

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HELDER VINICIUS SCHERER

**RECONDICIONAMENTO E CRIAÇÃO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO
DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE CONTROLE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2014

HELDER VINICIUS SCHERER

**RECONDICIONAMENTO E CRIAÇÃO DE UM SISTEMA
SUPERVISÓRIO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE CONTROLE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. César Rafael Claire Torrico

PATO BRANCO

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **RECONDICIONAMENTO E CRIAÇÃO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE CONTROLE**, do aluno **Helder Vinicius Scherer** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **64** de 2014.

Fizeram parte da banca os professores:

Prof. Dr. César Rafael Claire Torrico

Prof. Me. Johnny Werner

Prof. Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Irineu Scherer e Rosângela das Chagas Scherer, que deram todo o suporte e incentivo para que eu pudesse ter uma educação formal. Eles que sempre apoiaram minhas ambições e tornaram os meus sonhos os deles. Obrigado por serem meus pilares e exemplos de vida.

AGRADECIMENTOS

Especiais agradecimentos ao Professor Dr. César Rafael Claire Torrico, pela sugestão do tema, profissionalismo e seriedade com que orientou este trabalho. Agradeço pela confiança em mim depositada para realização da monografia, pela sabedoria, experiência e também pela exigência, o que levou o trabalho à ser concluído dentro do cronograma com sucesso.

À minha família, em especial aos meus irmãos Ediane e Helton, de quem sempre recebi apoio, confiança e carinho. Pessoas que nunca duvidaram do meu potencial.

À minha namorada Cathy, de quem recebi todos os dias carinho, apoio e incentivo para sempre levantar a cabeça em momentos difíceis.

À todas as amizades criadas ao longo da graduação, em especial à, Diego Dias, Felipe Crestani, João Francisco Perdoncini, Marcos Pistori Filho e Rafael Bolzan.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela disponibilização de materiais e infraestrutura.

EPÍGRAFE

"The cave you fear to enter holds the treasure you seek."
(Campbell, Joseph).

"A caverna que você teme entrar guarda o tesouro que você busca." (Campbell, Joseph).

RESUMO

SCHERER, Helder V. Recondicionamento e Criação de um Sistema Supervisório de uma Bancada Didática de Controle. 2014. 66 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação) - Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2014.

Este trabalho tem por finalidade o recondicionamento e criação de um sistema supervisório de uma bancada didática de controle para os processos de nível, vazão e pressão para que possa ser utilizada por estudantes para fins educativos. Estuda-se também a definição de sistemas lineares e não lineares, sendo que para realizar a modelagem de um sistema, depende-se diretamente da característica deste sistema, ou seja, se este é linear ou não linear. Além do recondicionamento do processo de pressão, foram projetados controladores e sistemas supervisórios em linguagem LabVIEW para cada sistema, podendo assim serem trabalhados e estudados individualmente.

Palavras-chave: Bancada de controle, processos industriais, controladores, sistema supervisório.

ABSTRACT

SCHERER, Helder V. Reconditioning and Creation of a Supervisory System of a Control Didactic Bench. 2014. 66 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação) - Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2014.

This paper aims at the reconditioning and creation of a supervisory system of a control didactic bench for level, flow and pressure processes for the use of students for educative ends. It also studies the definition of linear and nonlinear systems since in base to perform system modeling, the system characteristics are needed, in other words, if this system is linear or nonlinear. Besides the reconditioning of the pressure process, controllers and supervisory systems in LabVIEW language were projected for each system, and thus can be worked and studied individually.

Keywords: Control bench, industrial processes, controllers, supervisory system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Nível de líquido.....	14
Figura 2 - Exemplos de não linearidades.	18
Figura 3 - Linearização em torno do ponto A.	19
Figura 4 - Comportamento de uma variável controlada por um controlador proporcional.....	21
Figura 5 - Diagrama de blocos ilustrando a ação de controle proporcional.....	21
Figura 6 - a) Variável controlada pela ação proporcional. b) Variável manipulada pela ação proporcional. c) Variável controlada pela ação integral. d) Variável manipulada pela ação integral.....	22
Figura 7 - Diagrama de blocos que ilustra a ação de controle integral.....	23
Figura 8 - Diagrama de blocos que ilustra a ação de controle proporcional e integral.....	23
Figura 9 - Ação derivativa a uma variação do tipo degrau.	24
Figura 10 - Diagrama de blocos que ilustra a ação de controle derivativa.	25
Figura 11 - Comparação das ações P, PI e PID.....	26
Figura 12 - Sistema em malha fechada.....	27
Figura 13 - Diagrama de blocos de um sistema de automação.	29
Figura 14- Placa de aquisição de dados NI USB - 6009.	32
Figura 15 - Bancada de Nível e Vazão.....	33
Figura 16 - Situação da bancada de Pressão antes do trabalho.....	34
Figura 17- Esquema utilizado para obtenção de dados a malha aberta.	35
Figura 18 - Resposta ao degrau para o processo de Nível.	36
Figura 19 - Resposta deslocada do processo de Nível.	37
Figura 20 - Comparação da Resposta Real e Teórica para uma mesma entrada. ...	37
Figura 21 - Diagrama utilizado para obtenção dos dados à malha fechada.....	39

Figura 22 - Comparação da Resposta Real e Teórica compensadas com o controlador PI.....	40
Figura 23 - Resposta ao degrau para o processo de Vazão.....	41
Figura 24 - Resposta ao degrau para o processo de Vazão com um pequeno ganho.....	41
Figura 25 - Resposta deslocada do processo de Vazão.....	42
Figura 26 - Comparação da Resposta Real e Teórica para uma mesma entrada. ...	43
Figura 27 - Comparação da Resposta Real e Teórica compensadas com o controlador PI.....	44
Figura 28- Diagrama de funcionamento do processo de Pressão.....	45
Figura 29 - Sensor de Pressão localizado na bancada.....	46
Figura 30 - Etapas para o acionamento do processo de Pressão.....	46
Figura 31 - a) Esquemático do Circuito de Acionamento da Bomba. b) Esquemático do Circuito de Aquisição do Processo de Pressão.....	47
Figura 32 - Circuito de acionamento da bomba e aquisição do sensor de Pressão..	48
Figura 33 - Esquemático da ligação da chave Extern Function no processo.....	49
Figura 34 - Chaves e bornes para ligação com a placa de aquisição de dados.....	49
Figura 35 - Resposta ao degrau para o processo de Pressão.....	50
Figura 36 - Resposta ao degrau com um pequeno ganho na resposta real.....	51
Figura 37 - Resposta deslocada do processo de Pressão.....	52
Figura 38 - Comparação da Resposta Real e Teórica para uma mesma entrada. ...	52
Figura 39 - Comparação da Resposta Real e Teórica compensadas com o controlador PI.....	53
Figura 40 - Controlador PID desenvolvido em linguagem LabVIEW.....	55
Figura 41 - Aba introdutória do software supervisorio (Processo de Nível).....	56
Figura 42 - Aba de manipulação supervisorio do processo de Nível.....	57
Figura 43 - Aba de manipulação supervisorio do processo de Vazão.....	58
Figura 44 - Aba de manipulação supervisorio do processo de Pressão.....	58

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PI	Controlador do tipo Proporcional Integral
PID	Controlador do tipo Proporcional Integral Derivativo
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
DAQ	<i>Data Acquisition</i> (Aquisição de Dados)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 JUSTIFICATIVA	11
1.2 OBJETIVO GERAL	11
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 MODELOS MATEMÁTICOS DE SISTEMAS	13
2.1.1 Modelagem Fenomenológica	13
2.1.2 Modelagem Experimental.....	16
2.1.3 Não Linearidades	17
2.2 CONTROLE	20
2.2.1 Ações Básicas de Controle	20
2.2.2 Métodos de Projeto de Controladores.....	27
2.3 AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	28
2.3.1 Sistema Supervisório.....	29
2.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	31
3. PROJETO DE RECONDICIONAMENTO E CRIAÇÃO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE NÍVEL, VAZÃO E PRESSÃO	33
3.1 SITUAÇÃO PRÉ-PROJETO DA BANCADA DIDÁTICA.....	33
3.2 LEVANTAMENTO DOS MODELOS MATEMÁTICOS E PROJETO DE CONTROLADORES PARA OS PROCESSOS DE NÍVEL E VAZÃO	34
3.2.1 Processo de Nível	35
3.2.2 Processo de Vazão	40
3.3 PROCESSO DE PRESSÃO.....	44
3.3.1 Recondicionamento do Processo de Pressão.....	44
3.3.2 Levantamento de Modelos Matemáticos e Projeto de Controladores para o Processo de Pressão	50

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR PID	54
3.5 RESULTADOS OBTIDOS	55
4. CONCLUSÕES.....	59
5. REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de se controlar o nível de um reservatório, vazão de uma tubulação e até mesmo a pressão em um cilindro, se mostra muito comum nos processos industriais hoje em dia. Esses sistemas de controle formam juntas complexas plantas de controle por estarem interligados, porém, podem ser melhor compreendidos e analisados quando estudados separadamente em uma bancada didática de processos por exemplo.

Uma bancada didática de processos pode ser definida como sendo uma ferramenta utilizada com o intuito de auxiliar na consolidação da aprendizagem, simulando alguns dos inúmeros processos industriais existentes. Assim, as bancadas didáticas de controle produzidas atualmente já são direcionadas para o estudo destes processos, como por exemplo, nível, vazão, temperatura, pressão, entre outros, simulando situações em menor escala para dar maior praticidade aos resultados obtidos (LLK ENGENHARIA E COMÉRCIO LTDA, 2010).

Tal equipamento pode ter o seu desempenho melhorado com a implantação de um software supervisor, trabalhando simultaneamente a uma realimentação. Esta modificação resultaria em uma melhoria na obtenção dos valores desejados pelo operador da planta e em um tempo menor para a configuração de cada experimento, tendo em vista que um sistema controlado com instrumentação mantém as variáveis do processo em condições mais adequadas aos equipamentos e às estruturas do que quando manualmente controlada por um operador (SOUZA; BATISTA; LIMA, 2013).

A principal vantagem dos sistemas de controle está relacionada à redução do esforço físico do homem (diminuição do tempo de configuração), ao aumento da precisão de análise das características das variáveis analisadas, melhoria na qualidade de um produto, segurança do processo e melhoria da didática baseada na análise dos processos.

1.1 JUSTIFICATIVA

No laboratório de Controle de Sistemas Dinâmicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Câmpus Pato Branco encontra-se uma bancada didática de controle da marca Festo (para estudo dos processos de nível, vazão, pressão e temperatura de um líquido), que pode ser usada para ajudar os alunos a entender de forma mais clara os conceitos relativos a controle de processos. Até o ano de 2013, essa bancada se encontrava com controladores defeituosos e ultrapassados, representando um desperdício muito grande de metodologia prática e espaço. Esse recondicionamento da bancada foi iniciado por um aluno da própria instituição, devido ao elevado custo orçado para a manutenção proposto pela empresa Festo, deixando-a com os processos de nível e vazão em funcionamento. No presente trabalho, foi realizado o recondicionamento do processo de pressão e a implementação de um software supervisor de modo a facilitar a percepção e a atuação do operador sobre os processos de nível, vazão e pressão.

1.2 OBJETIVO GERAL

Recondicionamento do processo de pressão e implementação de um software supervisor para os processos de nível, vazão e pressão de uma bancada didática de controle disponível no laboratório de Controle de Sistemas Dinâmicos na UTFPR – Câmpus Pato Branco.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o condicionamento do sinal de sensores e projetar o sistema de acionamento dos atuadores do processo de pressão;
- Utilizando a placa de aquisição de dados, NI USB-6009 – *National Instruments*, realizar ensaios com os processos, apresentando a relação do comportamento de entrada e saída;

- Analisar as não linearidades dos processos;
- Obter modelos matemáticos dos processos considerando as possíveis não linearidades;
- Para validar os modelos matemáticos, projetar um controlador para aplicação das ações de controle em malha fechada;
- Desenvolver um software supervisor para a bancada em linguagem LabVIEW®.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MODELOS MATEMÁTICOS DE SISTEMAS

Segundo Ogata (2010, p. 11), “o modelo matemático de um sistema dinâmico é definido como um conjunto de equações que representa a dinâmica do sistema com precisão ou, pelo menos, razoavelmente bem.” Assim, é correto afirmar que um sistema pode ser representado de muitas maneiras diferentes e ter assim vários modelos matemáticos, dependendo do ponto de vista a ser analisado. A dinâmica de muitos sistemas mecânicos, elétricos, térmicos, econômicos, biológicos ou outros pode ser descrita em termos de equações diferenciais. Cada equação diferencial é obtida a partir de alguma lei física que rege o respectivo sistema (OGATA, 2010). Além disso, se estas equações puderem ser linearizadas, então a transformada de Laplace pode ser usada para simplificar o método de solução, obtendo assim equações diferenciais lineares (DORF; BISHOP, 2009).

Como já citado anteriormente, os modelos matemáticos podem assumir diferentes formas e por isso, dependendo do sistema estudado e das condições particulares do mesmo, um modelo matemático pode ser mais adequado que outro. Por exemplo, nos problemas onde a planta deverá ser analisada no domínio do tempo, é vantajoso utilizar representações de espaço de estados. Por outro lado, para a análise da resposta transitória ou da resposta em frequência de um sistema linear, invariante no tempo, de entrada e de saída únicas, a representação pela função de transferência pode ser mais conveniente. Uma vez obtido o modelo matemático de um sistema, existem várias ferramentas para realizar análise e síntese da planta, podendo ser analíticas e de computação (OGATA, 2010).

2.1.1 Modelagem Fenomenológica

As leis fundamentais da física e da química, como conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento, são as bases para a construção de modelos fenomenológicos. Algo que deve ser ressaltado nesse tipo de

modelagem é a consistência matemática do modelo que, por exemplo, garante que o número de equações se iguale ao número de variáveis e verifica se as unidades usadas em todos os termos das equações foram consistentes (GARCIA, 2005). Como exemplos para a modelagem de sistemas físicos podem ser citados: circuitos elétricos (Leis de Kirchhoff), sistemas mecânicos (Leis de Newton), sistemas fluídicos, entre outros. Garcia cita basicamente três estágios para a construção de modelos fenomenológicos até a simulação, sendo eles:

- i. Especificar o sistema, ou seja, estruturar o problema;
- ii. Formular as equações básicas de forma a representar o sistema estático e/ou dinâmico;
- iii. Simular o modelo fazendo os estudos de seu comportamento dinâmico.

Os fluidos (líquidos e gases) são o meio mais versátil para a transmissão de sinais e força, e por isso, tem grande aplicação em processos industriais. Para a análise de sistemas que envolvem o fluxo de fluidos, duas situações são possíveis quanto ao número de Reynolds, sendo eles: o fluxo laminar (Número de Reynolds < 2000) e o fluxo turbulento (Número de Reynolds entre 3000 e 4000). Em geral, o fluxo laminar pode ser descrito por equações diferenciais lineares, diferente do fluxo turbulento, que são frequentemente representados por equações diferenciais não lineares. Porém, para os dois tipos de fluxo, as características dinâmicas podem ser descritas fazendo-se um paralelo com os sistemas elétricos, utilizando-se os conceitos de resistência e capacitância (OGATA, 2010).

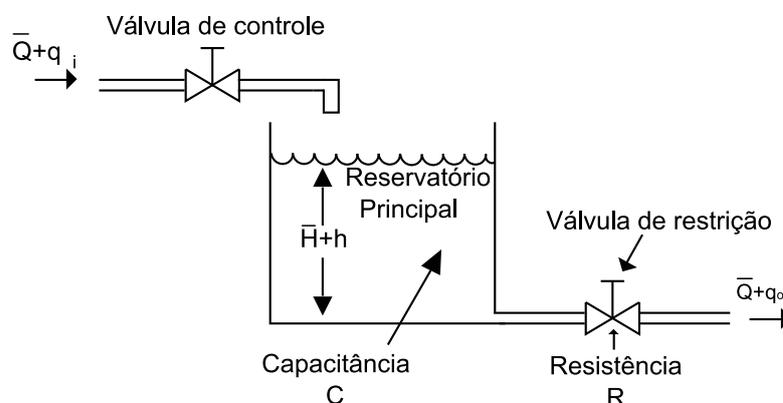


Figura 1 – Sistema de Nível de líquido.
 Fonte: Adaptado de (OGATA, 2010, p. 92)

Considerando o sistema da Figura 1, existe uma válvula de restrição que trabalha como um componente intermediário entre dois reservatórios, a qual funciona como uma resistência controlando o fluxo de saída do reservatório principal. Segundo Ogata (OGATA, p. 92), “essa resistência R ao fluxo do líquido na tubulação de saída do reservatório principal é definida como uma variação na diferença de nível necessária para causar uma variação unitária na vazão.” Essa definição é descrita pela equação (1).

$$R = \frac{\text{variação na diferença de nível, m}}{\text{variação na vazão em volume, m}^3/\text{s}} \quad (1)$$

Analisando o fluxo de líquido que flui através da válvula de restrição R e considerando-o laminar, a relação entre a vazão que flui através da válvula de controle e a altura do nível, ambos em regime permanente, é constante e será dada conforme a equação (2).

$$Q = KH \quad (2)$$

Onde Q é a vazão de volume em regime permanente, em m^3/s , K um coeficiente dado em m^2/s e H a altura do nível em regime permanente dado em metros. A resistência no escoamento laminar (R_l) é constante e análoga à resistência elétrica e é obtida como:

$$R_l = \frac{dH}{dQ} = \frac{1}{K} = \frac{H}{Q} \quad (3)$$

Agora, considerando que o fluxo através da válvula de restrição R seja turbulento, a taxa de fluxo em estado permanente será dada por:

$$Q = K\sqrt{H} \quad (4)$$

Onde K é o coeficiente dado em $\text{m}^{2.5}/\text{s}$. A resistência para um escoamento turbulento será obtida a partir de:

$$R_t = \frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K} \quad (5)$$

Juntando as equações (4) e (5) chegaremos a equação (6), que determina o valor da resistência para um fluxo turbulento. Porém, para pequenas variações da altura e da vazão, a resistência poderá ser considerada constante.

$$R_t = \frac{2H}{Q} \quad (6)$$

A variação na quantidade de líquido acumulado, necessária para causar uma mudança unitária na altura, define a Capacitância C de um reservatório (OGATA, 2010), conforme descrito na equação (7).

$$C = \frac{\text{variação na quantidade de líquido armazenado, m}^3}{\text{variação na altura, m}} \quad (7)$$

Perceba que a capacitância de um tanque é igual à área de sua seção transversal e, caso esta área seja constante, a capacitância também será constante para qualquer altura de nível (OGATA, 2010).

