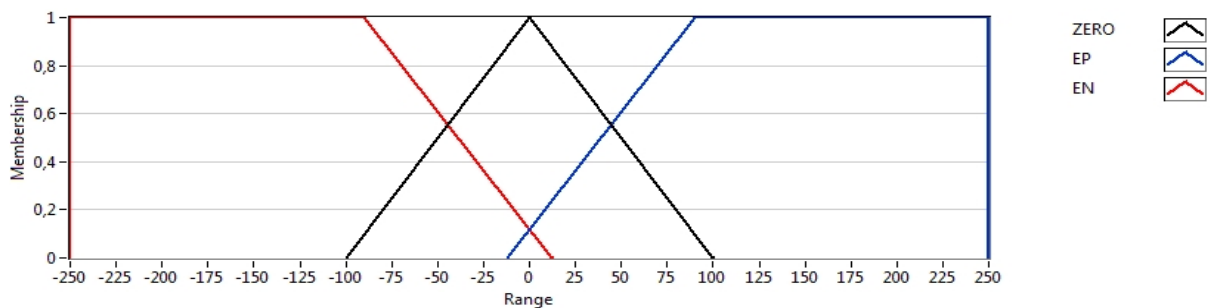


Figura 45: Identificação da malha de nível  
Fonte: Autoria própria

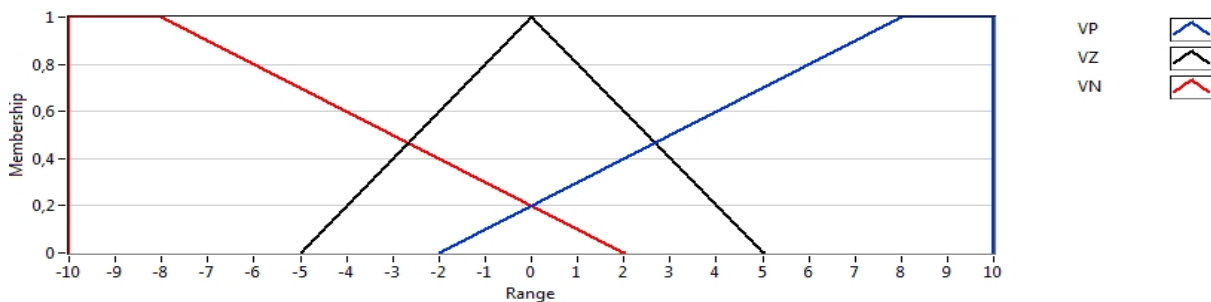
Para a sintonia do controlador PI foi utilizado o método de Chien-Hrones-Reswick (CHR) – 20% (ASTROM; HÄGGLUND, 1995). Onde os parâmetros encontrados foram:

- $K_p = 0,3605$ .
- $T_i = 76,4048$ .

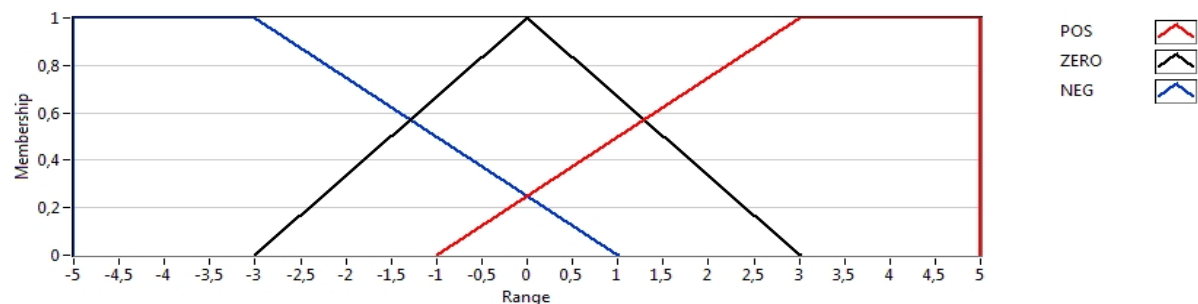
As funções de pertinência definidas para cada uma das variáveis envolvidas no processo de controle *fuzzy* da malha de nível estão ilustradas nas Figuras 46, 47 e 48. Onde a primeira corresponde ao erro, a segunda à variação do erro e a última à saída do controlador.



**Figura 46: Função de pertinência do erro – malha de nível**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 47: Função de pertinência da variação do erro – malha de nível**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 48: Função de pertinência da saída do controlador – malha de nível**  
**Fonte: Autoria própria**

Na Tabela 13 estão apresentadas as regras de inferências do sistema de controle da malha de nível.

