

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA**

**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CHARLAN SMANIOTTO LUZZATTO**

**RECONDICIONAMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE NÍVEL E  
VAZÃO PARA ENSINO DA TEORIA DE CONTROLE EXPERIMENTAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2014**

CHARLAN SMANIOTTO LUZZATTO

**RECONDICIONAMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE NÍVEL E  
VAZÃO PARA ENSINO DA TEORIA DE CONTROLE EXPERIMENTAL**

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

Orientador: Prof. Dr. César R. Claire Torrico

PATO BRANCO

2014

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **RECONDICIONAMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE NÍVEL E VAZÃO PARA ENSINO DA TEORIA DE CONTROLE EXPERIMENTAL**, do aluno **CHARLAN SMANIOTTO LUZZATTO** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **28** de 2014.

Fizeram parte da banca os professores:

**Emerson Giovani Carati**

**Fábio Luiz Bertotti**

**César Rafael Claire Torrico**

## DEDICATÓRIA

À Getulio, Solange, Meirinéia e Élquier, que conduziram e incentivaram minha educação formal, dando todo o suporte necessário para a conclusão deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. César Claire Torrico pela sugestão de tema e pela excelente orientação do trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela disponibilização de material e laboratórios para a realização do trabalho.

Aos colegas de graduação pelo apoio e companheirismo, em especial à, Felipe Zukovski, Jonas Santin, Rafael Zamodzki e Valderi Junot Babinski.

À Deus por me dar a graça de conseguir terminar este trabalho.

## RESUMO

LUZZATTO, Charlan S. **Recondicionamento de uma bancada didática de nível e vazão para ensino da teoria de controle experimental**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

Este trabalho tem por finalidade a aplicação da teoria de controle em uma bancada didática de nível e vazão para a realização de laboratórios experimentais. Será discutido nesta proposta as formas de condicionamento de sinais para aquisição dos sinais provenientes dos sensores de nível e vazão e também para o acionamento dos atuadores. 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. É apresentado ainda um estudo sobre as ações básicas de controle, estabelecendo-se a forma de atuação de cada ação em relação à estabilidade, ao período transitório e ao erro em regime permanente. Por fim, as principais metodologias para projeto de controladores e suas características (vantagens e desvantagens) são apresentadas.

**Palavras-chave:** Sistemas de Controle. Bancada didática de nível e vazão. Modelagem de sistemas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito elétrico RLC no domínio do tempo.....	10
Figura 2 - Circuito RLC no domínio da frequência. ....	11
Figura 3 - Sistema fluídico de nível. ....	12
Figura 4 - Exemplos de não linearidades. ....	15
Figura 5 - Respostas transitória, estacionária e erro em regime permanente.....	16
Figura 6 - Sinal de controle proporcional e erro atuante. ....	17
Figura 7 - Representação em blocos de uma ação de controle proporcional. ....	18
Figura 8 - Ação de controle integral e erro atuante. ....	18
Figura 9 - Representação em blocos de uma ação de controle integral. ....	19
Figura 10 - Representação em blocos de uma ação de controle proporcional e integral. ....	19
Figura 11 - Ação de controle PI para uma entrada do tipo degrau.....	19
Figura 12 - Representação em blocos de uma ação de controle derivativa.....	20
Figura 13 - Ação de controle PD para uma entrada do tipo rampa. ....	20
Figura 14 - Exemplo mostrando um ponto de projeto possível através do ajuste do ganho (A) e um ponto de projeto desejado (B).....	23
Figura 15 - Representação em blocos da resposta em frequência de uma entrada senoidal.....	24
Figura 16 - Formas de onda do sinal de entrada e de saída.....	25
Figura 17 - Placa de aquisição de dados .....	27
Figura 18 - Bancada didática utilizada. ....	28
Figura 19 - Diagrama do processo de nível. ....	29
Figura 20 - Diagrama do processo de vazão.....	29
Figura 21 - Simulação para o condicionamento do sensor ultrassônico com 4mA. ...	31
Figura 22 - Simulação para o condicionamento do sensor ultrassônico com 20mA. ...	31
Figura 23 - Fluxo de sinal em diagrama de blocos do circuito para condicionamento do sensor.....	32
Figura 24 - Circuito de condicionamento para o processo de nível.....	32
Figura 25 - Circuito de condi-onamento para acionamento do atuador do processo de nível.....	33
Figura 26 - Circuito de condicionamento para o acionamento do atuador do processo de nível inserido na bancada.....	34