Analisando o sistema no domínio da frequência para pequenas variações em torno de suas variáveis (q_i, q_o, h) é possível obter dois modelos linearizados, dependendo de qual variável será considerada como saída, q_o ou h . Assim, as funções de transferência considerando h e q_o como saídas, estão contidas nas equações (8) e (9) respectivamente (OGATA, 2010).

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (8)$$

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (9)$$

Existe a consciência de que o mundo físico consiste em mais sistemas do que os que foram ilustrados até então. Por exemplo, poderíamos ter aplicado a função de transferência na modelagem de sistemas elétricos, mecânicos, térmicos e até mesmo econômicos. Para Nise (2009, p. 81), “devemos admitir que estes sistemas sejam lineares, ou possamos elaborar aproximações lineares, para usar essa técnica de modelagem.”

2.1.2 Modelagem Experimental

Há situações onde a utilização de dados experimentais, para obter um modelo do sistema dinâmico a ser controlado, é imprescindível. Como:

- Quando a construção teórica do modelo através de equações é somente uma aproximação da realidade;
- Quando o modelo teórico é muito complicado ou o comportamento do processo não é muito claro;

- Quando os sistemas são submetidos a mudanças;
- Quando não se dispõe de sensores adequados para medir todos os parâmetros do sistema.

Por exemplo, um sistema não linear que se desloca para um novo ponto de operação. Neste caso, se faz necessário reajustar o controlador, o que requer remodelá-lo para acrescentar as mudanças inseridas no processo, onde dados experimentais são frequentemente mais efetivos para acrescentar as informações necessárias no novo modelo (PEREIRA; HAFFNER; CHAVES).

Segundo Nise (2009, p. 132), “em geral não é possível ou prático, obter analiticamente a função de transferência de um sistema. Talvez o sistema seja fechado e suas partes constituintes não sejam facilmente identificáveis.” Sabendo disso, entradas de testes como degrau, rampa ou senoidal são inseridas em um sistema e a análise da resposta real do mesmo para esta entrada poderá ser suficiente para conduzir a uma representação, mesmo que seus constituintes internos não sejam conhecidos (NISE, 2009).

Para um sistema de primeira ordem, analisando, por exemplo, a resposta para uma entrada do tipo degrau, o modelo no domínio da frequência pode ser construído a partir de duas especificações: o ganho e a constante de tempo. A constante de tempo informa o tempo necessário para que o sistema atinja 63,21% de seu valor final, já o ganho, é obtido a partir da resposta do sistema em regime permanente e da entrada. Essa análise é válida também para sistemas de segunda ordem com respostas subamortecidas, com a diferença de que para a determinação do modelo no domínio da frequência é necessário o máximo valor de ultrapassagem, o tempo de assentamento e o ganho (NISE, 2009).

2.1.3 Não Linearidades

Embora muitas relações de grandezas físicas sejam representadas por equações lineares, na maioria dos casos a relação entre elas não é efetivamente linear. De fato, um estudo cuidadoso dos sistemas físicos revela que mesmo os chamados ‘sistemas lineares’ são realmente lineares somente para intervalos limitados de operação. Na prática, muitos sistemas eletromecânicos, hidráulicos,

pneumáticos e outros envolvem relações não lineares entre as variáveis (OGATA, 2010).

Segundo Nise (2009, p. 71), “um sistema linear possui duas propriedades: superposição e homogeneidade.” A propriedade da superposição significa que a resposta na saída de um sistema à soma de entradas é igual à soma das respostas às entradas individuais. Assim, se uma entrada $e_1(t)$ fornece uma saída $s_1(t)$ e uma entrada $e_2(t)$ fornece uma saída $s_2(t)$, logo, uma entrada $e_1(t) + e_2(t)$ fornecerá uma saída $s_1(t) + s_2(t)$. Já a propriedade da homogeneidade relaciona a saída de um sistema com a entrada multiplicada por um escalar, ou seja, em um sistema linear, a homogeneidade é demonstrada se, para uma entrada $e_1(t)$ que fornece uma saída $s_1(t)$, uma entrada $\beta e_1(t)$ fornecerá uma saída $\beta s_1(t)$. Sendo assim, um sistema é dito não linear quando não satisfizer uma das duas propriedades (NISE, 2009).

Na Figura 2, são encontrados alguns exemplos de não linearidades físicas.

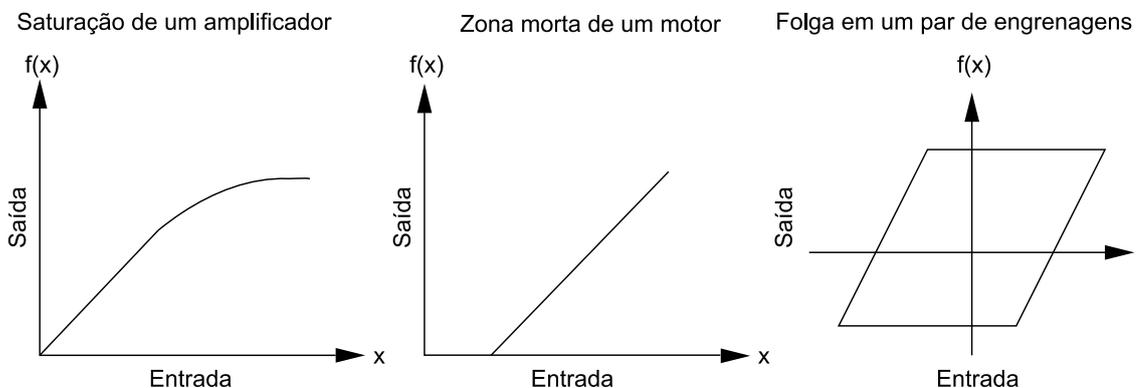


Figura 2 - Exemplos de não linearidades.
Fonte: Adaptado de (NISE, 2009, p. 72)

De acordo com Ogata (2010, p. 36), “se um sistema operar em torno de um ponto de equilíbrio e os sinais envolvidos forem pequenos, então é possível aproximar o sistema não linear por um sistema linear.” Dentro de um conjunto limitado de operações, esse sistema linear é equivalente ao sistema não linear considerado (OGATA, 2010).

Admitindo-se que um sistema não linear opere em um ponto A, ponto de coordenadas $[x_0, f(x_0)]$ na Figura 3, pequenas variações na entrada podem ser relacionadas às variações na saída no entorno do ponto por meio da inclinação da curva naquele ponto A. Assim, se a inclinação da curva no ponto A é m_a , então, pequenos desvios da entrada no entorno do ponto A, δx , fornecerão pequenas variações na saída, $\delta f(x)$, relacionadas pela inclinação no ponto A (NISE, 2009).

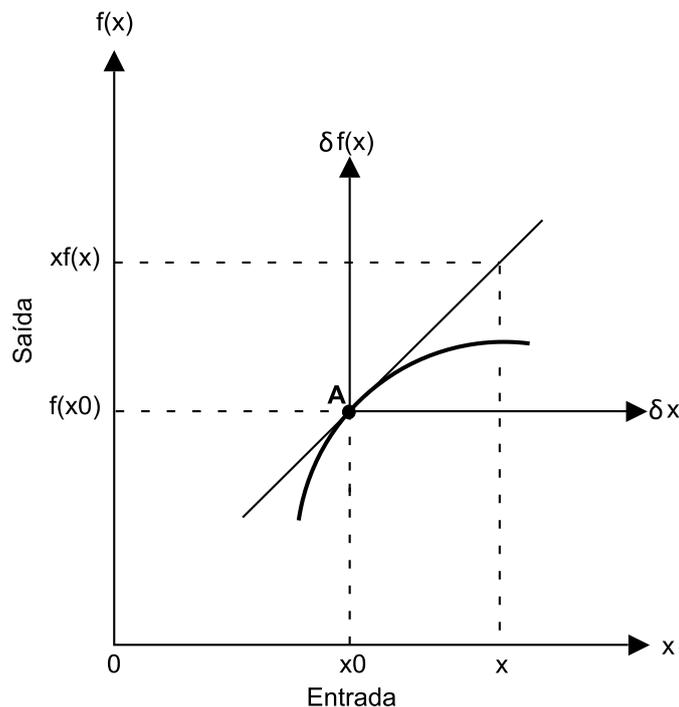


Figura 3 - Linearização em torno do ponto A.
Fonte: Adaptado de (NISE, 2009, p. 73)

Assim,

$$[f(x) - f(x_0)] \approx m_a(x - x_0) \quad (10)$$

Da qual se tem:

$$\delta f(x) \approx m_a \delta x \quad (11)$$

E

$$f(x) \approx f(x_0) + m_a(x - x_0) \approx f(x_0) + m_a \delta x \quad (12)$$

A relação (12) é mostrada na Figura 3, onde um novo conjunto de eixos, δx e $\delta f(x)$, é traçado no ponto A, e $f(x)$ é aproximadamente igual a $f(x_0)$, a ordenada da nova origem, adicionada a pequenas excursões, $m_a \delta x$, adiante do ponto A (NISE, 2009).

2.2 CONTROLE

Segundo Dorf e Bishop (2009, p. 2), “um sistema de controle é a interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzirá uma resposta desejada ao sistema.” Essa resposta desejada pode ser apontada como especificações de desempenho de um sistema, por exemplo tempo de assentamento ou máximo sobressinal, (requisitos de resposta transitória), na resposta a uma entrada em degrau. Essas especificações de desempenho deverão estar claras antes do início do projeto de um controlador, assim o projetista já poderá elaborar o projeto de controle visando às necessidades mais evidentes em um sistema (OGATA, 2010).

Um controlador compara o valor de saída real do processo ou planta com o valor de referência. Ele determina o desvio e produz um sinal de controle que reduz o desvio. O modo como o controlador automático produz o sinal de controle é chamado ação de controle. Existem, porém, diferentes ações de controle disponíveis a um projetista com o intuito de melhorar o desempenho da resposta transitória. Cada ação será focada em uma melhoria de especificação, como redução do erro em regime permanente ou alcançar a estabilidade de um sistema. Por isso, para conseguir melhorar diferentes especificações simultaneamente, essas diferentes ações de controle podem também atuar simultaneamente (OGATA, 2010).

2.2.1 Ações Básicas de Controle

Os controladores industriais podem ser classificados de acordo com a ação de controle desempenhada. Os principais e mais utilizados são:

- Controlador Proporcional (P);
- Controlador do tipo Integral (I);
- Controlador do tipo Derivativo (D);
- Controlador do tipo Proporcional Integral (PI);
- Controlador do tipo Proporcional Derivativo (PD);

- Controlador do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID).

Uma característica do controlador proporcional é que ele não consegue reduzir a zero o desvio do *Setpoint*, deixando um erro residual (NISE, 2009). A Figura 4 ilustra o comportamento de uma variável controlada por um controlador proporcional após uma perturbação externa em degrau. É demonstrado que após a atuação do controlador, um novo ponto de equilíbrio é obtido.

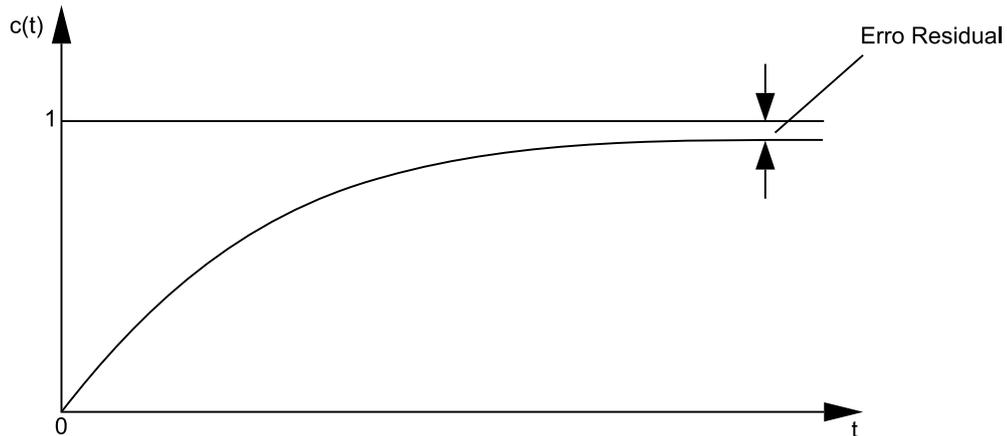


Figura 4 - Comportamento de uma variável controlada por um controlador proporcional.

Fonte: Adaptado de (OGATA, 2010, p. 198)

Esse erro ocorre devido às novas condições de equilíbrio que acontecem após o sinal do controlador proporcional atuar. A Figura 5 ilustra a representação da ação de controle proporcional em um diagrama de blocos no domínio da frequência, onde $R(s)$ é a referência do sistema, $E(s)$ é o erro atuante, $M(s)$ é a ação de controle e $C(s)$ a saída do sistema.

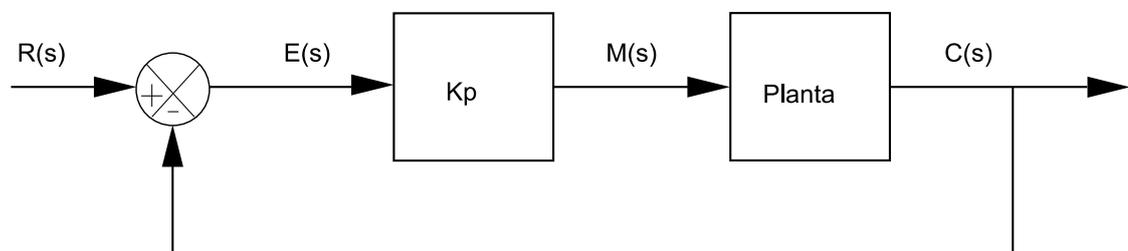


Figura 5 - Diagrama de blocos ilustrando a ação de controle proporcional.

Fonte: Adaptado de (OGATA, 2010)

A ação integral tem como único objetivo eliminar o erro atuante em regime permanente, atuando no processo ao longo do tempo enquanto a diferença entre o valor desejado e o mensurado persistir. Diferente da ação proporcional que corrige

os erros instantaneamente, o sinal de correção atua de forma lenta até o erro atuante ser eliminado. Entretanto, a ação integral isolada não é uma técnica de controle, pois não pode ser empregada sem estar atuando simultaneamente com a ação proporcional (BAYER; ARAÚJO, 2011).

Na Figura 6, são comparados os efeitos das ações proporcional (a e b) e integral (c e d), onde VC representa a variável controlada e VM a variável manipulada. Como já visto anteriormente, após a ação proporcional um novo ponto de equilíbrio é obtido, porém, a ação integral começa a agir, aumentando quando o erro estiver presente, e diminuindo quando esse erro estiver também diminuindo (BAYER; ARAÚJO, 2011).

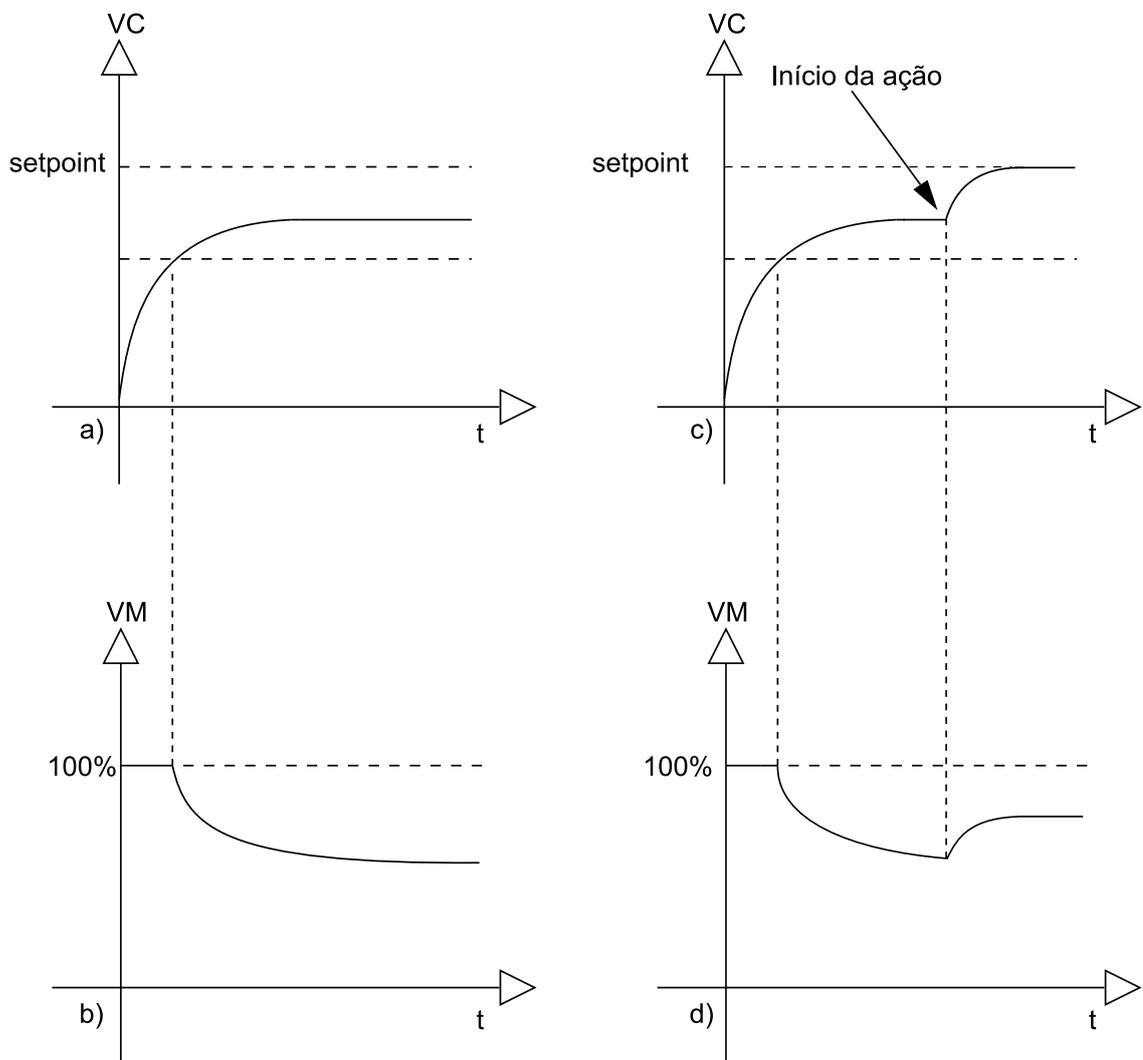


Figura 6 - a) Variável controlada pela ação proporcional. b) Variável manipulada pela ação proporcional. c) Variável controlada pela ação integral. d) Variável manipulada pela ação integral.