**Tabela 13: Tabela das regras de inferência – malha de nível.**

Saída		Variação do Erro		
		VN	VZ	VP
Erro	EN	NEG	NEG	NEG
	EZ	POS	ZERO	NEG
	EP	POS	POS	POS

Fonte: Autoria própria

As Figuras 49 e 50 mostram, respectivamente, o sinal de saída do sistema – PID e o sinal de saída do sistema – *fuzzy*. Para a validação dos sistemas de controle desenvolvidos, foram estipulados três *set points*, o primeiro em 150 mm, o segundo em 260 mm e o terceiro em 70 mm. Vale ressaltar que o valor mínimo que o sensor de nível desta malha consegue capturar é de 50 mm, fato este que pode ser observado no início das curvas das respostas de saída mostradas nas Figuras 49 e 50.

Como é possível observar nas Figuras 49 e 50, tanto o sistema de controle PID, como o sistema de controle *fuzzy* estabilizaram a malha de nível nos *set points* definidos apresentando máximo sobressinal inferior a 3% e ausência erro em regime permanente. O controlador *fuzzy* obteve um desempenho superior que o PID, pois teve tempos de subida e assentamento em média 37,54% mais rápidos, como é mostrado na Tabela 14.

**Tabela 14: Máximos sobressinais, tempos de assentamento e erros em regime.**

	1º SET POINT (150 mm)			2º SET POINT (260 mm)			3º SET POINT (70 mm)		
	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)	$e_{ss}$ (%)	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)	$e_{ss}$ (%)	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)	$e_{ss}$ (%)
<b>PID</b>	1,3	41,5	0	0	56,7	1,5	2,3	51,1	0
<b>FUZZY</b>	1,1	29,8	0	0	33,8	1	1,5	48,4	0

Fonte: Autoria própria

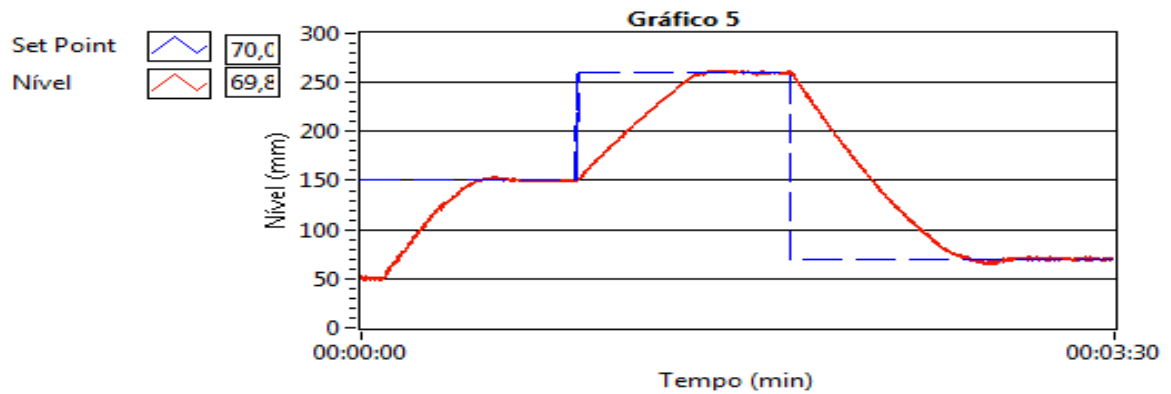


Figura 49: Sinal de saída do sistema – PID, malha de nível  
Fonte: Autoria própria