Figura 27 - Terminal analógico contido no módulo da bancada. ....	35
Figura 28 - Chaves on/off do módulo de controle de nível. ....	36
Figura 29 - Bornes para ligação com a placa de aquisição de dados. ....	37
Figura 30 - Diagrama de blocos do circuito condicionador para o sensor de vazão. ....	38
Figura 31 - Circuito para condicionamento do sensor de vazão inserido na bancada. .....	39
Figura 32 - Posição da válvula de nível para definição do ponto de operação. ....	40
Figura 33 - Diagrama de blocos no simulink para verificar a linearidade dos sistemas. .....	41
Figura 34 - Resposta ao degrau para o processo de nível.....	42
Figura 35 - Intervalo desejado para obtenção da função transferência.....	43
Figura 36 - Comparação entre resposta real e simulada para mesma entrada. ....	44
Figura 37 - Diagrama com controlador PI para obtenção da resposta controlada. ...	45
Figura 38 - Resposta à malha fechada com controlador PI para o processo de nível. .....	45
Figura 39 - Resposta real e simulada para o sistema de nível compensado. ....	46
Figura 40 - Posição da válvula de vazão para definição do ponto de operação. ....	47
Figura 41 - Resposta ao degrau para o processo de vazão.....	48
Figura 42 - Resposta ao degrau para o processo de vazão com ganho. ....	49
Figura 43 - Intervalo desejado para obtenção da função transferência.....	50
Figura 44 - Comparação entre resposta real e simulada para mesma entrada. ....	51
Figura 45 - Diagrama com controlador PI para obtenção da resposta controlada. ...	52
Figura 46 - Resposta à malha fechada com controlador PI para o processo de vazão. .....	52
Figura 47 - Resposta real e simulada para o sistema de vazão compensado. ....	53



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relações entre tensão-corrente, corrente-tensão e impedância no domínio da frequência para capacitores, resistores e indutores. ....	11
---	----

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	6
1.1. JUSTIFICATIVA .....	7
1.2. OBJETIVO GERAL .....	7
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	9
2.1. ACIONAMENTO E CONDICIONAMENTO DE SINAIS.....	9
2.2. MODELAGEM DE SISTEMAS.....	9
2.2.1. Modelagem fenomenológica.....	10
2.2.2. Modelagem experimental.....	14
2.2.3. Não linearidades em sistemas.....	14
2.3. CONTROLE DE SISTEMAS .....	16
2.3.1. Ações básicas de controle .....	17
2.3.2. Métodos de projeto de controladores.....	21
2.3.2.1. Lugar das raízes.....	22
2.3.2.2. Resposta em frequência.....	24
2.4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS NI USB-6009.....	26
<b>3. PROJETO DE RECONDICIONAMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE NÍVEL E VAZÃO</b> .....	28
3.1 SITUAÇÃO PRÉ-PROJETO DA BANCADA DIDÁTICA.....	28
3.2 SISTEMA DE ACIONAMENTO E CONDICIONAMENTO DE SINAIS DO PROCESSO DE NÍVEL.....	30
3.3 SISTEMA DE ACIONAMENTO E CONDICIONAMENTO DE SINAIS DO PROCESSO DE VAZÃO.....	37
3.4 LEVANTAMENTO DOS MODELOS MATEMÁTICOS E CONTROLE DOS PROCESSOS DE NÍVEL E VAZÃO.....	40
3.4.1 Processo de nível.....	40

3.4.2	Processo de vazão .....	46
3.5	RESULTADOS OBTIDOS.....	53
<b>4.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>55</b>
<b>5.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Uma bancada didática 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).

Dentre os diversos tipos de bancadas atualmente fabricados, tais como as de eletrônica de potência, sistemas de proteção, medidas elétricas, acionamentos, ou ainda de controle de velocidade de motores CA, neste trabalho será realizado o estudo sobre as bancadas didáticas de controle de processos. Neste tipo de bancada, objetiva-se controlar processos de vazão e nível.

As bancadas voltadas para as áreas de medidas, acionamentos e proteção, têm como principal fabricante a empresa WEG. Há 50 anos no mercado, este fabricante dispõe de uma bancada principal com diversos kits individuais que possibilitam a realização de experimentos práticos de eletrotécnica industrial, medidas elétricas e automação de processos industriais (WEG S.A., 2012).

Na área de processos industriais, destacam-se a Festo e a Didacta Italia. A Didacta Italia atua desde 1968, com sua sede na Itália, desenvolvendo equipamentos de treinamento compostos por componentes industriais, tornando as práticas mais próximas da realidade industrial (DIDACTA ITALIA, 2012). A Festo, por sua vez, atua desde 1925, com sua sede na Alemanha, estando presente em 167 países e possuindo equipamentos didáticos para instituições de ensino e centros de treinamentos nas áreas de eletroeletrônica, pneumática, hidráulica, entre outras (FESTO, 2012).

## 1.1. JUSTIFICATIVA

Atualmente, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Câmpus Pato Branco dispõe de uma bancada didática da marca Festo para controle de processos de nível, vazão, temperatura e pressão localizada no laboratório de controle. Esta bancada possui controladores defeituosos e bastante ultrapassados, fazendo com que a mesma não seja utilizada. O trabalho justifica-se pelo fato que isto representa um desperdício laboratorial muito grande, visto que as práticas que podem ser realizadas com o uso desta bancada proporcionariam aos alunos uma visão mais ampla sobre os processos industriais envolvidos. Por outro lado, o trabalho também justifica-se devido ao elevado custo orçado para recondicionamento proposto pela própria empresa FESTO, resultando num preço mais elevado do que uma bancada nova. Visando a melhoria do laboratório de controle, adquiriu-se dez placas de aquisição da National Instrument para interface com processos didáticos.