Fonte: Adaptado de (BAYER; ARAÚJO, 2011, p. 46)

A representação em diagrama de blocos é dada na Figura 7, onde K_i representa o ganho integral.

Todos os atuadores de sistemas físicos apresentam saturação, limites máximos e mínimos que podem ser aplicados em um processo. Quando uma ação integral é utilizada em malha fechada em processos, esta pode acumular um erro produzido pela saturação do atuador e este erro continuará a ser integrado tornando o termo integral muito grande. Este fenômeno é conhecido como “*windup*” e causa em geral oscilações indesejadas na resposta do sistema. Para corrigir esse problema, o controlador deve possuir em seu algoritmo rotinas de “*reset*” da ação integral, impedindo assim que o termo integral continue se atualizando quando a saída do controlador saturar (FREITAS, 2014).

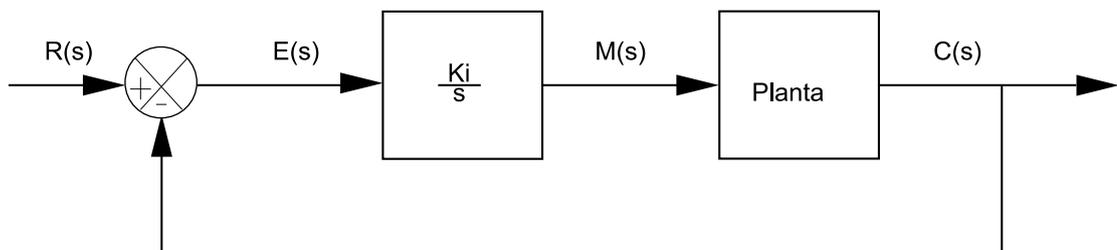


Figura 7 - Diagrama de blocos que ilustra a ação de controle integral.
Fonte: Adaptado de (OGATA, 2010)

A atuação de um controlador PI corresponde à soma de uma ação proporcional com uma ação integral. Desta forma, ocorrerá a melhora da resposta transitória com a contribuição da ação proporcional, enquanto a ação integral corrigirá o erro atuante em regime permanente (OGATA, 2010). A representação de um diagrama de blocos de um PI pode ser observada na Figura 8.

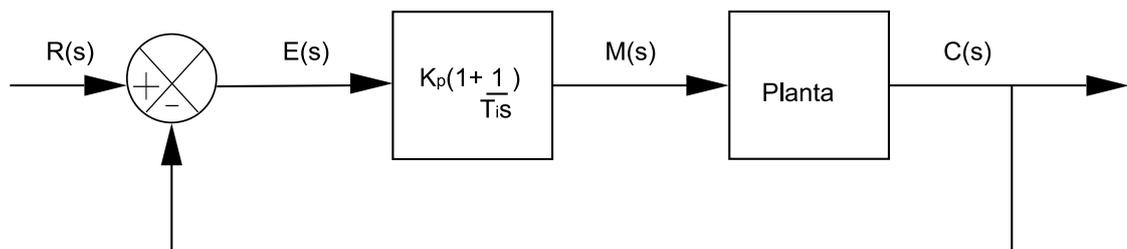


Figura 8 - Diagrama de blocos que ilustra a ação de controle proporcional e integral.
Fonte: Adaptado de (OGATA, 2010)

A ação derivativa tem como objetivo diminuir a velocidade das variações de variável controlada, evitando que se eleve ou baixe muito rapidamente. O princípio básico se dá em proporcionar uma correção preventiva do desvio, ou seja, quando há uma tendência súbita de aumento no desvio, a ação derivativa atuará de forma antecipada, diminuindo o tempo de resposta (BAYER; ARAÚJO, 2011). Assim como a ação integral, a ação derivativa não é uma técnica isolada de controle, pois não pode ser empregada separadamente de uma ação proporcional.

Quando em um sistema uma variação de degrau ocorrer subitamente, a ação derivativa, que é proporcional à velocidade do desvio, causará uma mudança brusca na variável manipulada.

Analisando a Figura 9 é concluído que a ação derivativa não deve ser utilizada em processos com respostas rápidas. Da mesma forma, não deverá ser utilizada em sistemas que apresentem ruídos de alta frequência no sinal de medição, pois a ação de controle provocará súbitas mudanças na saída de controle podendo levar o processo à instabilidade.

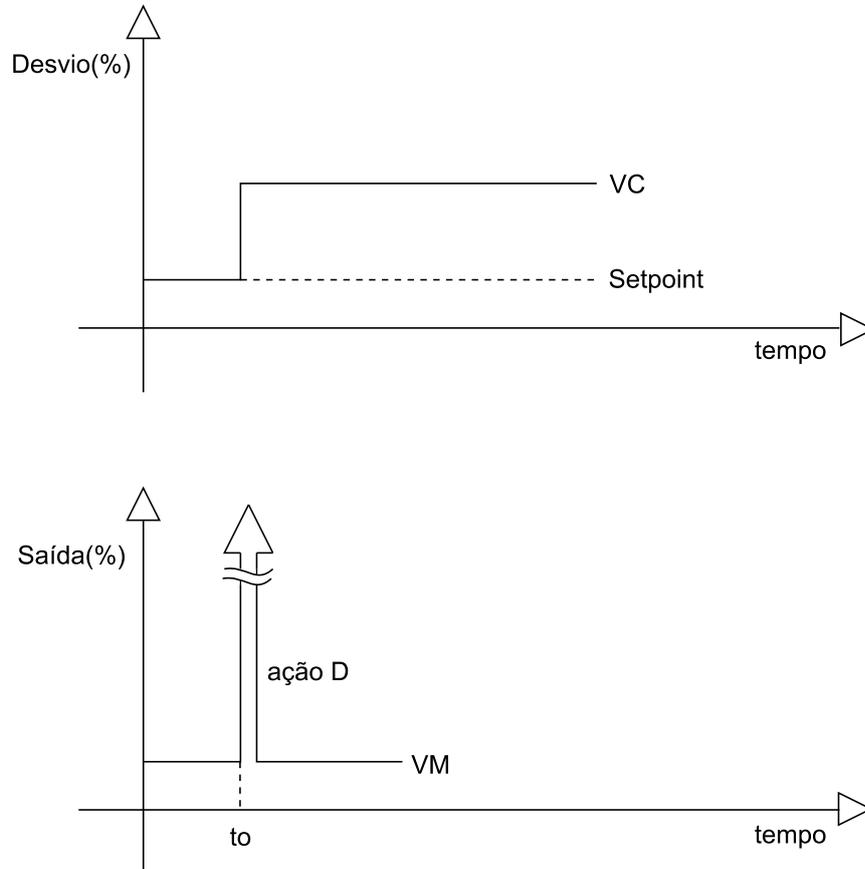


Figura 9 - Ação derivativa a uma variação do tipo degrau.
Fonte: Adaptado de (BAYER; ARAÚJO, 2011, p. 49)

Na Figura 10 está a representação em diagramas de blocos, onde K_D representa o ganho derivativo.

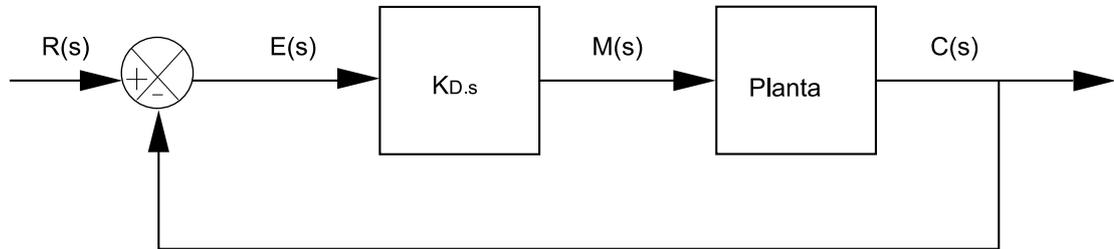


Figura 10 - Diagrama de blocos que ilustra a ação de controle derivativa.
Fonte: Adaptado de (OGATA, 2010)

Ao combinar as ações proporcional, integral e derivativa, uma única ação de controle é gerada, a qual aproveita as características de cada uma das ações. Esse novo controlador é denominado proporcional-integral-derivativo ou simplesmente PID (OGATA, 2010). O controlador PID é largamente utilizado e consegue solucionar uma vasta quantidade de problemas de controle. No entanto, embora esse controlador permita obter os melhores resultados em geral, na prática, existem processos que devido a suas características dinâmicas, a utilização da ação derivativa não é aconselhável (BAYER; ARAÚJO, 2011).

A representação desta ação de controle poderá ser tratada por três meios diferentes: paralelo, série ou acadêmico (OGATA, 2010). Expostos respectivamente pelas equações (13), (14) e (15):

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (13)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) (1 + T_D s) \quad (14)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (15)$$

A Figura 11 apresenta uma comparação das respostas de um sistema controlado após a introdução de uma perturbação externa em degrau. A ação proporcional torna a resposta mais rápida e reduz o erro, a ação integral elimina o erro em regime permanente e finalmente, com a ação derivativa, ocorrerá a redução

tanto da intensidade das oscilações quanto do tempo de resposta (BAYER; ARAÚJO, 2011).

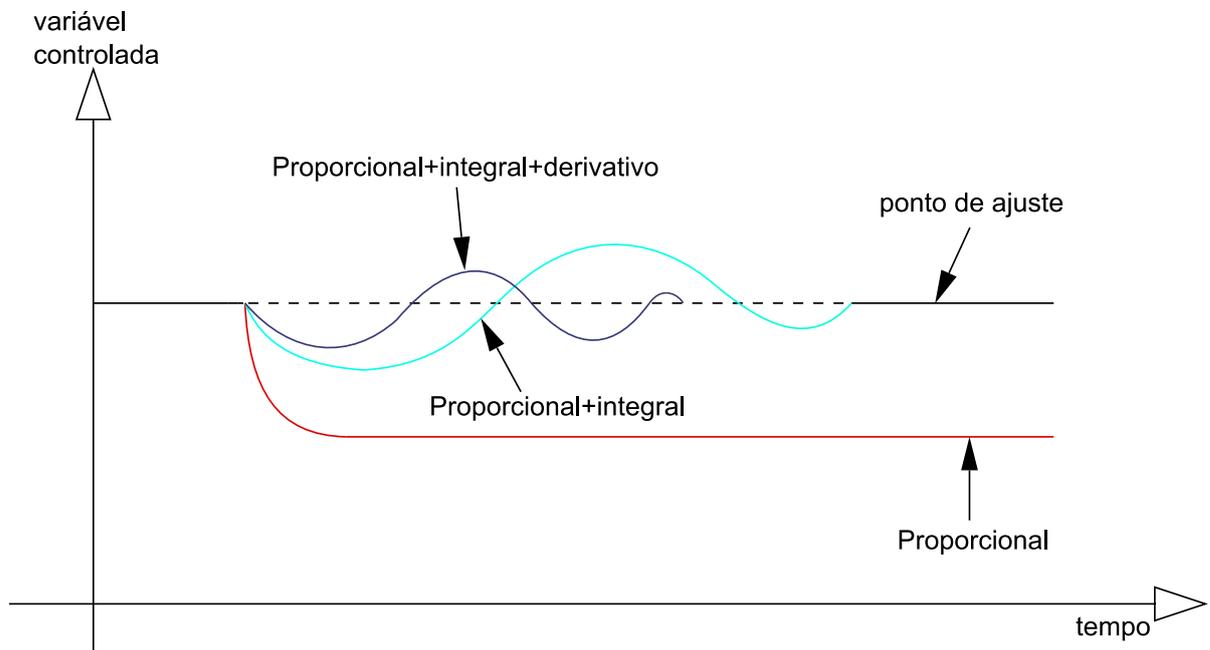


Figura 11 - Comparação das ações P, PI e PID.
 Fonte: Adaptado de (BAYER; ARAÚJO, 2011, p. 54)

Os efeitos das ações em uma resposta de controle em malha fechada, com os parâmetros devidamente ajustados, são listados de uma forma mais simples na Tabela 1.

Tabela 1 - Efeitos na resposta de um controle para as ações P, I e D.

Resposta Controle	Tempo de Subida	Overshoot	Tempo de Assentamento	Erro no Regime permanente
P	Diminui	Aumenta	Não altera	Diminui
I	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
D	Não altera	Diminui	Diminui	Não altera

Fonte: Adaptado de (BAYER; ARAÚJO, 2011, p. 55)

2.2.2 Métodos de Projeto de Controladores

O projetista, antes da elaboração de um controlador, deverá estar ciente dos parâmetros que deverão ser manipulados, pois cada sistema pode ser descrito a partir de parâmetros particulares, sejam esses no domínio do tempo ou da frequência. Após esse importante detalhe, o projeto de compensadores poderá ser desenvolvido, onde se tenta satisfazer todas as especificações de desempenho. Depois de projetado o controlador, o projetista deverá verificar se o sistema em malha fechada irá satisfazer os parâmetros que foram manipulados (OGATA, 2010). Diversos métodos são usados para a elaboração de um controlador. Neste trabalho, o método do lugar das raízes será enfatizado, pois foi o método utilizado para o projeto dos controladores para a bancada.

O lugar das raízes é uma representação gráfica das localizações dos pólos da função de transferência de malha fechada de um sistema de controle, em função de algum parâmetro da função de transferência de malha aberta. A localização dos pólos de malha aberta está diretamente relacionada com especificações do sistema como, por exemplo, porcentagem de ultrapassagem, tempo de assentamento, etc. Ao utilizar o método do lugar das raízes, os efeitos da variação do valor do ganho ou da adição de pólos e zeros, poderão ser previstos pelo projetista. Para realizar um esboço do lugar geométrico das raízes, algumas propriedades do método devem ser levadas em consideração. Essas propriedades podem ser deduzidas a partir de um sistema de controle, como demonstrado a partir da Figura 12 (NISE, 2009).

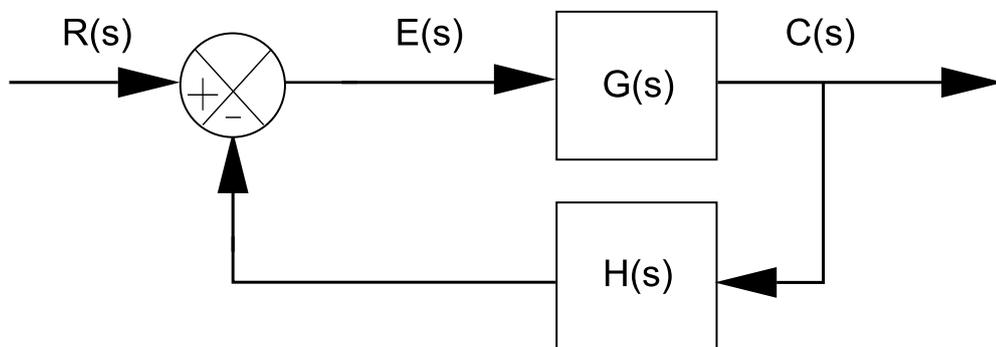


Figura 12 - Sistema em malha fechada.
Fonte: Adaptado de (NISE, 2009, p. 306)

A função de transferência em malha fechada do sistema é $F(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s).H(s)}$. O objetivo inicial é determinar os pólos da função de transferência em malha fechada, pois eles caracterizam a resposta do sistema. Para isso, a equação característica do sistema deve ser resolvida. No caso do sistema da Figura 12, a equação a ser resolvida é $1 + G(s).H(s) = 0$ (NISE, 2009). A equação deve ser rearranjada como demonstrado na equação (16) e os pólos e zeros localizados.

$$1 + \frac{K(s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_n)} = 0 \quad (16)$$

Seguindo basicamente cinco regras é possível realizar um traçado de um primeiro esboço do lugar geométrico das raízes utilizando um número mínimo de cálculos. Para Nise (2009, p. 313), “as regras produzem um esboço que fornece uma visão global intuitiva do comportamento de um sistema de controle”.

2.3 AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Para Silveira e Santos (2004, p. 23), “a automação é um conceito e um conjunto de técnicas por meio das quais se constroem sistemas ativos capazes de atuar com uma eficiência ótima pelo uso de informações recebidas do meio sobre o qual atuam.” É formada principalmente por três componentes básicos que, atuando juntos, realizam uma realimentação das informações onde o controle é desejado, como ilustrado na Figura 13.

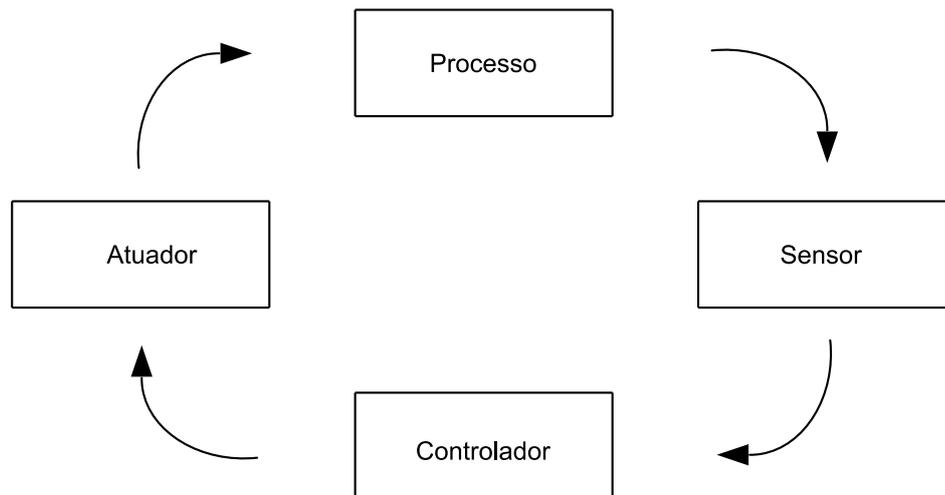


Figura 13 - Diagrama de blocos de um sistema de automação.
 Fonte: Adaptado de (SILVEIRA; SANTOS, 2004, p. 24)

Um sensor é um dispositivo que responde a um estímulo físico/químico de maneira específica e mensurável analogicamente, podendo enviar sinais para fechar ou abrir contatos através dos estímulos citados. Atuador é um elemento que produz movimento, atendendo a comandos que podem ser manuais, elétricos ou mecânicos. E por fim, o controlador é o projeto desenvolvido para ajustar especificações de desempenho desejadas (SILVEIRA; SANTOS, 2004).