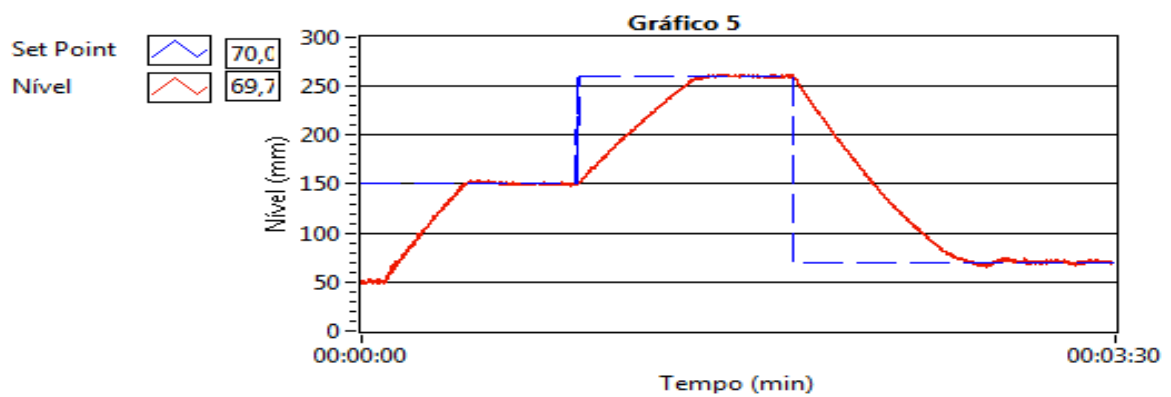


Figura 50: de saída do sistema – PID, malha de nível  
Fonte: Autoria própria

As Figuras 51 e 52 mostram, respectivamente, a ação de controle – PID e a ação de controle – fuzzy.

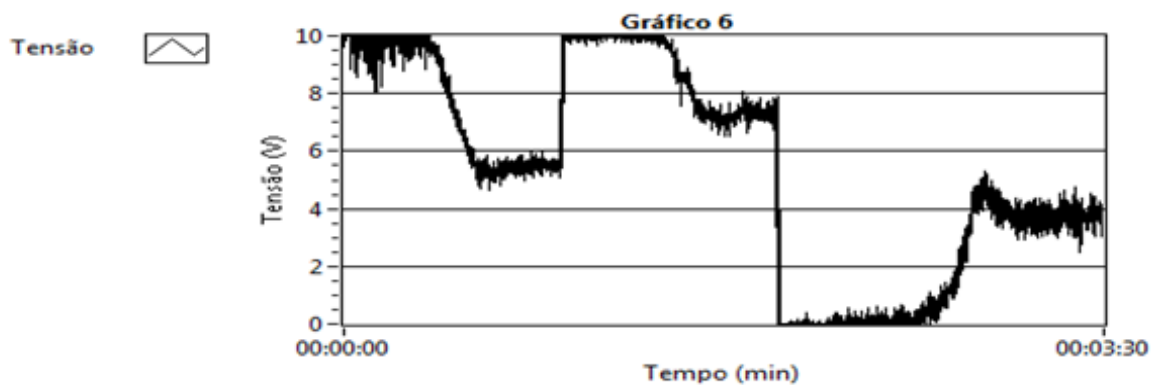


Figura 51: Ação de controle – PID, malha de nível  
Fonte: Autoria própria

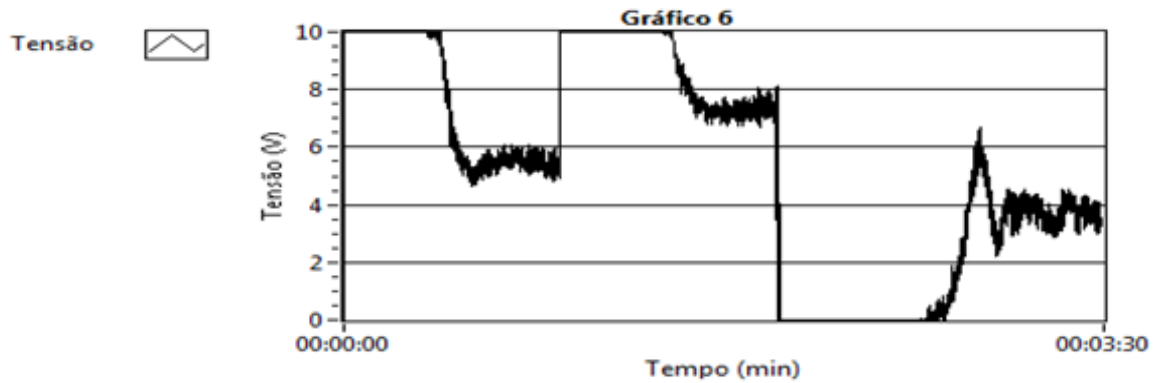


Figura 52: Ação de controle – *fuzzy*, malha de nível

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado nas Figuras 51 e 52, ambos sistemas tiveram uma ação de controle semelhante quando em regime permanente, porém em regime transitório a ação de controle do sistema *fuzzy* foi mais linear do que a do PID, o que resultou em uma resposta mais rápida, como já citado anteriormente.