## 1.2. OBJETIVO GERAL

Recondicionar os processos de nível e vazão da bancada para ensino da teoria de controle experimental utilizando a placa de aquisição de dados, deixando-a, assim, em condições de uso com um baixo custo e boa exequibilidade.

## 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o condicionamento do sinal de sensores e projetar o sistema de acionamento dos atuadores;
- Obter modelos matemáticos dos processos a partir de ensaios realizados com a placa de aquisição de dados;
- Analisar as não linearidades dos sistemas. Havendo um alto grau de não linearidades, escolher um ponto de operação e, com isto, obter o modelo linear equivalente.

- Projetar um controlador com alguma das metodologias existentes para aplicação das ações de controle em malha fechada.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. ACIONAMENTO E CONDICIONAMENTO DE SINAIS

Quando realiza-se um estudo acerca de um determinado processo, é comum que seja necessário realizar medidas que indiquem o que está ocorrendo com este processo. Para efetuar estas medidas são utilizados sensores que, de acordo com o que está ocorrendo com o processo, fornecem um sinal elétrico proporcional. Como exemplo, pode-se citar um sensor ultrassônico utilizado para indicar o nível de líquido em um reservatório. Assim, quanto mais elevado estiver o nível no reservatório, maior será o sinal elétrico fornecido, seja ele de tensão, corrente, resistência, etc.

Entretanto, nem sempre a grandeza do sinal gerado por um sensor irá ser compatível com aquele que se deseja trabalhar, isto é, pode, por exemplo, haver situações onde o sensor fornece um sinal de corrente sendo que deseja-se trabalhar com um sinal de tensão. Assim, para que este sinal seja adequado, deve-se realizar o condicionamento do sinal. Contudo, além da conversão de grandezas exemplificada, outros métodos de condicionamento podem ser utilizados, tais como, amplificação de sinais, filtragem, isolamento e linearização (AZEVEDO e FREITAS, 2003).

### 2.2. MODELAGEM DE SISTEMAS

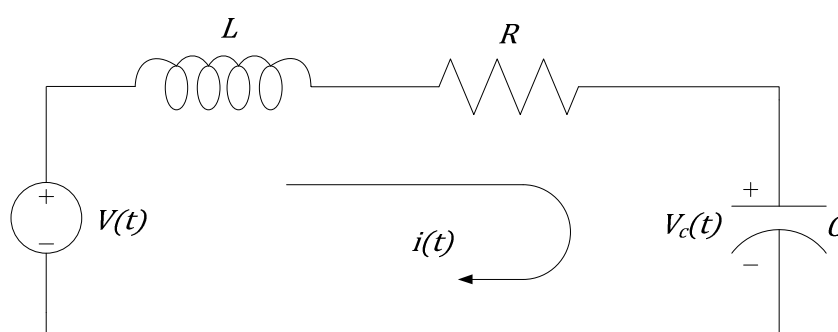
De acordo com Dorf e Bishop (2009), "modelos matemáticos de sistemas físicos são elementos chave no projeto e análise de sistemas de controle". Assim, com o intuito de estudar a dinâmica de um dado sistema, realiza-se a modelagem do mesmo. Para isso, deve-se analisar como as variáveis do sistema se relacionam e com isso obter um modelo matemático. Devido ao fato de os sistemas serem naturalmente dinâmicos, as equações que os descrevem são normalmente equações diferenciais. Além disso, caso estas equações possam ser linearizadas, o

método de solução pode ser simplificado através do uso da transformada de Laplace (DORF e BISHOP, 2009).

### 2.2.1. MODELAGEM FENOMENOLÓGICA

A partir de um determinado sistema físico, acerca do qual se deseja realizar um estudo, o desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevam este sistema pode ser feito por aplicação direta das leis básicas que envolvem o mesmo, independentemente de que este modelo seja definido para o domínio do tempo ou da frequência. Como exemplos para a modelagem de sistemas físicos, podem ser citados circuitos elétricos, sistemas mecânicos, sistemas fluídicos, entre outros (NISE, 2009).

Para modelar um circuito elétrico, devem ser utilizadas, inicialmente, as leis de Ohm e de Kirchhoff, que envolvem as leis básicas para circuitos elétricos. Se a modelagem for no domínio do tempo, o circuito deve ser representado neste domínio, vide Figura 1, e deve-se, então, fazer uso de equações diferenciais para descrever o comportamento de indutores e capacitores (OGATA, 1998).



**Figura 1 - Circuito elétrico RLC no domínio do tempo.**  
**Fonte: Adaptado de (NISE, 2009, p. 40).**

Por outro lado, na modelagem através de função de transferência, as indutâncias, capacitâncias e resistências devem ser convertidas para o domínio da frequência, considerando condições iniciais nulas (OGATA, 1998). A Tabela 1 estabelece as relações necessárias para que cada elemento seja representado no domínio do tempo ou da frequência.