Sempre que novas técnicas de controle são introduzidas em um processo, a automação industrial é verificada. A mesma está sempre associada ao aumento de produtividade e qualidade de vida da sociedade.

2.3.1 Sistema Supervisório

Os sistemas supervisórios permitem que as informações de um processo produtivo ou instalação física possam ser monitoradas e rastreadas em tempo real. Através de dispositivos que realizam a aquisição de dados, essas informações podem ser coletadas, manipuladas, analisadas e até mesmo armazenadas. Esses sistemas também são chamados de SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) (SILVA; SALVADOR, 2005).

Até o final da década de 70 e início da década de 80, ainda não existia um conceito específico a respeito de sistemas supervisórios. A tecnologia existente neste ramo eram lógicas de relé que acendiam lâmpadas para sinalizar o operador

de alguma anormalidade no sistema. Pode-se dizer que nesta época o sistema supervisorio tinha pouca influência na realização correta do processo, pois somente era lembrado quando havia algum erro no processo. Seus alertas podiam não ser em tempo real, fazendo com que este não tivesse tanta credibilidade e como conclusão destes fatores, não era uma ferramenta muito utilizada nesta época (LOPES, 2009).

No início da década de 90, o sistema supervisorio atingiu um grau de confiabilidade muito elevado, pois com ele as empresas já conseguiam perceber uma melhora em seus processos. Neste momento surge a arquitetura SCADA, que se baseia em utilizar os dados do sistema supervisorio para controlar a planta. Pode-se dizer que com esta nova arquitetura as empresas obtiveram um enorme ganho em produtividade e, percebendo todo o potencial desta tecnologia, os investimentos foram crescendo cada vez mais bem como a dependência das indústrias. Ao final da década de 1990, a grande maioria das indústrias já contava com sistemas supervisorio SCADA e suas respectivas produções dependiam extremamente do perfeito funcionamento do sistema supervisorio. Hoje em dia, em indústrias cujo processo é crítico e há muitas perdas em cada parada, pode-se dizer que o sistema supervisorio é o coração do processo (LOPES, 2009).

Na tentativa de se quantificar a importância deste sistema para todo o ambiente industrial atual, pode-se afirmar que praticamente todas as indústrias fazem uso desta ferramenta, onde sua importância é afirmada por todos os profissionais da área de automação industrial. Para a interação dos usuários com o processo foi escolhido criar-se um Sistema Supervisorio utilizando o software LabVIEW®. Programas desenvolvidos neste software recebem a denominação de Instrumentos Virtuais (*Virtual Instruments*) devido a sua aparência e operação serem semelhantes a instrumentos físicos. É possível construir uma interface constituída por controles e indicadores, onde os controles são botões, mostradores e caixas de texto. Já os indicadores mais comuns são gráficos, LEDs e indicadores analógicos. Os programas são compostos por dois elementos: o Painel Frontal e o Diagrama de Blocos (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

2.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Aquisição de dados (DAQ – Data AcQuisition) é o recolhimento de informações do mundo real como tensão, corrente, temperatura, pressão ou som, de forma a gerar dados que possam ser manipulados por um computador. Em comparação com sistemas tradicionais de medição, os sistemas de aquisição de dados exploram a capacidade de processamento, qualidade, produtividade, além da fácil elaboração de uma interface gráfica do processo a ser manipulado. Assim, os sistemas de aquisição de dados se tornam uma solução de medição mais poderosa, flexível e de melhor custo benefício (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

Esses sistemas de aquisição de dados vêm sendo desenvolvidos para diversas áreas de processos industriais. O seu objetivo é apresentar ao observador e usuário valores das variáveis ou dados que estão sendo medidos e controlados.

Os dados adquiridos através de sensores são normalmente monitorados, analisados e guardados em um computador. Isto é possível através de softwares interativos de controle fornecidos pelo fabricante do hardware de aquisição de dados. Esses softwares podem ser utilizados através de linguagens de programação como Experix, LabVIEW, Matlab, Visual Basic, COBOL ou C. O software de aplicação facilita a interação entre o computador e o usuário na aquisição, além da apresentação dos dados da medição (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

Os usuários estão se beneficiando através da utilização de sistemas avançados de aquisição de dados e supervisão. A mudança para esse tipo de tecnologia pode ser encarada como um processo natural demandado pelos novos requisitos de qualidade, confiabilidade e segurança do mercado. A utilização da aquisição de dados e sistemas supervisórios traz vantagens competitivas, visto que essa tecnologia cumpre com os novos requisitos de mercado citados.

Um exemplo de placa de aquisição de dados é a placa NI USB – 6009, fabricada pela *National Instruments*. Ela foi utilizada no trabalho junto com o software LabVIEW, responsável pela programação e elaboração da interface. A placa ilustrada na Figura 14 é caracterizada por:

- ✓ Oito entradas analógicas (AI0-AI7, 14 bits, 48 kS/s) com valores entre -10V e 10V;
- ✓ Duas saídas analógicas (AO0 e AO1) com valores entre 0 e 5V;

- ✓ Duas saídas analógicas (12 bits, 150 S/s); 12E/S digitais;
- ✓ Contadores de 32 bits.



Figura 14- Placa de aquisição de dados NI USB - 6009.
Fonte: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014)

Neste capítulo foram apresentados os embasamentos teóricos utilizados para a realização do trabalho, os quais foram estudados ao longo da graduação. No capítulo seguinte será demonstrada a aplicação da teoria na prática através de cálculos e simulações.

3. PROJETO DE RECONDICIONAMENTO E CRIAÇÃO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE NÍVEL, VAZÃO E PRESSÃO

3.1 SITUAÇÃO PRÉ-PROJETO DA BANCADA DIDÁTICA

Os processos de nível e vazão da bancada didática utilizada para a realização deste trabalho se encontravam recondicionados através de um trabalho anterior já finalizado. Já era possível obter sinais de tensão de 0 a 5 volts correspondentes a saída dos sensores instalados nos processos. A Figura 15 ilustra a referida bancada.



Figura 15 - Bancada de Nível e Vazão.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Para o processo de pressão, ilustrado na Figura 16, foi necessário o acesso ao manual da bancada para poder compreender o funcionamento do sensor

instalado. Neste caso, há sensores e atuadores com sinais que não podem ser utilizados diretamente pela placa de aquisição de dados e, por se tratar de patrimônio público da UTFPR, suas características originais devem permanecer inalteradas. Portanto, a troca dos sensores e atuadores contidos na bancada por outros que possam fornecer os sinais desejados não pode ser feita, o que torna o condicionamento de sinais necessário para este caso.



Figura 16 - Situação da bancada de Pressão antes do trabalho.
Fonte: Autoria Própria (2014).

3.2 LEVANTAMENTO DOS MODELOS MATEMÁTICOS E PROJETO DE CONTROLADORES PARA OS PROCESSOS DE NÍVEL E VAZÃO

Para realizar o controle dos processos, deverá ser feito, primeiramente, um levantamento matemático dos mesmos, obtendo assim a planta com suas características. Desta forma, o controle poderá ser projetado corretamente baseado em especificações de desempenho desejadas.

É necessário saber inicialmente se o sistema se comporta de maneira linear ou não linear, pois a partir dessa informação, a função de transferência poderá ser obtida diretamente caso o sistema seja linear, do contrário, um ponto de operação deverá ser escolhido e o sistema será obtido para pequenas variações em torno deste ponto. Para levantamento do modelo do processo, o esquema a malha aberta representado pela Figura 17 foi utilizado:

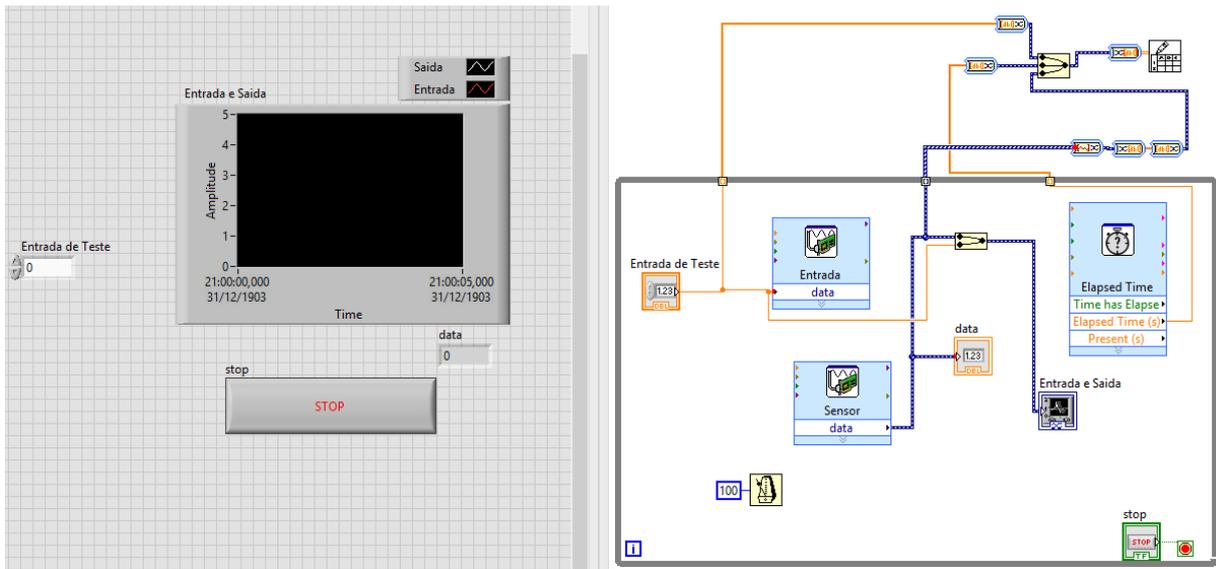


Figura 17- Esquema utilizado para obtenção de dados a malha aberta.
Fonte: Autoria Própria (2014).

O bloco “Sensor” traz a resposta do sensor do processo em forma de tensão, o bloco “Entrada” gera o sinal de tensão na entrada do processo, “Elapsed Time” conta o tempo de execução e o “Entrada de teste” gera um sinal de tensão desejado a ser aplicado na entrada do processo.

3.2.1 Processo de Nível

Na Figura 17, a entrada é fixada com uma amplitude de 3V até o instante 361,4s, onde um acréscimo de 0,2V é aplicado na entrada do sistema após o regime estacionário ser atingido. O regime estacionário tem de ser atingido para que a análise de superposição dos intervalos se torne mais adequada e com uma qualidade de compreensão melhorada. O tempo de simulação total foi de 805,4s.

Analisando a Figura 18, percebe-se que o processo não é linear, pois para pequenas variações na entrada (0,2V) em torno de um ponto de operação escolhido (3V), a saída não se comporta proporcionalmente a entrada. Isso pode ser verificado observando a relação entre $\Delta\text{Entrada}$ e $\Delta\text{Saída}$. O sistema seria linear se

a relação $Saída_regime/Entrada_regime$ ($3,45/3,2=1,08$) fosse igual $\Delta Saída_regime/\Delta Entrada_regime$ ($0,31/0,2=1,55$). Por isso, a função de transferência no intervalo de 0 à 361,4s difere da que está entre 361,4 à 805,4s. Portanto, pode-se concluir que este processo não atende a condição de superposição.

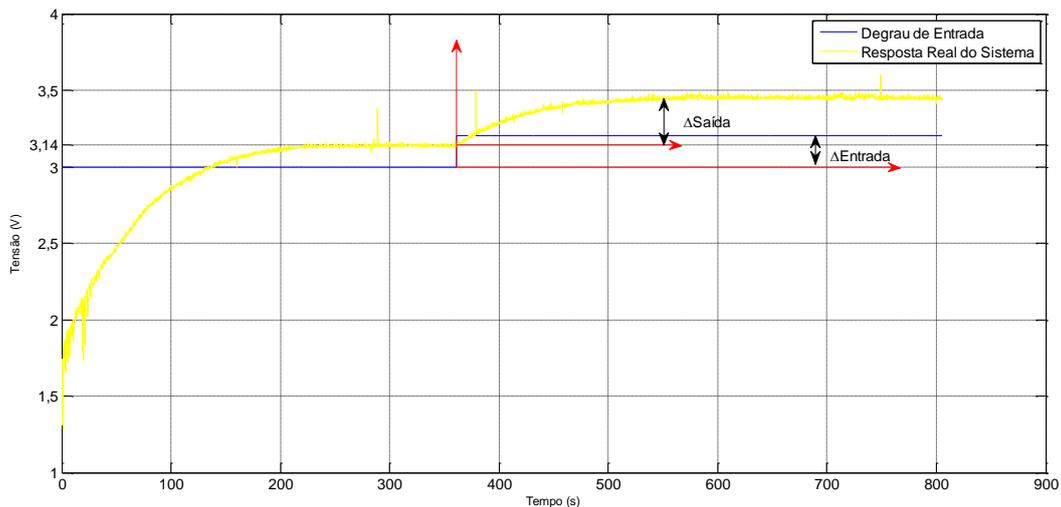


Figura 18 - Resposta ao degrau para o processo de Nível.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Após a verificação da não linearidade, um modelo equivalente linear deve ser obtido em torno do ponto de operação escolhido para pequenas variações na entrada. Neste caso, o ponto de operação foi de 3V para a entrada e 3,14V para a saída. Para isso, a planta no intervalo entre 361,4 à 805,4s deve ser obtida, pois nesse trecho tem-se a pequena variação de nível para uma pequena variação na entrada e é onde o controle do processo deverá ser feito.

Usando o Matlab é possível manipular os dados obtidos anteriormente e realizar uma análise apenas da parte desejada separadamente (em torno do ponto de operação), no caso, o trecho que está dentro dos eixos x y vermelho da Figura 18. Isso pode ser observado na Figura 19.

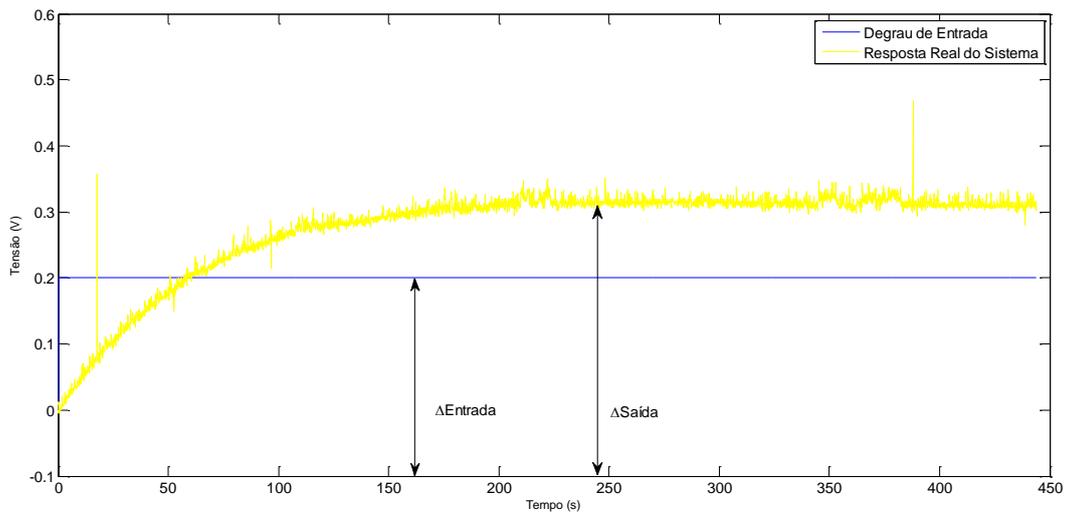


Figura 19 - Resposta deslocada do processo de Nível.
Fonte: Autoria Própria (2014).

A parte necessária para análise foi deslocada para o ponto 0, podendo observar agora como se a resposta fosse para uma entrada de 0,2V. Com os dados desta entrada e saída é possível, então, obter a seguinte função de transferência:

$$\frac{\Delta Saída}{\Delta Entrada} = \frac{1,589}{58,32s + 1} \quad (17)$$

Aplicando-se um degrau de 0,2 para esta função de transferência obtida e sobrepondo o resultado com a Figura 19, é obtido o resultado na Figura 20.

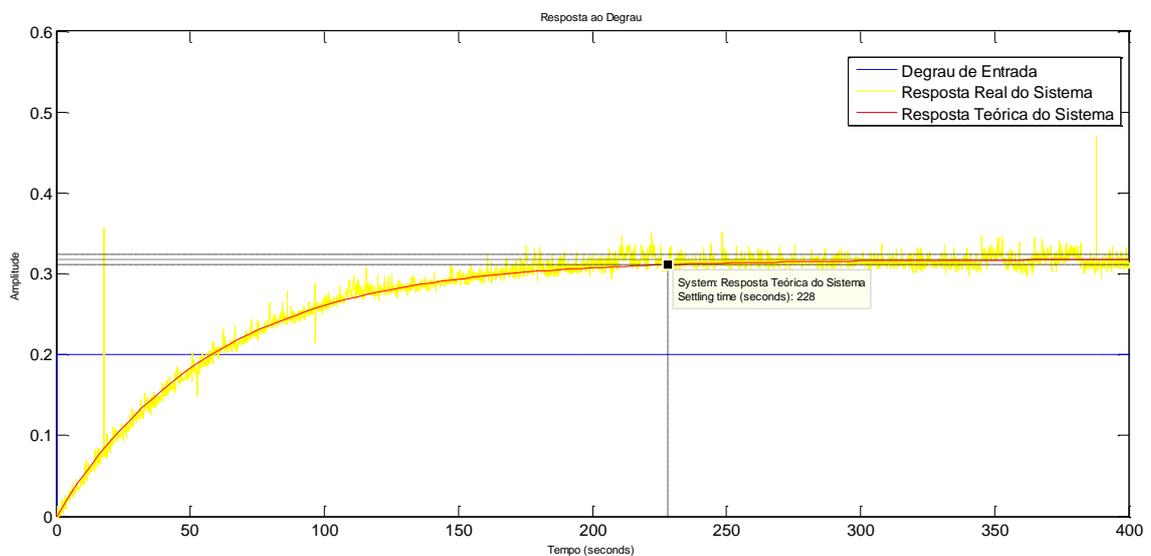


Figura 20 - Comparação da Resposta Real e Teórica para uma mesma entrada.