#### 5.2.4 Malha de vazão

Para a obtenção do modelo matemático da malha de vazão foi realizado um ensaio em malha aberta na mesma e utilizado o método de Sundaresan e Krishnaswamy para a identificação. A função de transferência obtida é mostrada na Equação (18) e a Figura 53 ilustra as curvas de respostas medidas e estimadas.

$$G(s) = \frac{1,039}{0,3842s + 1} e^{-0,00644s} \quad (18)$$

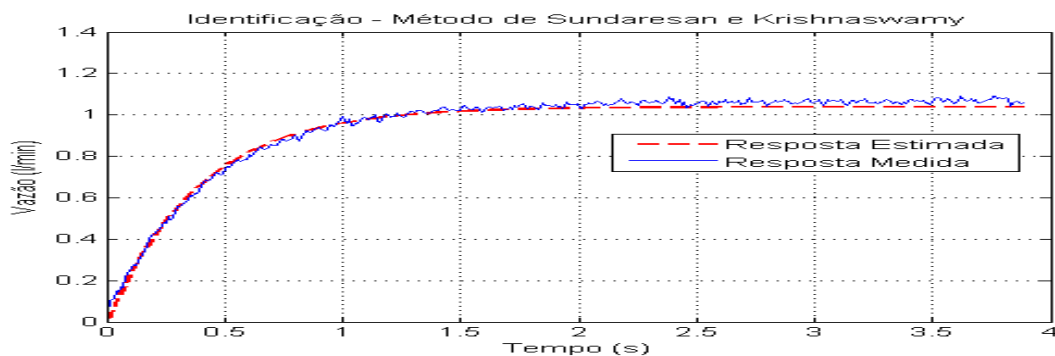


Figura 53: Identificação da malha de vazão

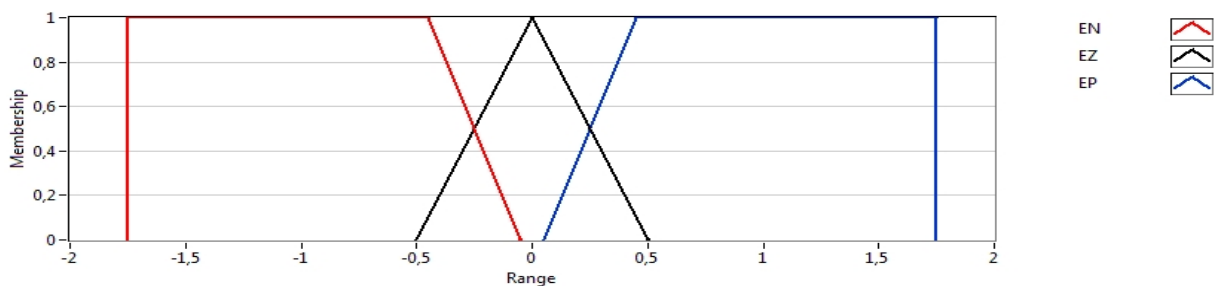
Fonte: Autoria própria



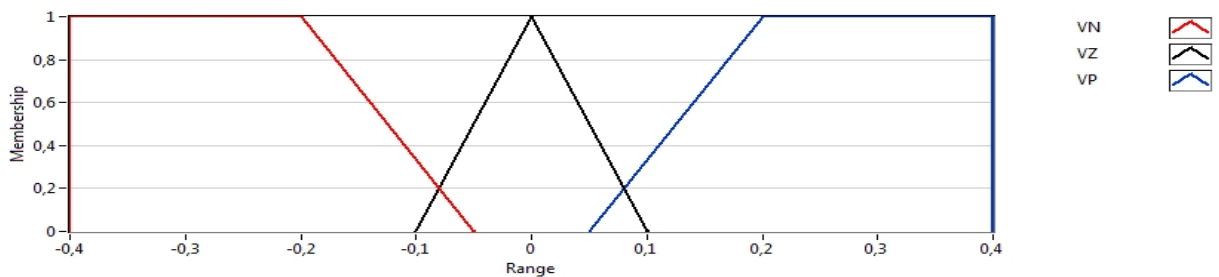
Para a obtenção dos ganhos do controlador PI foi utilizado o método de Chien-Hrones-Reswick (CHR) – 0% (ASTROM; HÄGGLUND, 1995). Onde os parâmetros encontrados foram:

- $K_p = 20,2384$ .
- $T_i = 0,4611$ .