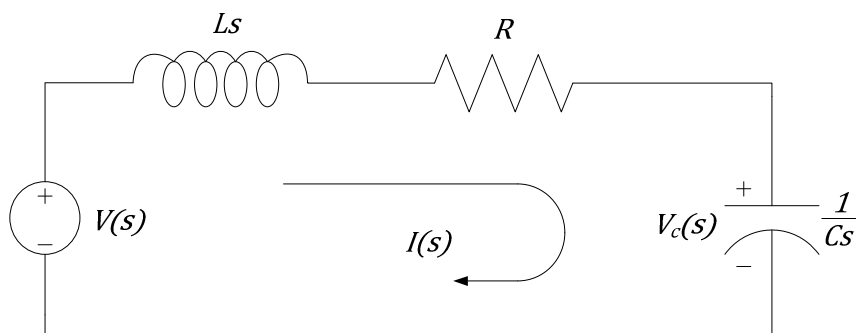


**Tabela 1 - Relações entre tensão-corrente, corrente-tensão e impedância no domínio da frequência para capacitores, resistores e indutores.**

Componente	Tensão-corrente	Corrente-tensão	Impedância $Z(s) = V(s)/I(s)$
Capacitor	$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau$	$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$	$\frac{1}{Cs}$
Resistor	$v(t) = Ri(t)$	$i(t) = \frac{1}{R} v(t)$	$R$
Indutor	$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$	$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v(\tau) d\tau$	$Ls$

Fonte: Adaptado de (NISE, 2009, p. 39).

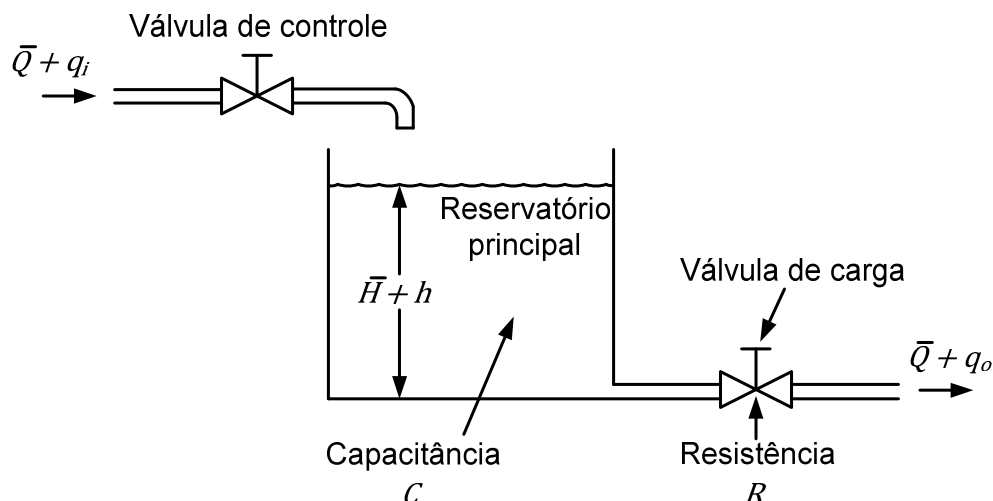
Após a conversão do domínio do tempo para o domínio da frequência, o novo circuito obtido, chamado de circuito transformado, torna a obtenção da função de transferência mais simples e direta, pois pode-se trabalhar somente com as impedâncias de cada elemento, conforme a Figura 2, e, assim, reduzir o circuito em uma única impedância (NISE, 2009).



**Figura 2 - Circuito RLC no domínio da frequência.**

Fonte: Adaptado de (NISE, 2009, p. 41).

Já na análise de sistemas fluídicos, podem haver duas situações quanto ao fluxo do escoamento: o fluxo laminar e o fluxo turbulento. O fluxo laminar, em geral, pode ser descrito por equações diferenciais lineares, enquanto que o fluxo turbulento, na maioria das vezes, só pode ser analisado por equações diferenciais não lineares e, tanto para um tipo de fluxo quanto para o outro, as características dinâmicas podem ser descritas fazendo-se um paralelo com os sistemas elétricos, utilizando os conceitos de resistência e capacitância (OGATA, 1998).



**Figura 3 - Sistema hidráulico de nível.**  
 Fonte - Adaptado de (OGATA, 1998, p. 77).

Analisando-se a Figura 3, nota-se a presença de uma válvula de carga como um componente intermediário entre dois reservatórios, sendo que o fluxo de saída do reservatório principal é controlado por esta válvula. Para Ogata (1998), "A resistência  $R$  ao fluxo de líquido nesta restrição é definida como a variação na diferença de nível [...] necessária para causar uma variação unitária na vazão". Esta definição é descrita de acordo com (1).

$$R = \frac{\text{Variação na diferença de nível, [m]}}{\text{Variação na vazão, [m}^3\text{/s]}} \quad (1)$$

Considerando-se que o fluxo através desta válvula de resistência  $R$  seja laminar, a relação entre a vazão de entrada através da válvula de controle e a altura do líquido no reservatório, ambos em regime permanente, pode ser feita conforme (2),

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

onde  $Q$  é o valor em regime permanente da vazão de líquido, em  $[m^3/s]$ ,  $K$  é um coeficiente inverso à  $R$ , em  $[m^2/s]$  e  $H$  é o valor em regime permanente do nível de líquido, em  $[m]$ .