Fonte: Autoria Própria (2014).

Tendo em vista que a resposta teórica representa o sistema real com uma boa fidelidade, torna-se possível projetar o controlador baseado nessa função de transferência obtida para alguma especificação de desempenho desejada. Por ser um sistema de primeira ordem, um controlador PI foi escolhido para atender a especificação desejada, que é a melhora do tempo de assentamento em relação ao sistema à malha aberta e, eliminação do erro de estado estacionário. E em relação aos ganhos, foi feita a utilização do método do lugar das raízes, sendo os polos alocados de modo a se obter a resposta desejada.

Um diagrama foi projetado no LabVIEW para poder fazer a análise a malha fechada. Neste diagrama ilustrado na Figura 21, se encontra um botão *stop* e um botão para gravação de dados e, ainda, é possível ajustar previamente o valor de referência, valores dos ganhos K_p e K_i , e um valor de pequeno acréscimo à referência. Uma tela gráfica também se mostra presente no diagrama, na qual, é possível analisar a Entrada e Saída do sistema e indicar quando a resposta entrar em regime. Por fim, um LED sinalizará caso ocorra saturação.

Após o ajuste dos ganhos do controlador PI, o programa é iniciado com uma referência pré-estabelecida situada no ponto de operação (3,1V). No momento em que, graficamente, o estado em regime for observado, o botão de gravação dos dados é pressionado e, junto com a gravação, é inserido um pequeno acréscimo de tensão (0,3V) na referência automaticamente. Esse pequeno acréscimo na referência é pré-estabelecido no diagrama chamado de "Delta_SP". O processo de gravação registra dados de tempo de simulação, degrau de referência e resposta real do sistema. Durante um dos experimentos para o processo de nível, a Figura 21 foi obtida ilustrando o diagrama desenvolvido com os dados utilizados. A mesma foi adquirida em um momento final do processo, onde o botão de gravação já havia sido pressionado e o estado já se encontrava em regime, como pode ser observado no gráfico.

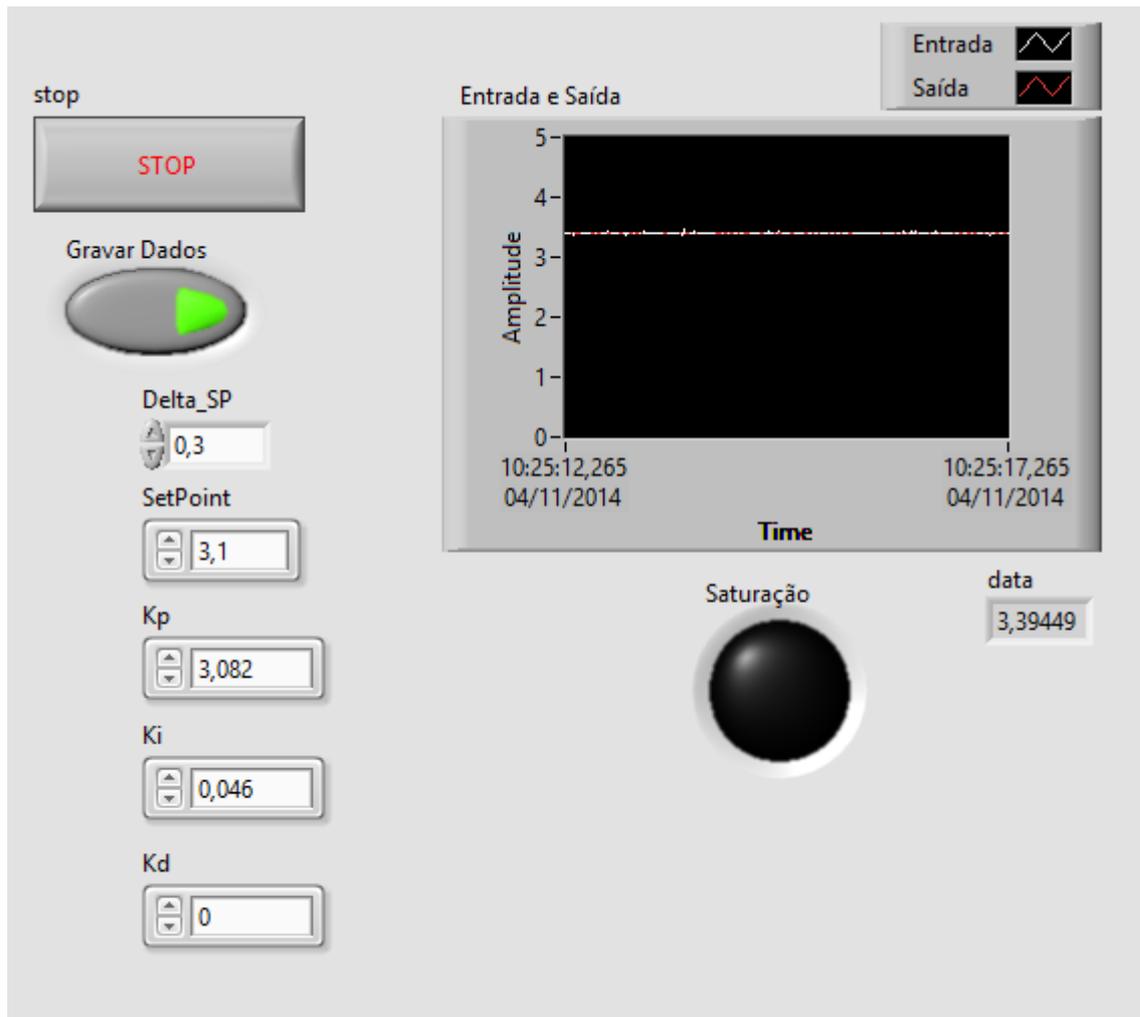


Figura 21 - Diagrama utilizado para obtenção dos dados à malha fechada.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Utilizando os dados da gravação, obteve-se a resposta contida na Figura 22.

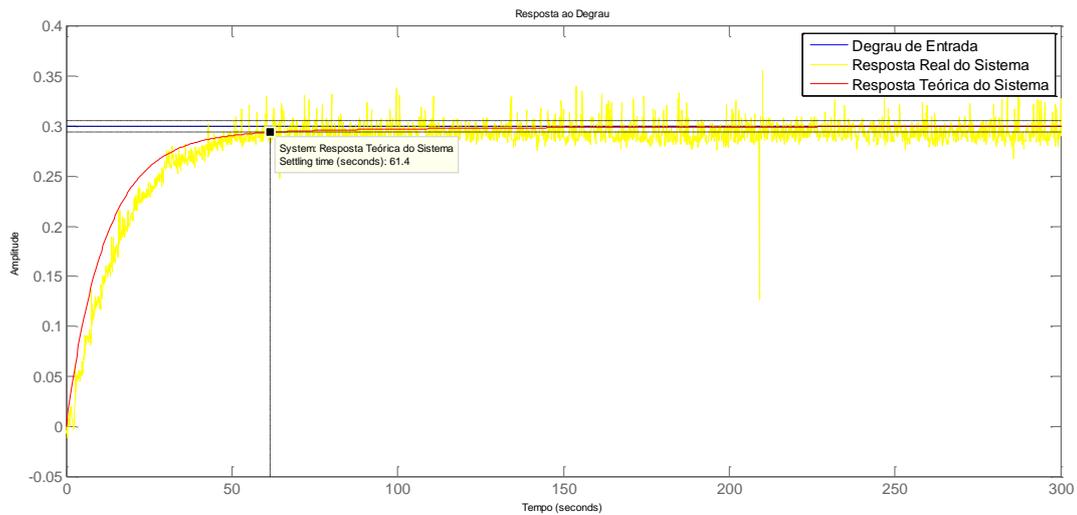


Figura 22 - Comparação da Resposta Real e Teórica compensadas com o controlador PI.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Comparando as Figuras 20 e 22, percebe-se que ocorreu uma ampla melhora na especificação desejada sem afetar outros fatores prejudicialmente, além de corrigir o erro em regime permanente. Esse foi apenas um dos controladores projetados, assim o usuário poderá escolher um sistema mais rápido ou mais lento, dependendo da aplicação desejada.

3.2.2 Processo de Vazão

Para levantamento do modelo do processo de vazão, no diagrama da Figura 17, a entrada foi ajustada em 2,9V e um acréscimo de 0,4V é aplicado à entrada após o mesmo se encontrar em regime. Por ser um processo extremamente rápido, o tempo de simulação total do sistema foi de apenas 4,205s. Na Figura 23 é possível analisar a resposta obtida.

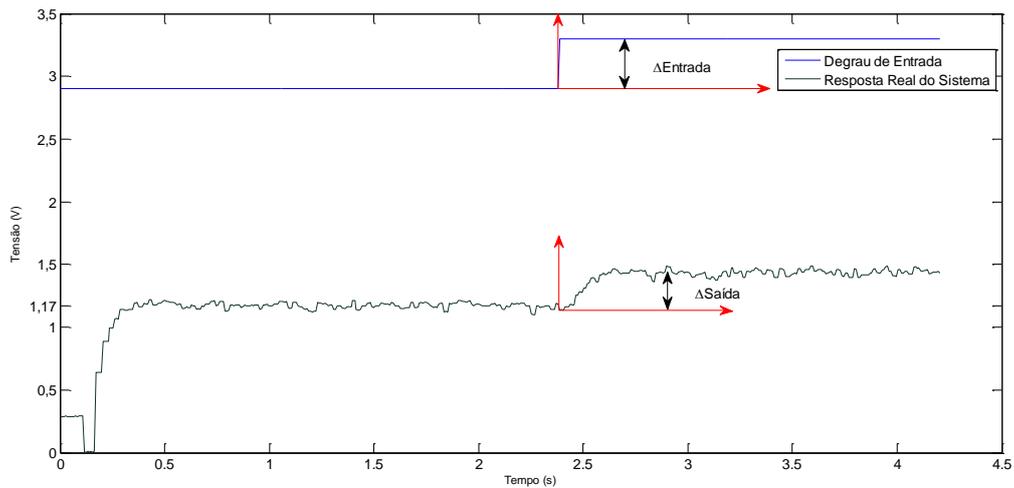


Figura 23 - Resposta ao degrau para o processo de Vazão.
Fonte: Autoria Própria (2014).

A primeira vista da Figura 23, não é possível afirmar se o sistema é linear, portanto um ganho na resposta real do sistema foi inserido apenas para poder dizer com certeza o comportamento do processo. Este ganho foi de tal forma que a saída tenha a mesma amplitude que a entrada antes de aplicar a pequena variação na entrada. A nova resposta obtida é ilustrada na Figura 24.

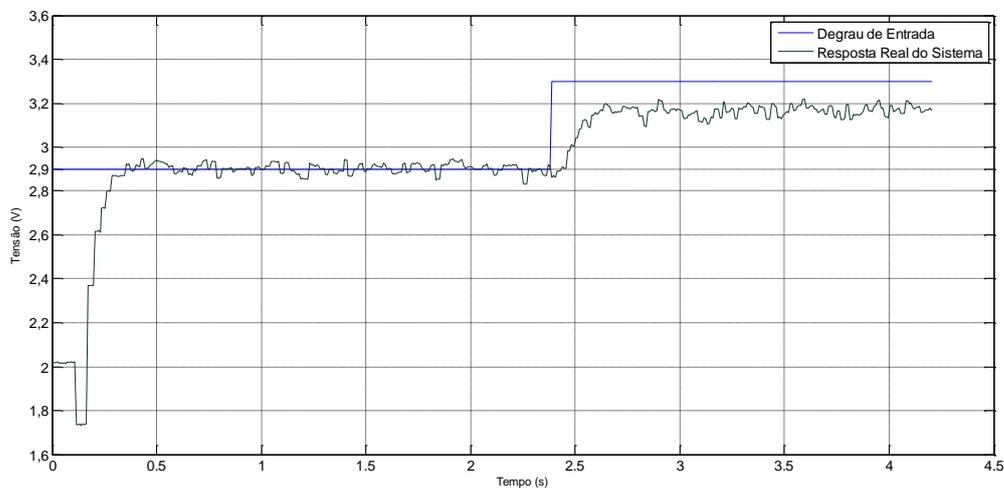


Figura 24 - Resposta ao degrau para o processo de Vazão com um pequeno ganho.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Após o ganho inserido é possível afirmar que o sistema não é linear, pois para pequenas variações na entrada (0,4V) em torno de um ponto de operação escolhido (2,9V), a saída não acompanha a entrada, não satisfazendo o princípio de linearidade.

Após a verificação da não linearidade, um modelo equivalente linear deve ser obtido em torno do ponto de operação escolhido para pequenas variações na entrada. Neste caso, ponto de operação foi de 2,9V para a entrada e 1,17V para a saída. Para isso, a planta no intervalo entre 2,379 a 4,205s deve ser obtida, pois nesse trecho tem-se a pequena variação de vazão para uma pequena variação na entrada e é onde o controle do processo deverá ser feito.

Usando o Matlab é possível manipular os dados obtidos anteriormente e realizar uma análise apenas da parte desejada separadamente em torno do ponto de operação, no caso, o trecho que está dentro dos eixos x y vermelho da Figura 23. Podendo ser observado na Figura 25.

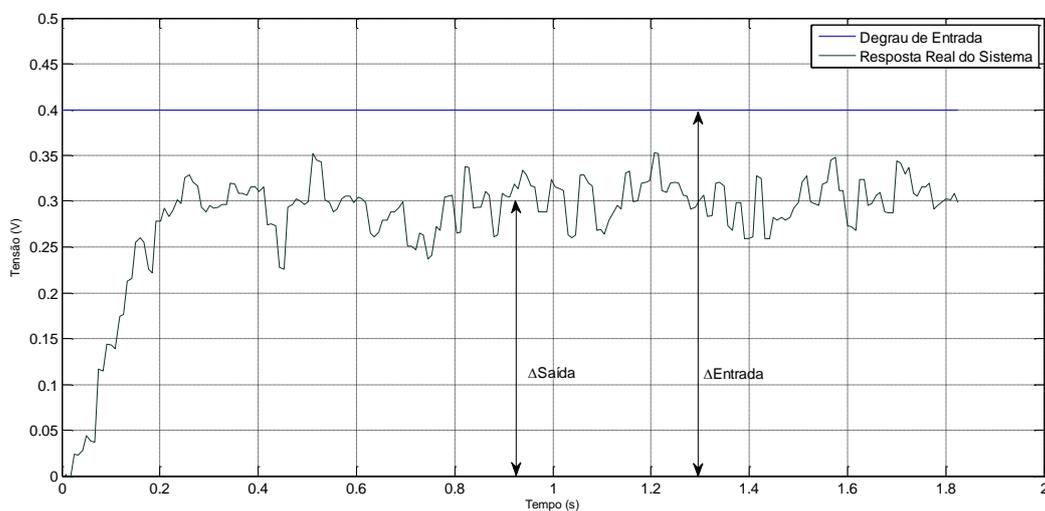


Figura 25 - Resposta deslocada do processo de Vazão.
Fonte: Autoria Própria (2014).

A parte necessária para análise foi deslocada para o ponto 0, podendo observar agora como se a resposta fosse para uma entrada de 0,4V. Com os dados da entrada e saída é coerente dizer que o sistema se aproxima de um sistema de 2ª ordem, e a seguinte função de transferência é obtida.

$$\frac{\Delta Saída}{\Delta Entrada} = \frac{0,7445}{0,005042s^2 + 0,102s + 1} \quad (18)$$

Aplicando-se um degrau de 0,4 para esta função de transferência obtida e sobrepondo o resultado com a Figura 25, foi obtido o resultado da Figura 26:

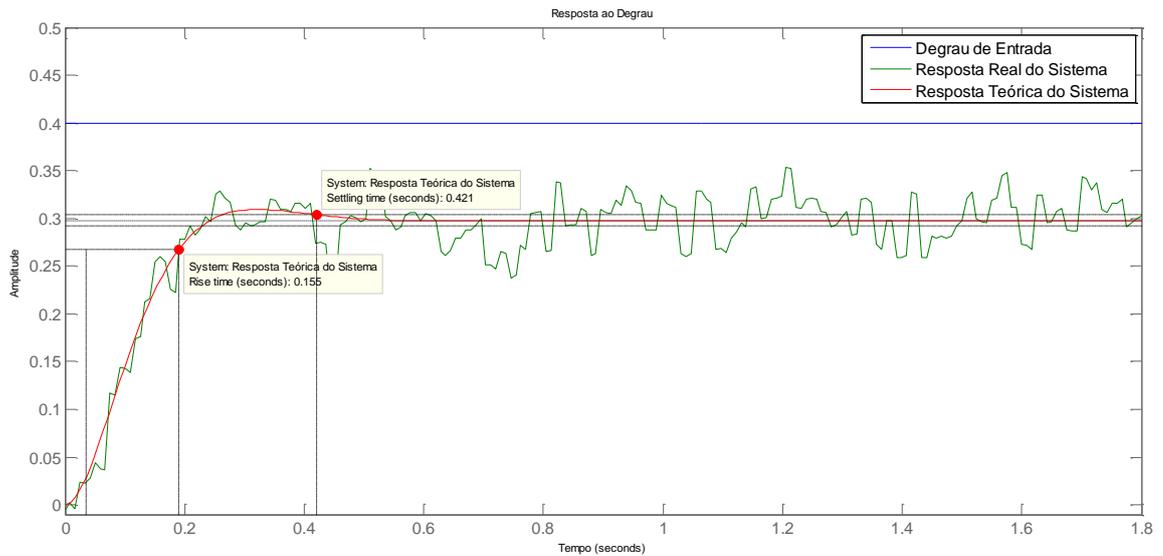


Figura 26 - Comparação da Resposta Real e Teórica para uma mesma entrada.
Fonte: Autoria Própria (2014).