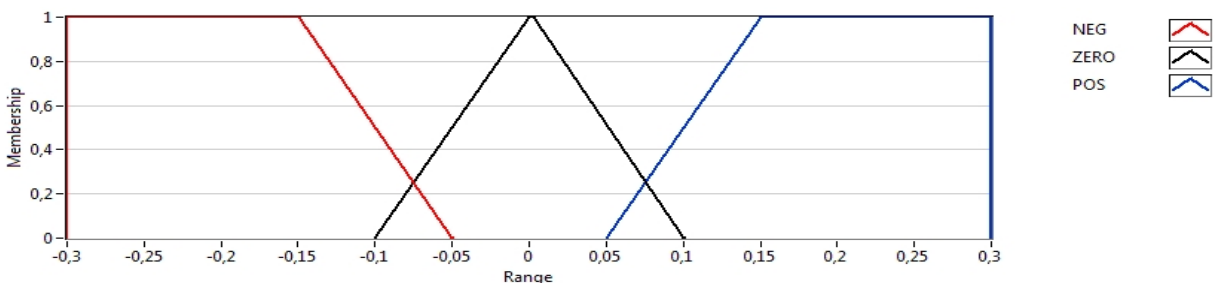
As funções de pertinência definidas para as variáveis envolvidas no controle *fuzzy* da malha de vazão estão ilustradas nas Figuras 54, 55 e 56. Onde a primeira corresponde ao erro, a segunda à variação do erro e a última à saída do controlador.



**Figura 54: Função de pertinência do erro – malha de vazão**  
Fonte: Autoria própria



**Figura 55: Função de pertinência da variação do erro – malha de vazão**  
Fonte: Autoria própria



**Figura 56: Função de pertinência da saída do controlador – malha de vazão**  
Fonte: Autoria própria

Na Tabela 15 estão apresentadas as regras de inferências do sistema de controle da malha de vazão.

Tabela 15: Tabela das regras de inferência – malha de vazão.

Saída		Variação do Erro		
		VN	VZ	VP
Erro	EN	NEG	NEG	NEG
	EZ	POS	ZERO	NEG
	EP	POS	POS	POS

Fonte: Autoria própria

Nas Figuras 57 e 58 são apresentados o sinal de saída do sistema – PID e o sinal de saída do sistema – *fuzzy*, respectivamente, sendo que para a validação dos sistemas de controle foram definidos três *set points*, o primeiro em 1,5 l/min, o segundo em 2,1 l/min e o terceiro em 1,3 l/min.

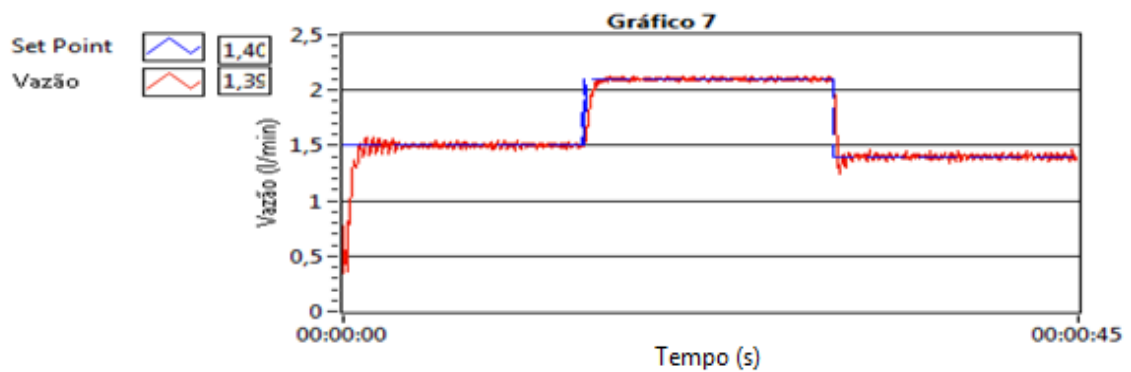


Figura 57: Sinal de saída do sistema – PID, malha de vazão

Fonte: Autoria própria

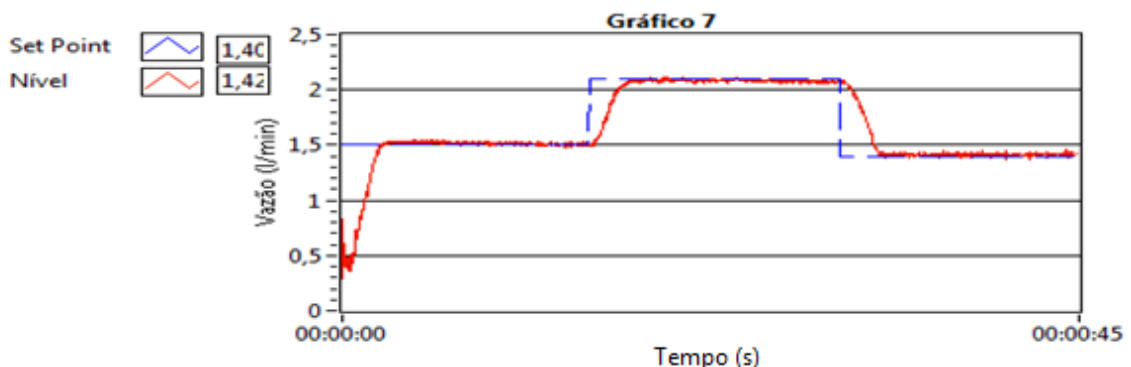


Figura 58: Sinal de saída do sistema – *fuzzy*, malha de vazão

Fonte: Autoria própria

A curva do sinal de saída do sistema – PID da malha de vazão ilustrada na Figura 57 apresentou algumas pequenas oscilações devido à presença de ruídos nos componentes da mesma, fato este que pode ser observado também na resposta