Fazendo-se uma analogia à lei de Ohm para circuitos elétricos, onde a corrente é proporcional à diferença de potencial, isto é,  $V = RI$  ou  $I = GV$ , sendo

$G = 1/R$ , tem-se que  $Q$  é análogo a  $I$ ,  $K$  é análogo à  $G$  e  $H$  é análogo a  $V$ . Assim, obtém-se que  $R_l = H/Q$ , onde o subíndice  $l$  denota que esta equação é válida para o fluxo laminar. Caso o fluxo seja turbulento, o equacionamento fica determinado por (3), onde o coeficiente  $K$  é dado em  $[m^{2,5}/s]$  (OGATA, 1998).

$$Q = K\sqrt{H} \quad (3)$$

Para este caso, o valor da resistência fica determinado por  $R_t = 2H/Q$ , onde o subíndice  $t$  denota que esta equação é válida para o fluxo turbulento. Neste caso,  $R_t$  pode ser considerado constante para pequenas variações na altura do nível e do fluxo em torno de um ponto de operação (OGATA, 1998).

De acordo com Ogata (1998):

A capacitância  $C$  de um reservatório é definida como sendo a variação na quantidade de líquido armazenado necessária para causar uma variação unitária no potencial (altura do nível de líquido). (O potencial é a grandeza que indica o nível de energia do sistema).

Em termos equacionais, a capacitância do reservatório pode ser definida conforme (4).

$$C = \frac{\text{Variação no volume de líquido armazenado, [m}^3\text{]}}{\text{Variação no potencial, [m]}} \quad (4)$$

Assim, pode-se dizer que a capacitância é proporcional a área, dada em  $[m^2]$ , isto é, ela é constante qualquer que seja a altura do nível de líquido (OGATA, 1998).

Analisando-se o sistema no domínio da frequência para pequenas variações em torno das suas variáveis ( $q_i$ ,  $q_o$  e  $h$ ), dois modelos linearizados podem ser obtidos, dependendo de quais variáveis serão consideradas como saída,  $q_o$  ou  $h$ , visto que  $q_i$  é a única variável que pode ser considerada como entrada. Então, as funções de transferência para as saídas  $q_o$  e  $h$  ficam determinadas conforme (5) e (6), respectivamente (OGATA, 1998):

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (5)$$

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (6)$$

### 2.2.2. MODELAGEM EXPERIMENTAL

Para Nise (2009), "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". Assim, utilizando-se uma entrada de teste (degrau, rampa ou senoidal) adequada para o sistema e analisando-se a resposta do mesmo para essa entrada, pode-se obter a sua função de transferência geral mesmo sem saber a função de transferência de cada parte isolada do sistema (NISE, 2009). Deste modo, esta modelagem pode ser aplicada tanto para sistemas de primeira ordem quanto para sistemas de segunda ordem.

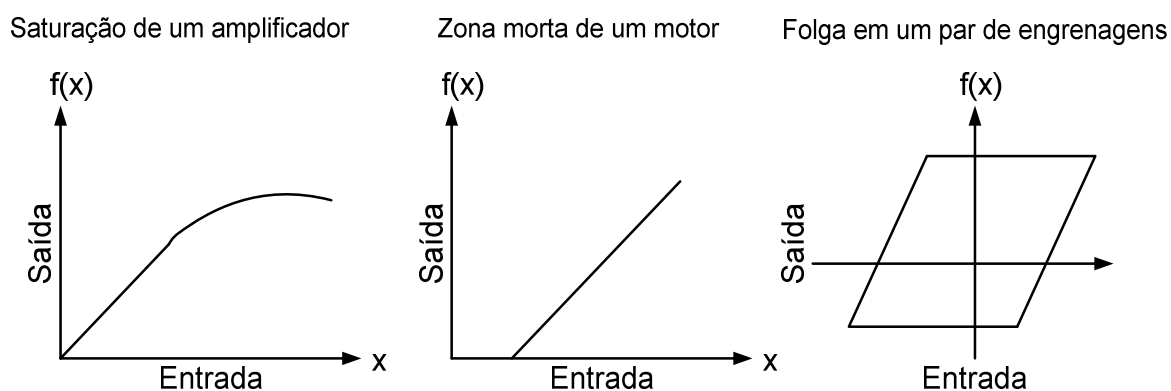
Para um sistema de primeira ordem, analisando, por exemplo, a resposta para uma entrada do tipo degrau, o modelo no domínio da frequência pode ser construído a partir de duas especificações: o ganho e a constante de tempo. A constante de tempo informa o período necessário para que o sistema atinja 63% de seu valor final, para uma resposta ao degrau. O ganho, por sua vez, é obtido a partir da resposta do sistema em regime permanente e da entrada. Em um sistema de segunda ordem que apresente uma resposta subamortecida o mesmo é válido, com a diferença de que para a determinação do modelo no domínio da frequência são necessários o máximo valor de ultrapassagem, o tempo de assentamento e o ganho (NISE, 2009).