A resposta do modelo ficou semelhante a do sistema real, sendo assim possível afirmar que o comportamento do processo de vazão poderá ser controlado através de simulações efetuadas na curva teórica.

Para este caso, devido ao sistema ser de segunda ordem, um controlador apropriado seria o PID, porém devido ao elevado ruído optou-se apenas pelo PI.

Do diagrama da Figura 21, primeiramente é realizado o ajuste dos ganhos do controlador PI e depois o programa é iniciado com uma referência pré-estabelecida situada no ponto de operação (1,17V). No momento em que, graficamente, o estado em regime puder ser observado, o botão de gravação de dados é pressionado e, junto com a gravação é inserido um pequeno acréscimo (0,27V) na referência automaticamente, sendo esta também pré-estabelecida no “Delta_SP” do diagrama. Obtendo assim a resposta contida na Figura 27.

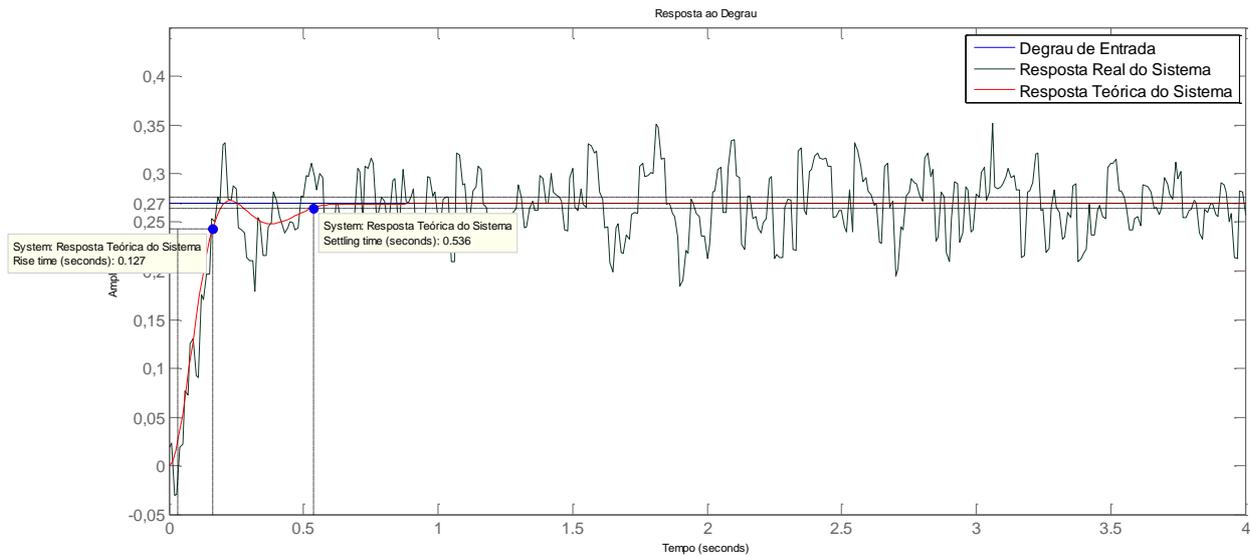


Figura 27 - Comparação da Resposta Real e Teórica compensadas com o controlador PI.
Fonte: A autoria Própria (2014).

Assim como o processo de nível, vários controladores foram desenvolvidos para diferentes tipos de aplicações do sistema. Acima, existe a resposta de um destes controladores projetados, que além de corrigir o erro em regime permanente, deixa o percentual de ultrapassagem %UP mais baixo e um tempo de subida mais rápido. O tempo de assentamento é um pouco mais lento, porém, como o sistema é muito rápido, essa especificação se torna quase imperceptível.

3.3 PROCESSO DE PRESSÃO

3.3.1 Recondicionamento do Processo de Pressão

Para o processo de pressão havia a necessidade de realizar o recondicionamento do processo, pois os sensores que estão presentes na bancada não enviam respostas compatíveis com a placa de aquisição de dados utilizada no trabalho. Primeiramente foi feito um estudo do diagrama do processo de pressão ilustrado pela Figura 28 para entender o funcionamento do pré-projeto.

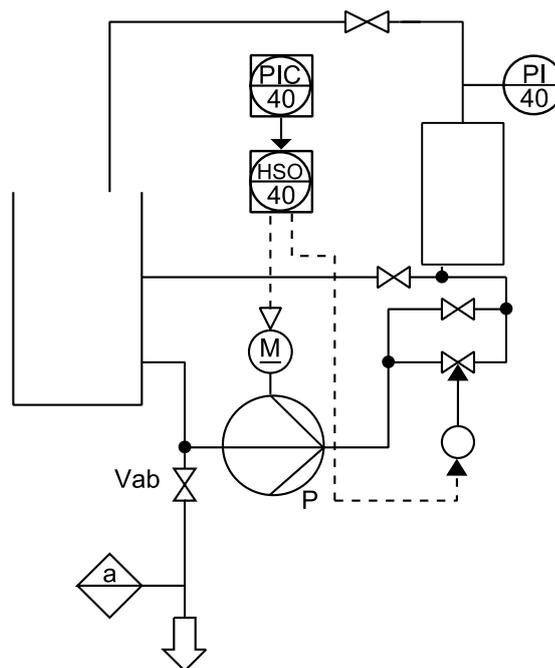


Figura 28- Diagrama de funcionamento do processo de Pressão.
Fonte: Adaptado do Manual da Festo

Dois modos de operação são usados no sistema de controle de pressão implementado:

- Controle de pressão com a ajuda de uma válvula proporcional. A variável de correção neste caso é o curso do pistão da válvula, a bomba P funciona constantemente;
- Controle de pressão com ajuda da bomba. Neste caso, a variável de correção é a velocidade da bomba.

A transição entre os dois modos poderá ser feita manualmente. Porém, o controlador foi projetado para trabalhar com a ajuda da bomba, não fazendo a utilização da válvula proporcional.

O sensor de pressão piezo resistivo analógico com amplificador embutido e compensador de temperatura é montado em uma única caixa de alumínio. A pressão a ser medida é transmitida a um elemento piezo resistivo. O sinal assim gerado é amplificado e transmitido como uma tensão no conector elétrico. Essa tensão de saída varia de 0 a 10V e são correspondentes a um sinal de pressão que varia de 0 a 100mbar. A alimentação do sensor é realizada com uma tensão de 24V. Este sensor pode ser observado na Figura 29.



Figura 29 - Sensor de Pressão localizado na bancada.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Na etapa de acionamento, como a placa de aquisição de dados a ser utilizada fornece apenas sinais de tensão em uma faixa que varia de 0 a 5V na saída, foi necessário uma adequação para o sinal de acionamento da bomba, amplificando o sinal gerado da placa de 0 a 5V para 0 a 24V. Primeiramente foi desenvolvido um circuito amplificador de ganho 2, o qual amplificou o sinal de saída gerado pela placa para 0 a 10V. Após essa etapa, este sinal amplificado foi direcionado para um estágio de amplificação já presente na bancada, o qual amplifica sinais de 0 a 10V para sinais de 0 a 24V, permitindo assim realizar o acionamento da bomba através da placa de aquisição de dados utilizada no trabalho. Com ajuda da Figura 30, as etapas de amplificação ficam mais claras de serem compreendidas, onde o trecho dentro do bloco pontilhado representa a parte já existente na bancada.

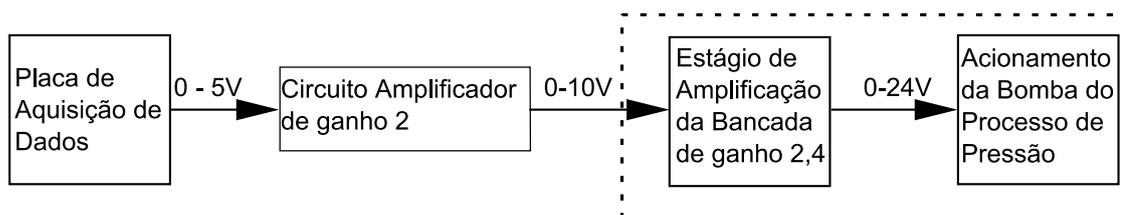


Figura 30 - Etapas para o acionamento do processo de Pressão.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Na etapa de aquisição, o sinal de saída do sensor de pressão já gera um sinal permissível à faixa de tensão da placa de aquisição, nenhuma mudança precisava ser feita, porém para deixar no mesmo padrão dos processos de Nível e Vazão, um divisor de tensão foi inserido no sistema, obtendo então uma resposta de 0 a 5V. A Figura 31 mostra o esquemático elaborado com a ajuda do software Eagle.

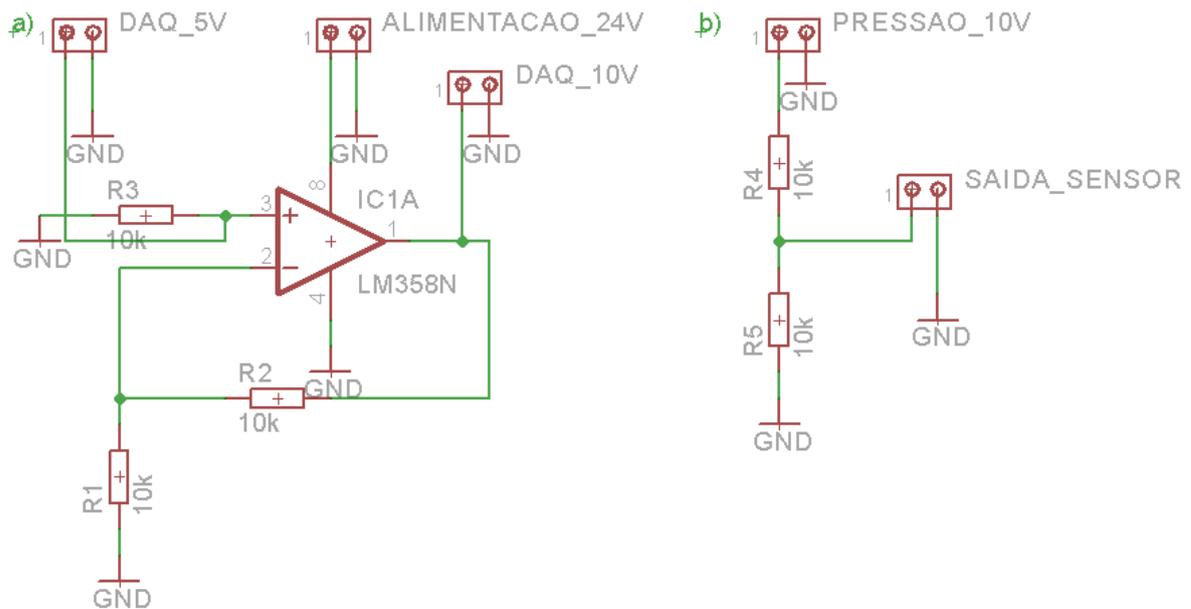


Figura 31 - a) Esquemático do Circuito de Acionamento da Bomba. b) Esquemático do Circuito de Aquisição do Processo de Pressão.

Fonte: Autoria Própria (2014).

O circuito ficou simples e prático, pois resolveu o problema da alimentação e ajudou a manter um padrão de saída para a bancada de processos. Após montagem em *protoboard* e verificação do funcionamento correto do circuito, inseriu-se definitivamente o novo circuito à bancada em uma placa de circuito impresso, conforme mostra a Figura 32.

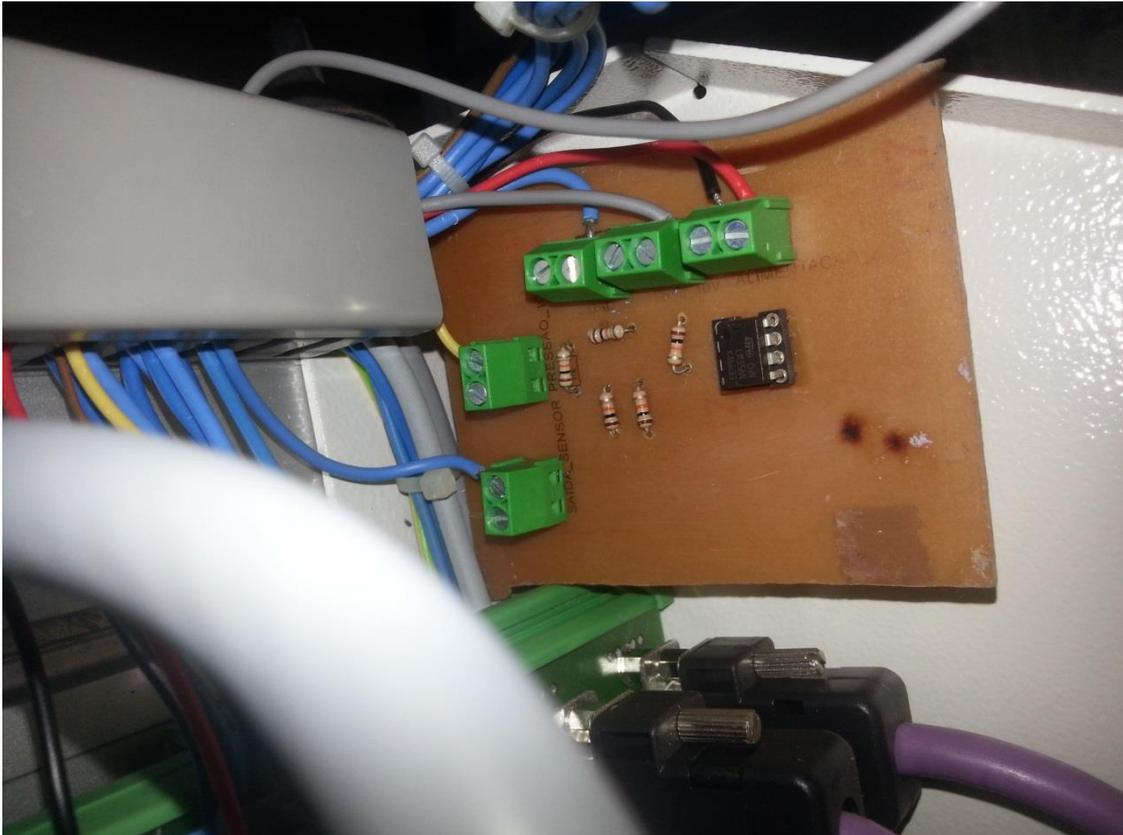


Figura 32 - Circuito de acionamento da bomba e aquisição do sensor de Pressão.
Fonte: Aatoria Própria (2014).

A parte externa da bancada é constituída de quatro chaves liga/desliga e três pares de bornes, dos quais uma chave e dois bornes estavam sem conexão.

Em relação às chaves, a que está com o nome “*extern function*” (função externa), deve ser modificada para uso. Esta chave, por não possuir nenhuma conexão, foi conectada ao sistema de condicionamento desenvolvido e pode entrar em funcionamento quando a mesma estiver no estado *on*. Assim, ao manter a chave na posição *off*, a bancada permanece com seu funcionamento original, sem qualquer alteração. O esquemático da ligação feita na chave encontra-se na Figura 33.

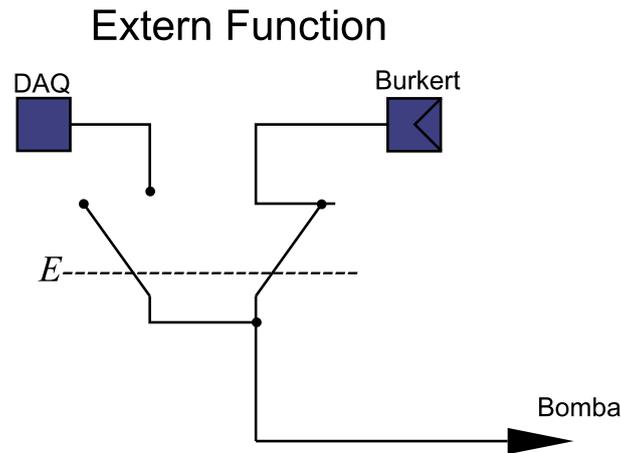


Figura 33 - Esquemático da ligação da chave Extern Function no processo.

Fonte: Aatoria Própria (2014).

Já em relação aos bornes, o par do meio disponibilizava originalmente a saída do sinal do sensor, assim, com o auxílio da chave de função externa, este par foi utilizado para leitura do “novo” sinal do sensor. Já o primeiro par de bornes, assim como nos outros processos, foi escolhido para receber o sinal gerado pela placa de aquisição de dados. A parte externa ficou então seguindo o padrão mostrado na Figura 34.



Figura 34 - Chaves e bornes para ligação com a placa de aquisição de dados.

Fonte: Aatoria Própria (2014).

3.3.2 Levantamento de Modelos Matemáticos e Projeto de Controladores para o Processo de Pressão

O processo de pressão depende diretamente do nível de água presente no tanque de pressão do sistema, portanto todas as análises a seguir foram feitas com o nível fixo em 160 milímetros de coluna d'água.

Para levantamento do modelo do processo de pressão, no diagrama da Figura 17, a entrada é fixada em 3V e um acréscimo de 0,2V é aplicado à entrada após o mesmo se encontrar em regime. Este também é um sistema rápido e por isso seu tempo de simulação foi de apenas 29,93s. Com a ajuda da Figura 35, a análise da resposta pode ser feita.