em malha aberta apresentada na Figura 53. Porém, como pode ser observado na Figura 58 o sistema de controle *fuzzy* ficou menos susceptível a esses ruídos, conseguindo assim uma estabilidade maior em regime que o PID.

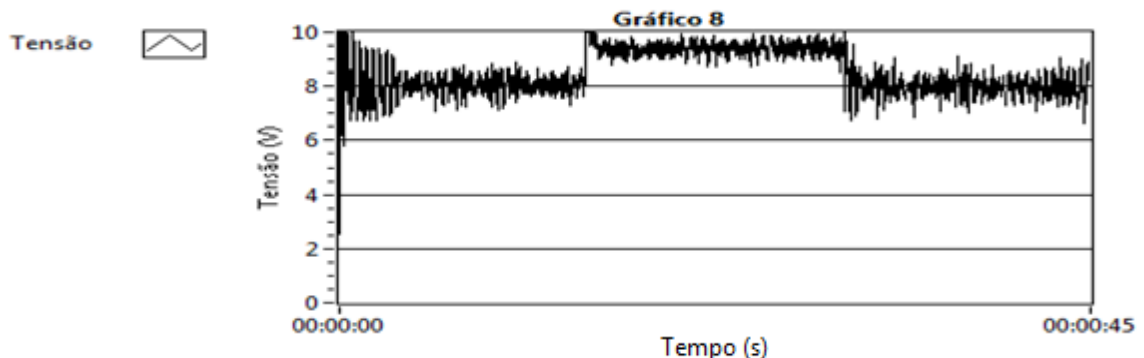
Como é possível observar nas Figuras 57 e 58, tanto o sistema de controle PID, como o sistema de controle *fuzzy* estabilizaram a malha de vazão nos *set points* definidos apresentando máximo sobressinal igual a 3% e erro em regime permanente inferior a 2%. O controlador *fuzzy* obteve um desempenho superior em regime permanente e o controlador PID demonstrou vantagem em regime transitório, pois obteve tempos de subida em média 82,2% mais rápidos, como pode ser observado através dos valores mostrados na Tabela 16, onde  $M_p$  representa o máximo sobressinal,  $t_s$  representa o tempo de assentamento e  $e_{ss}$  representa o erro em regime.

**Tabela 16: Máximos sobressinais, tempos de assentamento e erros em regime.**

	1º SET POINT (1,5 l/min)			2º SET POINT (2,1 l/min)			3º SET POINT (1,3 l/min)		
	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)	$e_{ss}$ (%)	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)	$e_{ss}$ (%)	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)	$e_{ss}$ (%)
<b>PID</b>	2,7	1,9	1	0	1,7	0	3,0	1,3	1,8
<b>FUZZY</b>	0	2,7	0	0	2,3	1	0	2,7	0

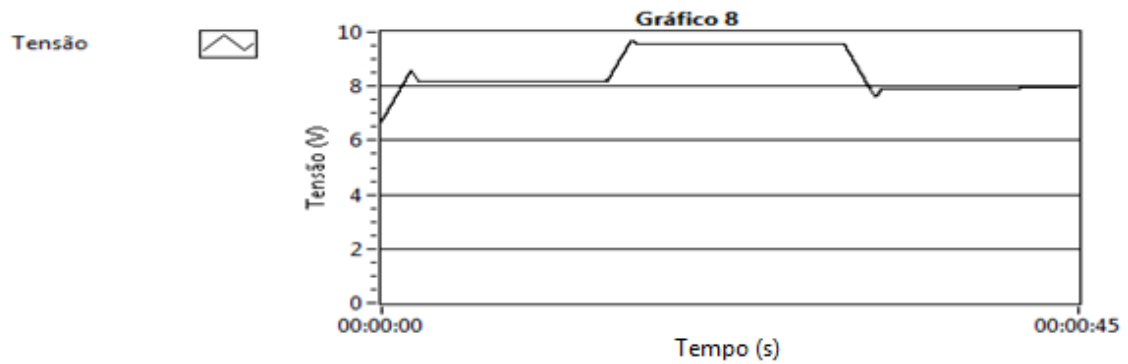
Fonte: Autoria própria

As Figuras 59 e 60 mostram, respectivamente, a ação de controle – PID e a ação de controle – *fuzzy*.