### 2.2.3. NÃO LINEARIDADES EM SISTEMAS

Uma característica de sistemas lineares é que estes atendem às propriedades de superposição e homogeneidade. A primeira propriedade nos diz que se as entradas de um sistema forem somadas, a saída deste sistema deverá

apresentar a soma de cada resposta correspondente à sua entrada, ou seja, se uma entrada  $e_1(t)$  tem como resposta  $s_1(t)$ , e uma entrada  $e_2(t)$  tem como resposta  $s_2(t)$ , o sistema atenderá esta propriedade se, e somente se,  $e_1(t) + e_2(t)$  resultar em uma resposta  $s_1(t) + s_2(t)$ . Já a propriedade da homogeneidade relaciona a saída de um sistema com a entrada multiplicada por um escalar  $\alpha$ , ou seja, um sistema linear é homogêneo se, e somente se,  $\alpha e_1(t)$  resultar em uma saída  $\alpha s_1(t)$ . Assim, um sistema é dito não linear quando não satisfizer estas duas propriedades (NISE, 2009).

A Figura 4 exemplifica algumas não linearidades físicas encontradas em amplificadores, motores e engrenagens.

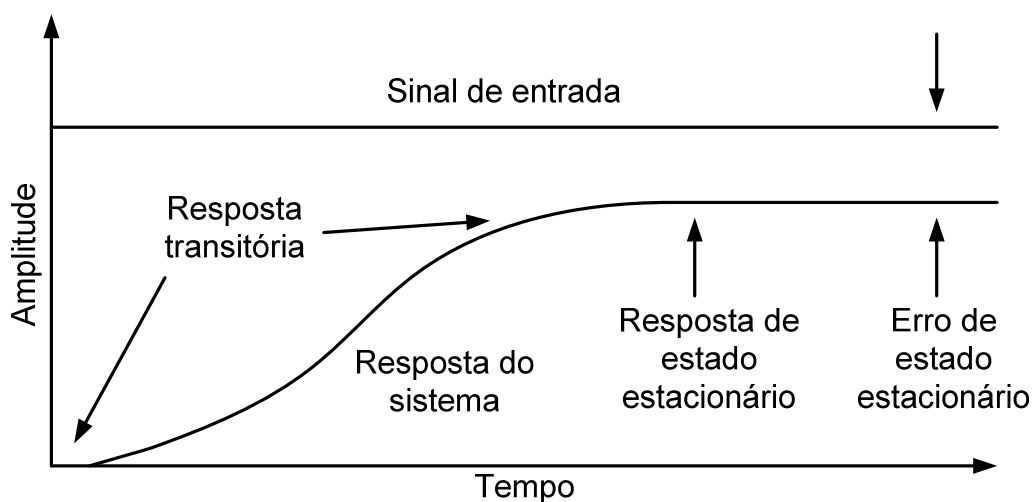


**Figura 4 - Exemplos de não linearidades.**  
**Fonte: Adaptado de (NISE, 2009, p. 72).**

Quando um sistema não é linear, sua função transferência não pode ser obtida diretamente. Antes disso, este sistema deve ser linearizado. Para isso, estabelece-se um ponto de operação para o sistema, também chamado ponto de equilíbrio. É em torno deste ponto de equilíbrio que o componente não linear do sistema deve atuar e que a equação diferencial deste componente deve ser linearizada. Após linearizada, aplica-se a transformada de Laplace na equação diferencial, relaciona-se a entrada com a saída do sistema e obtém-se a função transferência do mesmo (NISE, 2009).

### 2.3. CONTROLE DE SISTEMAS

Quando deseja-se controlar um sistema, objetiva-se que, a partir de uma entrada específica, a saída resulte em algo esperado, ou seja, que as especificações de desempenho sejam atendidas. As especificações mais notórias a serem obtidas são a resposta transitória, o erro em regime permanente e a estabilidade. A resposta em regime transitório diz respeito ao modo como o sistema se comporta desde o instante em que a entrada é aplicada até o instante em que o sistema entra em regime permanente. Entretanto, ao atingir o regime permanente, a resposta estacionária pode divergir em relação a um valor esperado. Esta divergência corresponde ao erro em regime estacionário, ou seja, é a diferença entre a entrada e a saída quando o tempo tende ao infinito. A estabilidade, por sua vez, é a especificação de maior importância do sistema, pois, se o sistema for instável, as outras especificações acabam tornando-se irrelevantes (NISE, 2009). A Figura 5 ilustra as situações abordadas.