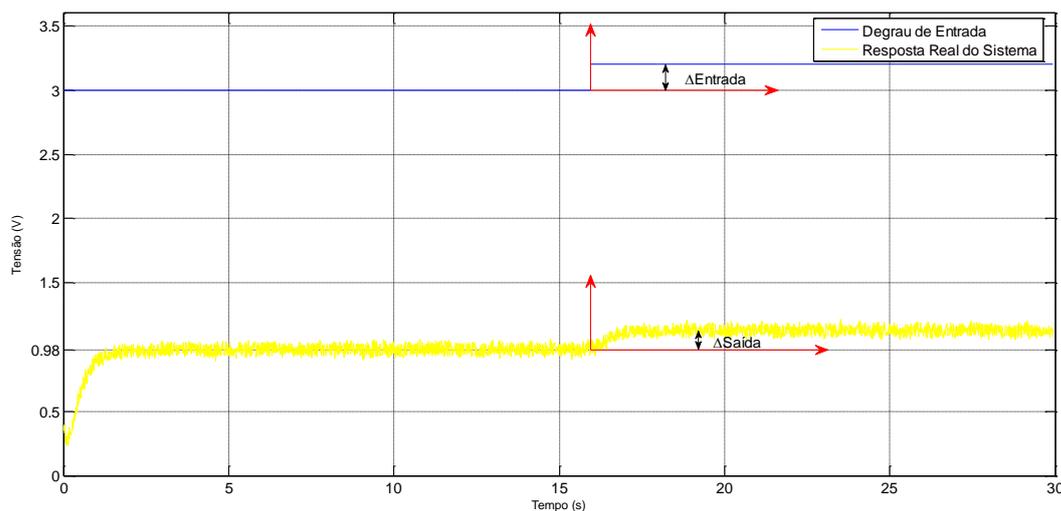


Figura 35 - Resposta ao degrau para o processo de Pressão.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Assim como no processo de vazão, não é possível afirmar sobre a linearidade do sistema com essa primeira análise e por isso, um pequeno ganho na resposta real do sistema será inserido apenas para deixar mais evidente o comportamento do processo. Esta nova resposta é representada pela Figura 36.

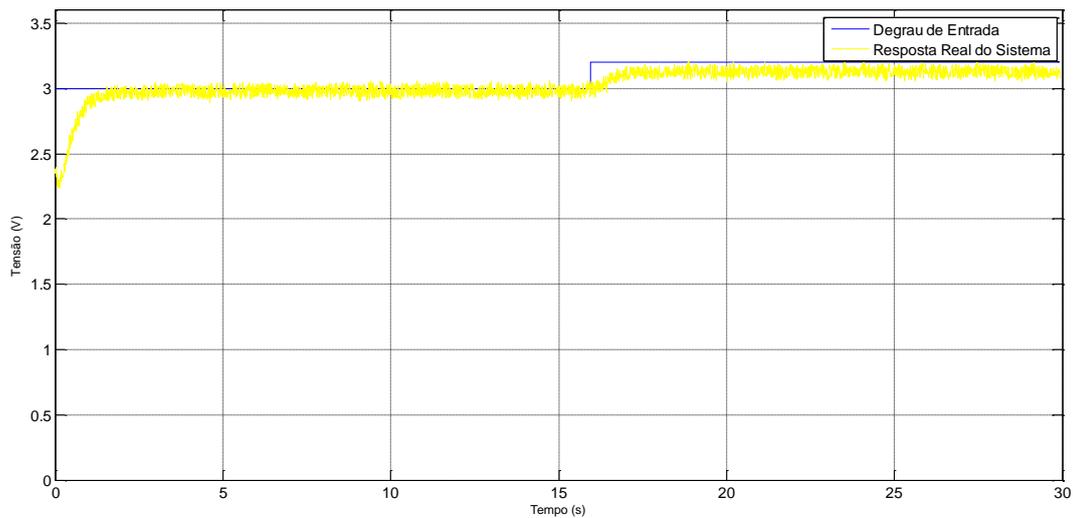


Figura 36 - Resposta ao degrau com um pequeno ganho na resposta real.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Apesar de se aproximar muito de um sistema linear, graficamente, é possível afirmar que para pequenas variações na entrada (0,2V) em torno de um ponto de operação escolhido (3V) a saída não acompanha à entrada. O sistema seria linear caso a resposta do sensor (amarelo) convergisse para 3,2V e ficasse sobreposto ao sinal de entrada (azul), da mesma maneira que acontece antes do pequeno acréscimo ao degrau de entrada.

Após a verificação da não linearidade, um modelo equivalente linear deverá ser obtido em torno do ponto de operação escolhido para pequenas variações na entrada. Para este processo, o ponto de operação foi de 3V para a entrada e 0,98V para a saída. A planta no intervalo entre 15,94 a 29,93s deverá ser obtida, pois nesse trecho tem-se a pequena variação de pressão para uma pequena variação na entrada e é onde o controle do processo deverá ser feito.

Com a ajuda do Matlab a resposta é manipulada e uma análise apenas do trecho desejado em torno do ponto de operação poderá ser feita, no caso, dentro dos eixos x e y vermelhos da Figura 35. A planta a ser obtida deverá manter o comportamento da resposta da Figura 37.

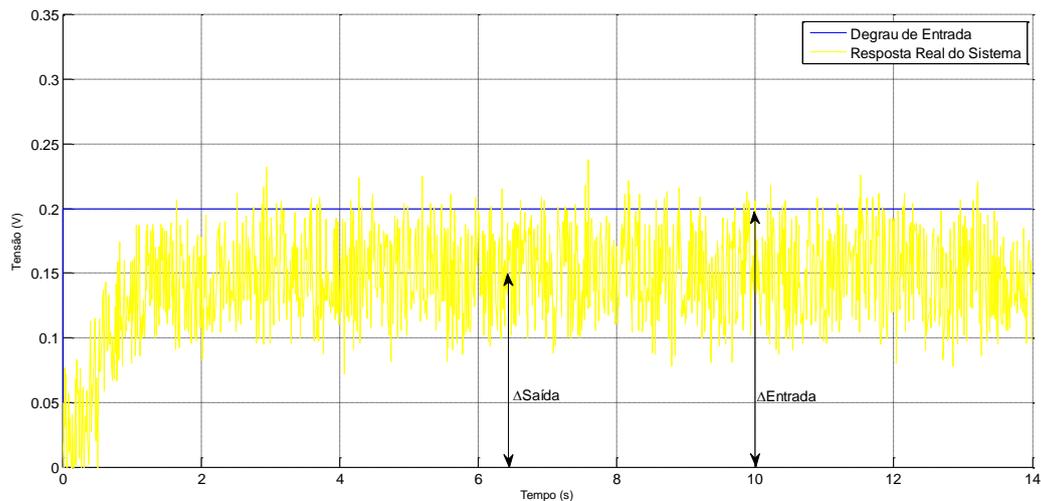


Figura 37 - Resposta deslocada do processo de Pressão.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Com o trecho necessário deslocado para o ponto 0, a resposta será analisada como se fosse para uma entrada de 0,2V. Com os dados de entrada e saída, pode-se dizer que o sistema se aproxima de um sistema de 2ª ordem superamortecido e a seguinte função de transferência é obtida.

$$\frac{\Delta Saída}{\Delta Entrada} = \frac{9,62}{s^2 + 7,447s + 12,83} \quad (19)$$

Com a planta obtida, um degrau de 0,2 é aplicado na mesma e, após sobrepor o resultado na Figura 37, a Figura 38 é obtida.

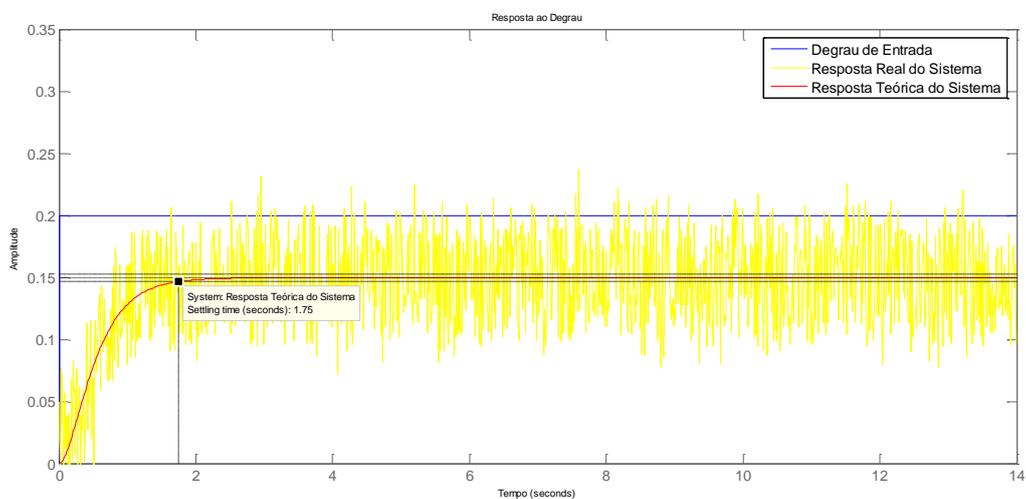


Figura 38 - Comparação da Resposta Real e Teórica para uma mesma entrada.

Fonte: Aatoria Própria (2014).

A resposta do modelo se mostrou novamente muito semelhante ao comportamento do sistema real, portanto, o processo de pressão poderá ser controlado para alguma especificação desejada através de simulações na curva teórica.

Como se trata de um sistema de segunda ordem, um controlador PID seria o mais apropriado, entretanto, com o alto índice de ruído do processo, optou-se novamente por um PI. Utilizando o diagrama da Figura 21, primeiramente é realizado o ajuste dos ganhos do controlador PI e uma referência é pré-estabelecida situada no ponto de operação (0,98V). No gráfico presente no diagrama é observado o comportamento do sistema e, assim que o estado em regime for constatado, o botão de gravação de dados é pressionado. Um pequeno acréscimo (0,15V) é inserido na referência automaticamente no momento em que a gravação é iniciada, sendo este ajustado previamente em “Delta_SP”. A Figura 39 contém a resposta obtida.

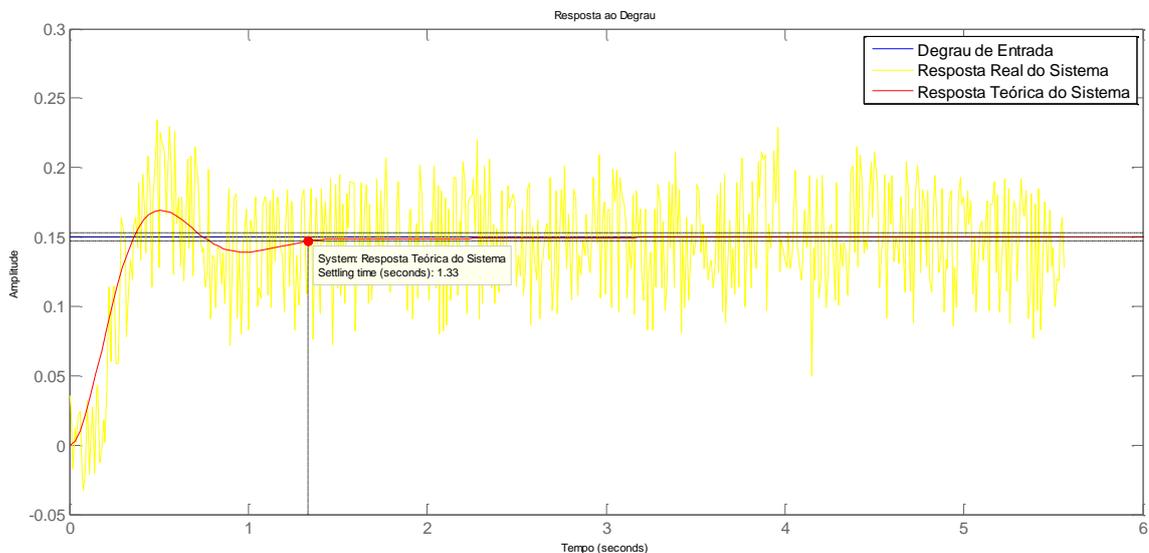


Figura 39 - Comparação da Resposta Real e Teórica compensadas com o controlador PI.
Fonte: Aatoria Própria (2014).

Outros controladores foram projetados para diferentes tipos de aplicações assim como nos outros processos. O controlador demonstrado acima diminui o tempo de assentamento e corrige o erro de regime permanente. O percentual de ultrapassagem %UP é muito baixo, quase imperceptível, tornando o sistema rápido e eficaz.

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR PID

No software utilizado para programação do sistema supervisor, o LabVIEW, há um bloco de controlador PID pronto, fazendo-se necessário apenas a escolha dos valores dos parâmetros para controle dos processos. Porém, quando testado, foi observado que o bloco PID tem um tempo de amostragem interna e, quando colocado em um *while loop* externo presente na programação utilizada, entrava em conflito e gerava sinais com tempos de amostragem diferentes.

Por esse problema, a solução foi desenvolver a programação de um controlador PID seguindo a teoria básica de controle.

Sabendo que:

$$u(t) = e(t)K_p + K_i \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

Para implementação do controlador, a discretização deverá ser feita a fim de obter uma equação possível de ser representada pelo software LabVIEW. A discretização da integral ($e(t) dt$) está dada por:

$$Int[k] = Int[k-1] + e[k]Ts \quad (21)$$

$$Int[k] - Int[k-1] = e[k]Ts \quad (22)$$

Agora possuímos variáveis em função da integral do erro em relação ao tempo Int e do tempo de amostragem T_s . Por outro lado:

$$u[k] = K_p.e[k] + K_i.Int[k] + K_D \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \quad (23)$$

$$u[k-1] = K_p.e[k-1] + K_i.Int[k-1] + K_D \frac{e[k-1] - e[k-2]}{T_s} \quad (24)$$

Subtraindo (24) de (23):

$$u[k] - u[k-1] = K_p(e[k] - e[k-1]) + K_i(Int[k] - Int[k-1]) + K_D \left(\frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} - \frac{e[k-1] - e[k-2]}{T_s} \right) \quad (25)$$

Podendo agora substituir a equação (22) na equação (25):

$$u[k] = u[k-1] + K_p.e[k] - K_p.e[k-1] + K_i.e[k]Ts + \frac{K_D}{T_s} e[k] - 2 \frac{K_D}{T_s} e[k-1] + \frac{K_D}{T_s} e[k-2] \quad (26)$$

E chegando finalmente na equação final utilizada para montagem do controlador:

$$\rightarrow u[k] = u[k-1] + (K_p + K_iTs + \frac{K_D}{T_s})e[k] - (K_p + 2 \frac{K_D}{T_s})e[k-1] + \frac{K_D}{T_s}.e[k-2] \quad (27)$$

Com a equação do controlador PID discretizada, a programação foi desenvolvida em linguagem LabVIEW, como mostra a Figura 40.

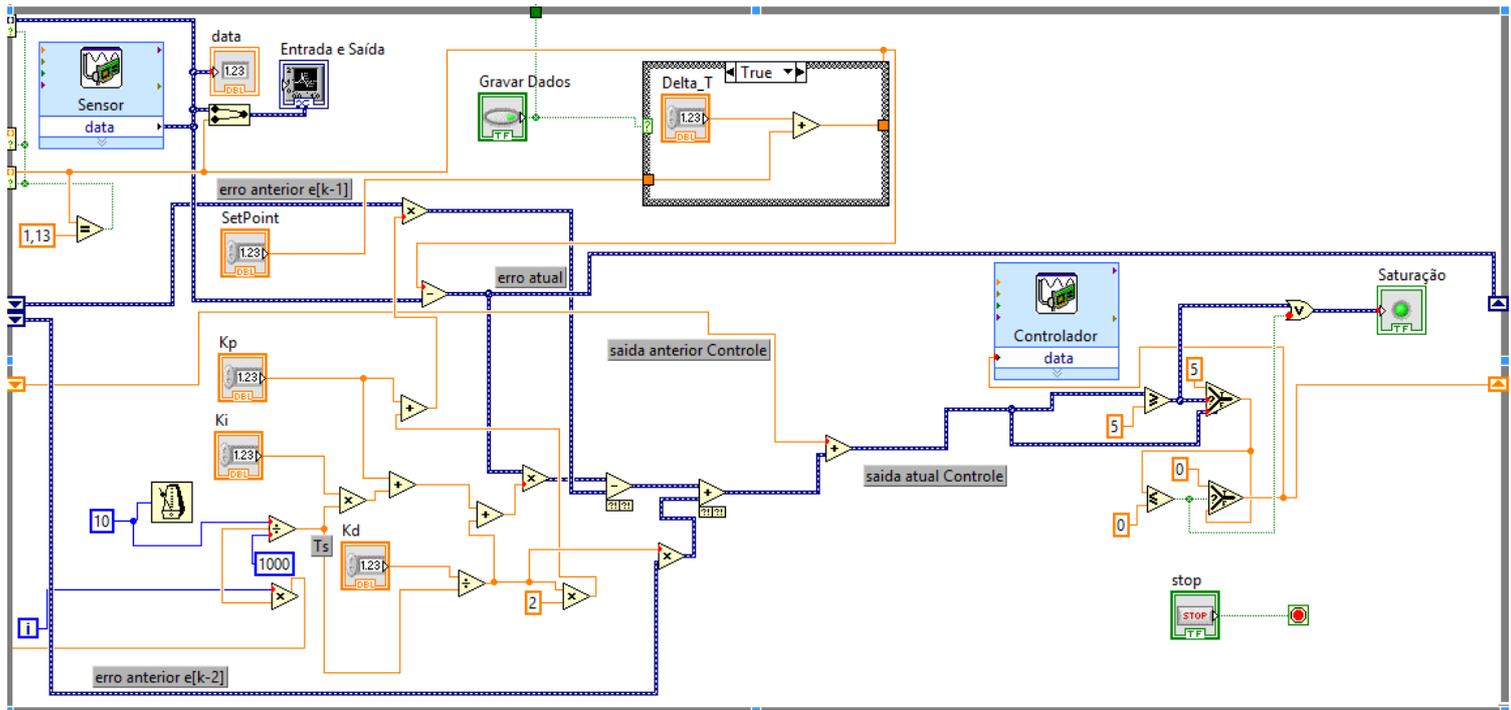


Figura 40 - Controlador PID desenvolvido em linguagem LabVIEW.
Fonte: Autoria Própria (2014).

A programação ficou intuitiva e de fácil compreensão se comparada com a equação (27). Outro ponto que deve ser lembrado é de que o sistema possui uma saturação na saída atual do controle que varia entre 0 e 5V, o que facilita e limita a tensão que virá a ser trabalhada.

3.5 RESULTADOS OBTIDOS

Analisando todos os sinais obtidos após o término do trabalho é verificado que a resposta do processo de nível apresenta uma melhor qualidade em relação aos processos de pressão e vazão. Isso se dá pela velocidade da resposta do processo, que é muito mais lenta em relação às outras. Porém, os três sistemas demonstram fidelidade ao sistema real, podendo ser controlados por um controlador PI desenvolvido no software LabVIEW.