**Figura 59: Ação de controle – PID, malha de vazão**

Fonte: Autoria própria



**Figura 60: Ação de controle – fuzzy, malha de vazão**  
**Fonte: Autoria própria**

Como pode ser observado nas Figuras 59 e 60, ocorreu a diferença mais significativa entre as ações de controle onde a variação da saída do controlador PID chegou a 25%, enquanto a saída do controlador *fuzzy* foi linear.

## 6 CONCLUSÃO

Os objetivos propostos neste trabalho de conclusão de curso foram alcançados.

Os sistemas de controle PID e *fuzzy* foram desenvolvidos e validados pela aplicação dos mesmos para o controle dos processos de temperatura, pressão, nível e vazão pertencentes à planta industrial didática.

Foi realizada também a automação do processo de manobra de fluidos entre os reservatórios da planta, em que tanto os sistemas de controle como o de automação foram implementados por meio do *software* LabVIEW e do PAC CompactRIO.

As interfaces de usuário desenvolvidas possibilitam a utilização dos sistemas de controle PID como ferramenta de ensino na área de controle e automação, uma vez que permitem um acesso direto aos parâmetros dos controladores, e podem apresentar gráficos indicando as saídas dos sistemas e as ações de controle aplicadas. Com isso, possibilitam a visualização de como é a influência que cada parâmetro deste tipo de controlador possui no sistema.

Os resultados dos ensaios realizados foram considerados satisfatórios visto que a aplicação tanto dos sistemas de controle PID, como o dos sistemas *fuzzy*, foram capazes de estabilizar as malhas pertencentes à planta industrial didática dentro dos critérios de máximo sobressinal e erro em regime estabelecidos e apresentaram boas características em regime transitório, como tempo de subida, tempo de atraso e máximo sobressinal. Em geral, os sistemas de controle *fuzzy* apresentaram uma ação de controle melhor, aliados a um desempenho melhor em regime transitório, salvo no caso da malha de vazão, frente aos resultados obtidos pelos sistemas PID.

A atualização tecnológica da planta industrial didática, realizada através da criação do novo sistema de controle e supervisão formado pelo *software* LabVIEW e pelo PAC CompactRIO, já está proporcionando a outros alunos a possibilidade de desenvolvimento de trabalhos mais avançados, uma vez que este sistema está sendo utilizado por um aluno do PPGE na elaboração de uma dissertação de mestrado para realizar um controle multivariável através do emprego de técnicas *fuzzy*, e foi utilizado por outro aluno, também do PPGE, para a elaboração de um

artigo. Demonstra-se, assim, que este trabalho trouxe uma contribuição para alunos pertencentes ao PPGEE e ao CIPECA.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros, a seguir estão listadas algumas possibilidades que podem ser realizadas:

- Aplicação de outras estratégias de controle *fuzzy*;
- Criação e controle de uma malha multivariável;
- Análise de desempenho de outras estratégias de controle na planta.

## 6.2 ARTIGOS PUBLICADOS RELACIONADOS COM O TRABALHO

1. **Estudo de Aplicação de Programação Gráfica e de Hardware Lógico Programável em Automação de Planta Industrial Didática:** Este trabalho apresenta um estudo de aplicação de um ambiente de programação gráfica utilizando o *software LabVIEW* aplicado ao hardware lógico-programável *CompactRIO*, com o objetivo de realizar uma automação no sistema de manobra de fluidos entre dois tanques de uma planta industrial didática. O artigo foi submetido e aceito no XVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR (SICITE) de 2012.
2. **Sistema de Controle para uma Malha de Nível de uma Planta Industrial Didática por Programação Gráfica em Hardware Lógico-Programável:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle supervisionado aplicado a uma malha de nível de uma planta industrial didática da fabricante FESTO. Esta planta didática foi reestruturada para contemplar o estudo de algumas estratégias de controle constantemente empregadas no ensino de engenharia. O hardware lógico-programável *CompactRIO* foi empregado como controlador do sistema, sendo este associado à linguagem gráfica de programação *LabVIEW*. O processo foi devidamente identificado e um controlador PI foi sintonizado por intermédio de um método clássico presente na literatura. Resultados obtidos enfatizam o

potencial didático da aplicação em disciplinas de controle de cursos de engenharia. O artigo foi submetido e aceito no XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE) de 2013.