**Figura 5 - Respostas transitória, estacionária e erro em regime permanente.**  
Fonte: Adaptado de (NISE, 2009, p. 2).

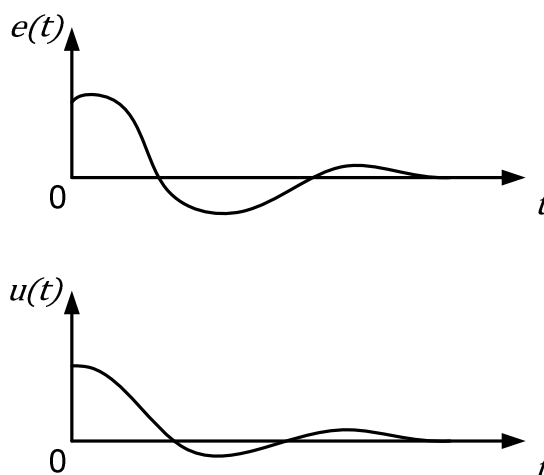
Então, com o intuito de melhorar o desempenho da resposta transitória, reduzir ou eliminar o erro em regime permanente e manter a estabilidade do sistema, são implementadas diferentes ações de controle, sendo que cada ação visa a melhoria de uma especificação. Assim, para melhorar diferentes especificações

simultaneamente, diferentes ações de controle devem atuar também simultaneamente.

### 2.3.1. AÇÕES BÁSICAS DE CONTROLE

Uma ação de controle representa a maneira pela qual um controlador produz o sinal de controle que irá diminuir a diferença entre a referência e a saída desejada a zero ou a um valor desprezível (OGATA, 1998). As principais e mais utilizadas são: ação de controle proporcional (P), ação de controle integral (I), ação de controle proporcional e integral (PI), ação de controle proporcional e derivativa (PD) e a ação de controle proporcional, integral e derivativa (PID).

A ação de controle proporcional se caracteriza por possuir uma relação direta entre a saída do controlador e o sinal de erro, ou seja, o erro só será nulo para um sinal de controle que também seja nulo, como ilustra a Figura 6 (OGATA, 1998).

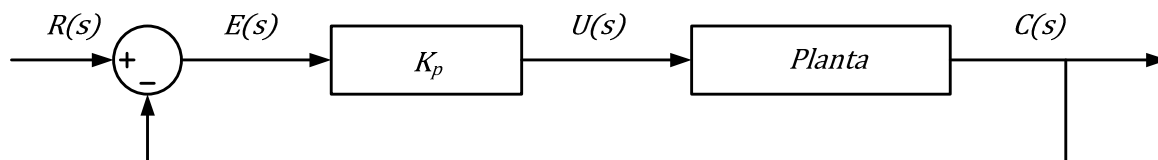


**Figura 6 - Sinal de controle proporcional e erro atuante.**

**Fonte: Adaptado de (OGATA, 1998, p. 183)**

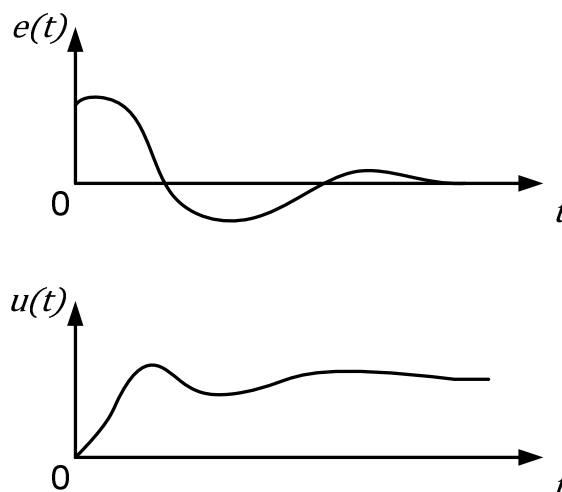
Esta relação direta entre o erro e sinal de controle causa uma diminuição na constante de tempo do sistema, tornando a resposta do sistema mais rápida. Em contrapartida, o *overshoot* do sistema aumenta e o erro pode ser diminuído, porém, não pode ser eliminado (DORF e BISHOP, 2009). A Figura 7 apresenta a representação desta ação de controle em um diagrama de blocos no domínio da

frequência,  $R(s)$  é a referência do sistema,  $E(s)$  é o erro atuante,  $U(s)$  é a ação de controle e  $C(s)$  é o sinal de saída.



**Figura 7 - Representação em blocos de uma ação de controle proporcional.**  
 Fonte: Adaptado de (OGATA, 1998).

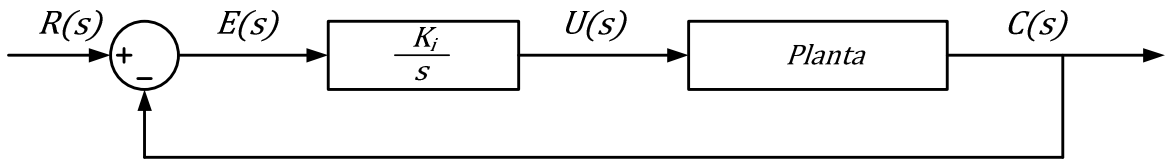
A ação de controle integral, por sua vez, insere um pólo na origem, aumentando o tipo do sistema em uma unidade, com o objetivo de reduzir o erro em regime estacionário (NISE, 2009). Assim, com esta ação de controle, o sinal do controlador  $u(t)$  está diretamente relacionado à área sob o sinal do erro  $e(t)$ , para qualquer instante de tempo. Assim, ao contrário da ação proporcional, a ação integral pode possuir um valor não nulo mesmo que o erro seja nulo, conforme mostra a Figura 8 (OGATA, 1998).