O processo de pressão está agora pronto para uso e reconicionado para o nível de água que foi ajustado no tanque do sistema.

Em relação ao software supervisorio, as metas traçadas foram alcançadas. Os processos podem ser agora manipulados e analisados, e os seus sinais armazenados a partir do momento que o usuário decidir. Com os controladores criados é possível obter respostas mais rápidas ou mais lentas, com uma qualidade melhorada pelo software supervisorio. O supervisorio opera com segurança, sem riscos de queimar a placa de aquisição de dados. É possível trabalhar, em relação a *Setpoints*, com a variável do processo, sendo elas nível, vazão ou pressão.

Em cada interface criada para ser manipulada pelo usuário, uma página introdutória foi criada para lembrar o operador de instruções básicas do uso da bancada, além de dar uma visão geral de cada processo. Na Figura 41, está ilustrada a página introdutória do processo de nível, lembrando que nos outros processos ela segue o mesmo padrão.

Page 1 | Page 2



Sistema Supervisorio para o Processo de Nível

Visão Geral: Este exemplo demonstra o comportamento do processo de nível presente na bancada didática de controle na sala I008. Além de poder controlar o comportamento do nível, é possível também realizar a gravação do sinal obtido, emitido e o tempo de simulação.

Requerimentos: LabVIEW e DAQmx

Instruções:

1. Verifique se ligou corretamente os cabos de sensor e de acionamento na placa de aquisição de dados.
2. Escolha os controladores desejados e sete-os antes de rodar a VI.
3. Trabalhe sempre com a tensão numa faixa de 0 a 5 volts, ou dentro dos limites do processo.
4. Escolha o Setpoint desejado e faça a variação a vontade.

Figura 41 - Aba introdutória do software supervisorio (Processo de Nível).
Fonte: Autoria Própria (2014).

Na página 2 está uma interface de fácil entendimento para o operador. Nela estão presentes dados a serem escolhidos, como os valores do controlador e de referência. O botão de gravação pode ser pressionado pelo usuário a qualquer momento, e quando for, realizará a gravação dos dados de tempo de simulação, degrau de entrada e resposta real do sistema. Um gráfico demonstra em tempo real os sinais de entrada e saída, deixando assim o usuário ciente do momento em que o sistema entrar em regime. E em caso de saturação, um LED informará todas as vezes do ocorrido. As páginas 2 dos processos de nível, vazão e pressão estão representadas respectivamente pelas Figuras 42, 43 e 44.

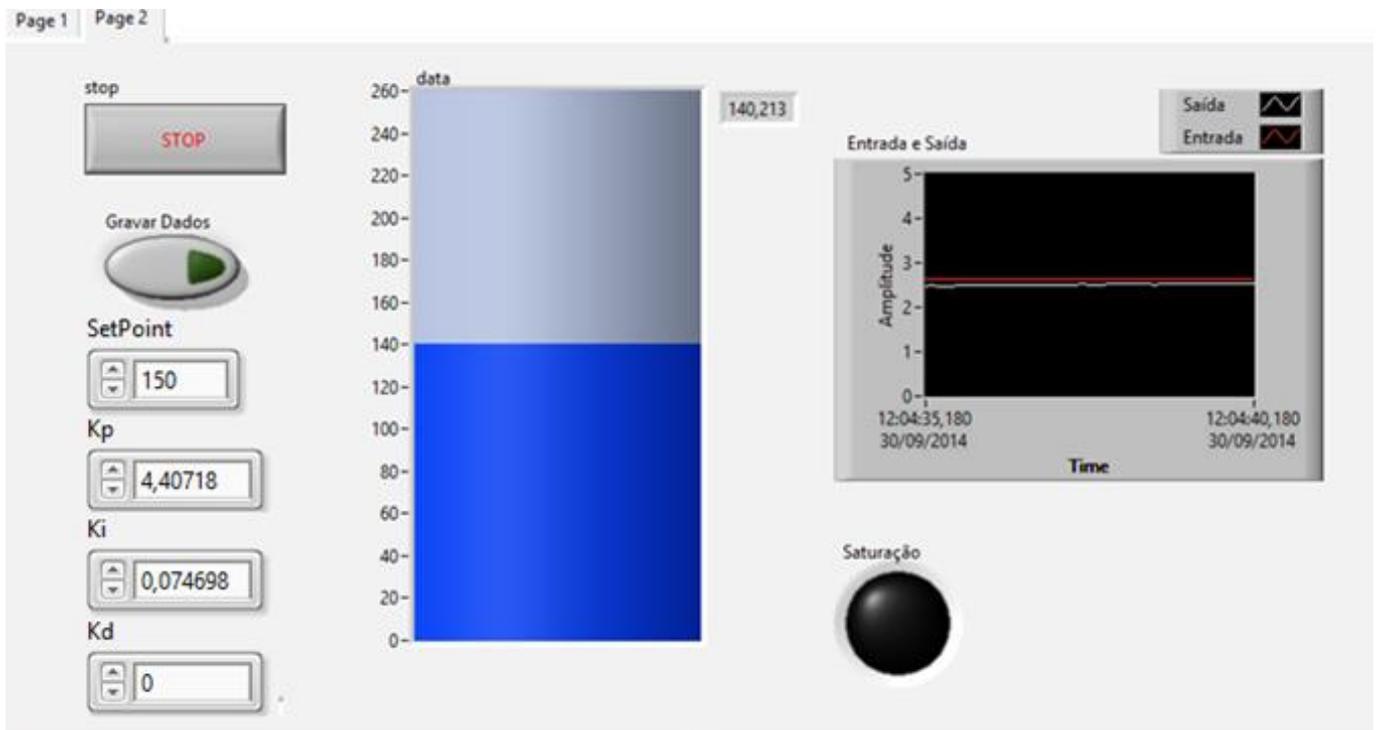


Figura 42 - Aba de manipulação supervisória do processo de Nível.
Fonte: Aatoria Própria (2014).

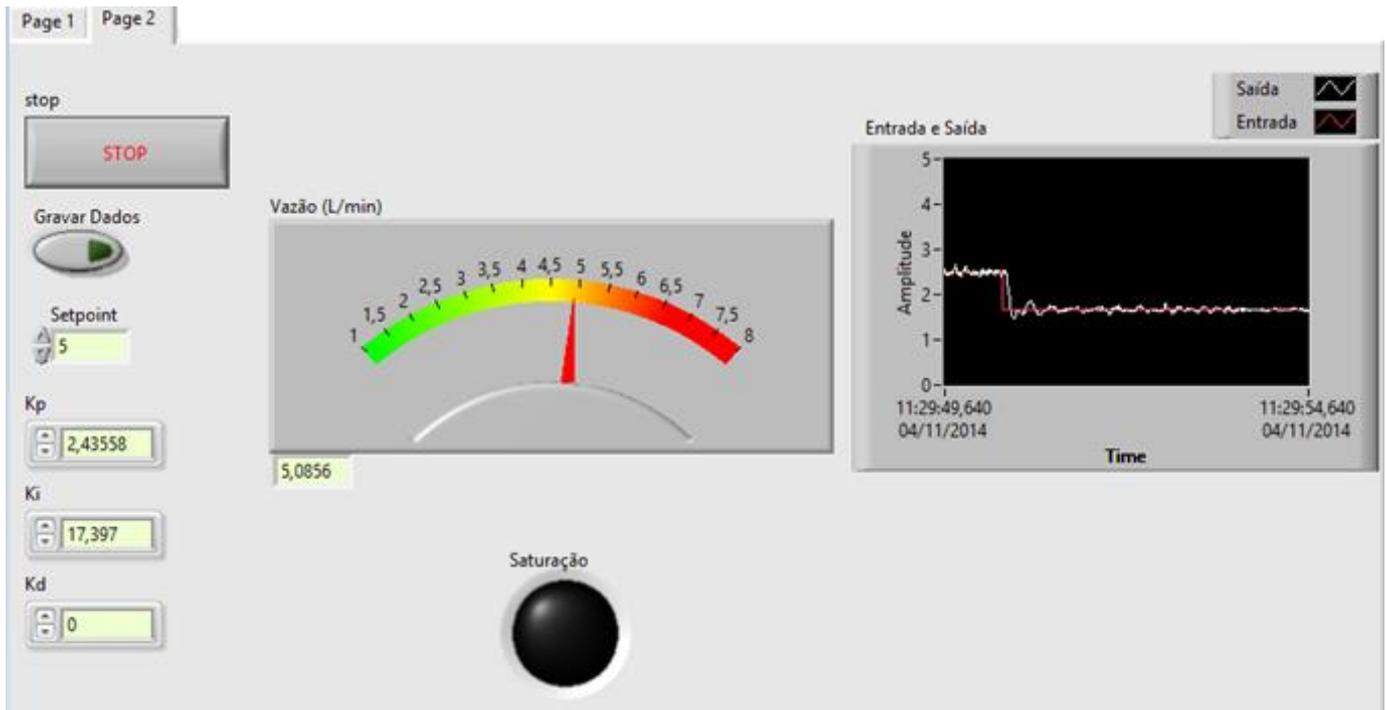


Figura 43 - Aba de manipulação supervisória do processo de Vazão.
Fonte: Autoria Própria (2014).

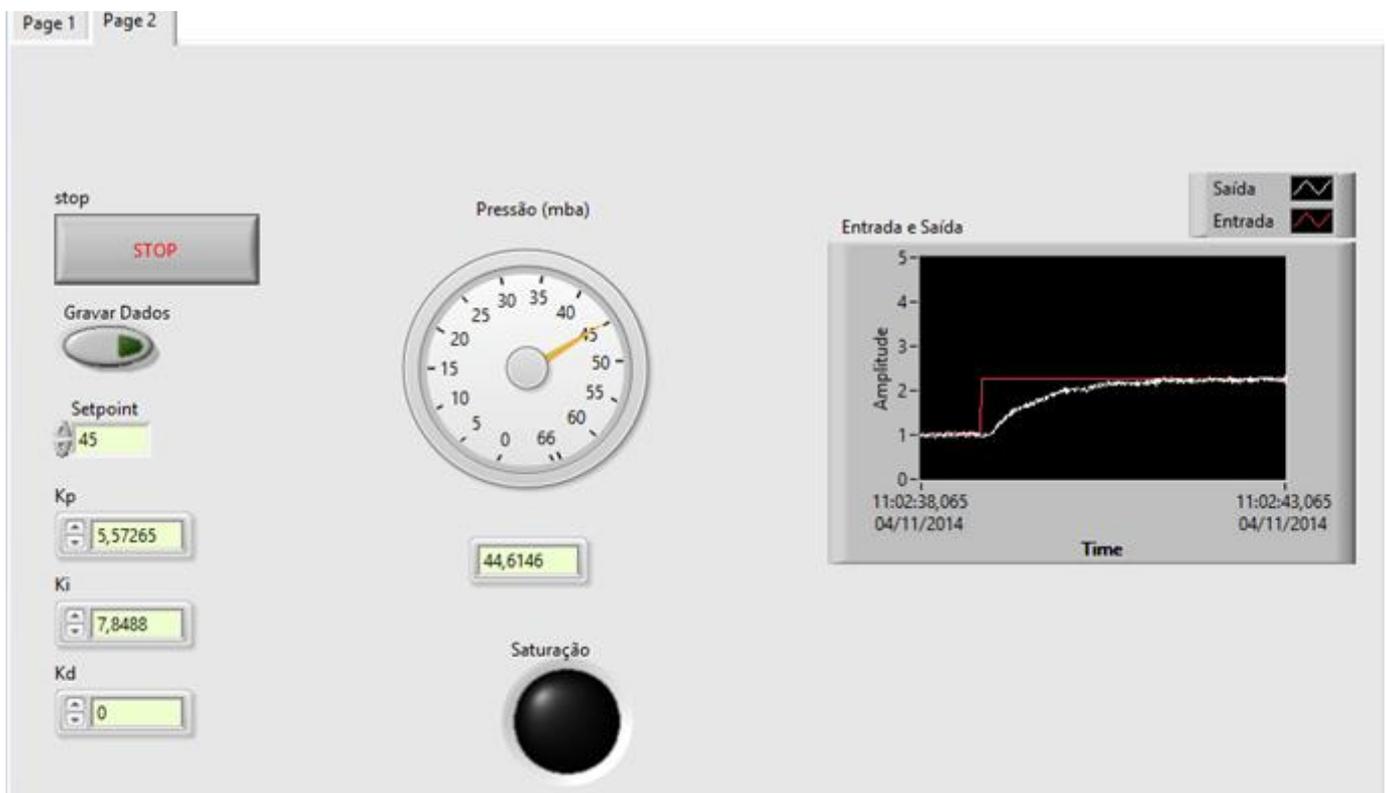


Figura 44 - Aba de manipulação supervisória do processo de Pressão.
Fonte: Autoria Própria (2014).

4. CONCLUSÕES

O recondicionamento da bancada de pressão foi realizado com sucesso, assim como as interfaces supervisórias que foram elaboradas para cada processo em particular. Uma vez que os processos se encontravam reconicionados, foi possível realizar uma análise a fim de obter uma modelagem no domínio da frequência para cada sistema. Porém, para isso, a linearidade dos sistemas deveria ser estabelecida em um primeiro momento, pois em caso de linearidade ou não linearidade, mudaria as análises e ações que seriam tomadas em seguida. Como observado no trabalho, os três processos trataram de caso de não linearidade, tornando assim uma aproximação linear em torno de um ponto de operação necessária. Lembrando que as plantas obtidas são válidas apenas para os pontos de operação estabelecidos no trabalho.

Com as funções de transferência demonstrando uma fidelidade à planta real dos processos, especificações de desempenho desejadas foram definidas, como: tempo de subida, tempo de assentamento, valor de ultrapassagem etc. Fazendo utilização da teoria básica de controle, projetos de controladores foram elaborados e aplicados na malha teórica e, caso o resultado fosse satisfatório, a planta real poderia ser manipulada. Devido aos ruídos de alta frequência presente nas medições, foi utilizado apenas o controlador PI, tanto para o sistema de primeira ordem quanto para os de segunda ordem. O código fonte desenvolvido no Matlab foi o responsável por todas as figuras simuladas e comparadas, além de conter outros controladores elaborados e não demonstrados neste trabalho.

Os softwares para a supervisão e controle da planta foram desenvolvidos e implementados e tiveram desempenho satisfatório comprovado através dos ensaios realizados ao longo do trabalho. A linguagem de programação em LabVIEW ficou intuitiva, prática e segura para futuros usuários, além de melhorar a qualidade dos sinais obtidos da bancada e ter a opção de armazenamento de informações desejadas. Durante o trabalho algumas dificuldades foram encontradas. O sistema supervisório foi a etapa do projeto que levou mais tempo, pois ele foi elaborado aos poucos desde o início do trabalho.

Por fim, o trabalho foi completado com sucesso, atingindo todos os objetivos traçados. Juntando-o com o trabalho de recondicionamento dos processos

de nível e vazão, realizado anteriormente, a universidade economizou por não ter de terceirizar o serviço e os alunos ganharam em aprendizado e desenvolvimento de um projeto tão abrangente como este. Além disso, o trabalho tornou possível práticas laboratoriais através da utilização da bancada didática de processos, o que auxiliará os futuros acadêmicos com a metodologia teórica aplicada em sala de aula.

Fica como sugestão para trabalhos futuros a implementação de outros tipos e técnicas de controladores para os processos, visto que para esse trabalho foi utilizado apenas o controlador PI no domínio da frequência. Também poderá ser realizados estudos em cima do comportamento dos processos, podendo sempre melhorar alguma especificação de desempenho. Por fim, um controle adaptativo para variações bruscas na referência também é uma sugestão para trabalhos futuros.

5. REFERÊNCIAS

BAYER, Fernando M.; ARAÚJO, Olinto C. B. **Controle Automático de Processos**. Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de Controle Modernos**. 11^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. Único, 2009.

FESTO. Festo Brasil Ltda. **Site da Festo**, 2010. Disponível em: <<http://www.festo-didactic.com/br-pt/>>. Acesso em: 09 Abril 2014.

FREITAS, Carlos M. Controle PID em sistemas embarcados. **Embarcados**, 2014. Disponível em: <<http://www.embarcados.com.br/controle-pid-em-sistemas-embarcados/>>. Acesso em: 30 Outubro 2014.

GARCIA, Claudio. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. 2^a. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

LLK ENGENHARIA E COMÉRCIO LTDA. **Site da LLK Engenharia e Comércio Ltda**, 2010. Disponível em: <[http://www.llk.com.br/pt/produtos/llk/BDS+\(Bancadas+Did%E1ticas\)](http://www.llk.com.br/pt/produtos/llk/BDS+(Bancadas+Did%E1ticas))>. Acesso em: 22 Abril 2014.

LOPES, Marco A. M. **A importância dos sistemas supervisórios no controle de processos industriais**. 2009. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

LUZZATO, Charlan S. **Recondicionamento de uma Bancada Didática de Nível e Vazão para Ensino da Teoria de Controle Experimental**. 2014. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

NATIONAL INSTRUMENTS. <http://www.ni.com/>. Disponível em: <<http://www.ni.com/gettingstarted/labviewbasics/pt/>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

NISE, Norman S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 5^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5^a. ed. São Paulo: Pearson Education, v. I, 2010.

PEREIRA, Luis F. A.; HAFFNER, José F.; CHAVES, Luciano F. **Aula 8 - Modelagem Não-Paramétrica de Processos Industriais**. Disponível em: <<http://www.feng.pucrs.br/~gacs/new/disciplinas/ci/apostilas/Aula08.pdf>>. Acesso em: 03 Outubro 2014.

RIBEIRO, Marco A. **Automação Industrial**. 4ª. ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 2001.

SILVA, Ana P.; SALVADOR, Marcelo. **O que são sistemas supervisórios?** 2005.[s.n.], 2005.

SILVEIRA, Paulo R.; SANTOS, Winderson E. **Automação e Controle Discreto**. 6ª. ed. São Paulo: Érica Ltda, v. Único, 2004.

SOUZA, André E. B.; BATISTA, Fernanda R.; LIMA, Marcos S. P. **Desenvolvimento de um Sistema Supervisório e de Controle para Planta Piloto de Escoamento Multifásico**. 2013.Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.