3. **Análise entre Métodos de Sintonia PID Aplicados no Controle de uma Malha de Nível por Programação Gráfica em Controlador Programável para Automação:** Este trabalho tem como objetivo principal fazer uma análise comparativa entre dois métodos de sintonia para controladores PID: o método clássico de Chien-Hrones-Reswick e a metaheurística Otimização por Enxame de Partículas, aplicados em uma malha de controle de nível de uma planta didática de controle, controlada por um hardware lógico-programável com programação gráfica. Tal malha de controle, empregada para os testes neste trabalho, faz parte de uma planta didática de controle reestruturada da FESTO, que é controlada pelo hardware CompactRIO, associado a linguagem gráfica de programação LabVIEW. Para este sistema, um controlador PID foi projetado com base no método clássico de sintonia comentado, e utilizando uma metaheurística em questão. O artigo foi submetido e aceito no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI) de 2013.
  
4. **Controle *Fuzzy* aplicado à uma Malha de Controle de Nível:** Este trabalho apresenta uma abordagem de controle inteligente aplicado à um sistema de controle de nível. Foi considerada uma planta industrial didática, em conjunto com um *hardware* de aquisição de dados e um *software* de desenvolvimento e controle. O sistema inteligente implementado é baseado em lógica *fuzzy* e apresenta resultados satisfatórios, quando comparados os obtidos por um controlador do tipo Proporcional –Integrativo. O artigo foi submetido e aceito no XVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR (SICITE) de 2013.

## REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de Sistemas**. 3ª. Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- ALMEIDA, J. P. L. S. de. **Automação de uma Planta Didática de Sistemas de Controle**. 122f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Cornélio Procópio, 2012.
- ALTUS S.A. **UCPs Série Ponto**. São Paulo, SP, 2007.
- ASTROM, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**. 2.ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995.
- BILIK, P.; KOVAL, L.; HAJDUK, J. CompactRIO Embedded System in Power Quality Analysis. **International Multiconference on Computer Science and Information Technology (IMCSIT)**. p. 577-580, out. 2008.
- BERK, P., STAJNKO, D., VINDIS, P., MURSEC, B. e LAKOTA, M. **Synthesis Water Level Control by Fuzzy Logic**. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. p. 204-210, 2011.
- BITTER, R.; MOHIUDDIN T.; NAWROCKI M. **LabVIEW Advanced Programming Techniques**.USA: CRC Press, 2001.
- BOLTON, W. **Programmable Logic Controllers**. 4. ed. Burlington, MA: Elsevier Newnes, 2006.
- CAMPOS, Mario Massa de; SAITO, Kaku. **Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2006.
- COELHO, A. A. R.; COELHO, L. d. S. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2004.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2001.
- ELIPSE SCADA - SUPERVISORY CONTROL AND DATA ACQUISITION SYSTEM. **Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados**. 2002.
- FESTO DIDACTIC. **Process Control System - Control of Temperature, Flow, Pressure and Filling Level**. Hauppauge, NY, 2006.
- HAMITI, K. **Position Control of a Pneumatic Actuator under the Influence of Stiction**. Elsevier Science Ltd, p. 1079 – 1088, 1996.
- KNOSPE, C. **PID Control**. **IEEE Control Systems**, v.26, n.1, p. 30-31, fev. 2006.



LARSEN, R. W. **LabVIEW for Engineers**. USA: Prentice Hall, 2011.

LI, Y; ANG, K. H.; CHONG, G. C. Y. **PID Control System Analysis and Design**. IEEE Control Systems, v.26, n.1, p. 32-41, fev. 2006.

MANDANI, E. H.; ASSILIAN, S. Na Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, p. 1-13, 1975.

NATIONAL INSTRUMENTS. **PAC – Plataformas Industriais para Controle e Medições Avançadas**. Disponível em: <<http://brasil.ni.com/produtos/pac>>. Acesso em: 25 junho 2013.

NISE, Norman S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. LTC Editora, 3. ed, 2002.

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

PASSINO, K. M.; YURKOVICH, S. **Fuzzy Control**. California, USA: Addison – Wesley, 1998.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **An Introduction to Fuzzy Sets – Analysis and Design**. MIT Press, 1998.

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. 2. ed. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2004.

VISIOLI, A. **Practical PID Control**. Brescia, Italy: Springer-Verlag, 2006.

ZADEH, L. A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process. **IEEE Transactions on Systems Vol. SMC-3**, p. 28-44,1973.