**Figura 8 - Ação de controle integral e erro atuante.**  
 Fonte: Adaptado de (OGATA, 1998, p. 183).

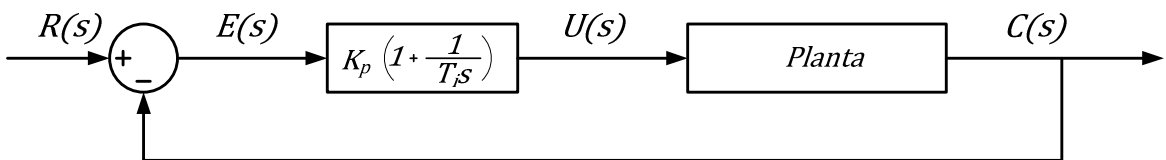
Desse modo, o sinal do controlador pode ser determinado pela integral do erro, visto que o primeiro sinal varia proporcionalmente à uma taxa em relação ao segundo (OGATA, 1998). A representação em diagrama de blocos é dada na Figura 9, onde  $K_i$  representa o ganho integral.





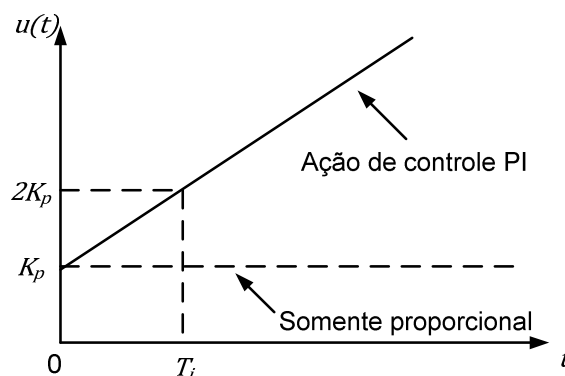
**Figura 9 - Representação em blocos de uma ação de controle integral.**  
 Fonte: Adaptado de (OGATA, 1998).

Utilizando-se estas duas ações de controle em conjunto, obtém-se a ação de controle PI. Neste caso a ação proporcional  $K_p$  também irá influenciar na ação integral, sendo esta ajustada por um tempo integral  $T_i$ , conforme ilustra a Figura 10 (OGATA, 1998).



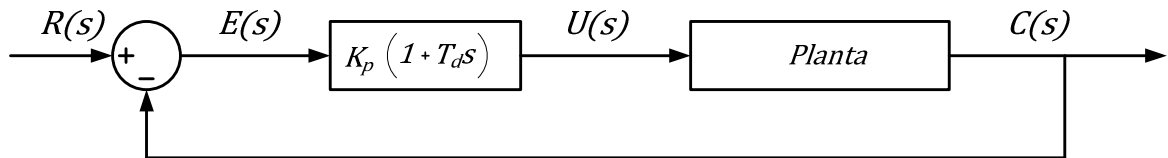
**Figura 10 - Representação em blocos de uma ação de controle proporcional e integral.**  
 Fonte: Adaptado de (OGATA, 1998).

De acordo com Ogata (1998), "o inverso do tempo integral  $T_i$  é denominado taxa de restabelecimento. A taxa de restabelecimento é o número de vezes por minuto que a parte proporcional da ação de controle é duplicada". A Figura 11 exemplifica a taxa de restabelecimento, bem como a ação integral para uma entrada do tipo degrau.



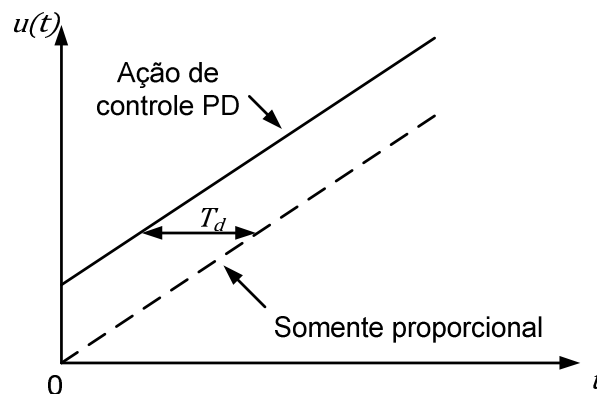
**Figura 11 - Ação de controle PI para uma entrada do tipo degrau.**  
 Fonte: Adaptado de (OGATA, 1998, p. 181).

Já um controlador PD, combina as ações proporcional e derivativa para determinar o sinal de controle  $u(t)$  em função do sinal de erro  $e(t)$ . A Figura 12 mostra o diagrama de blocos para esta ação de controle, sendo utilizada a mesma representação que a ação PI, isto é, a representação acadêmica.



**Figura 12 - Representação em blocos de uma ação de controle derivativa.**  
 Fonte: Adaptado de (OGATA, 1998).

A parcela derivativa é composta por um tempo  $T_d$  que possui uma característica antecipatória no período transitório, conforme ilustra a Figura 13.



**Figura 13 - Ação de controle PD para uma entrada do tipo rampa.**  
 Fonte: Adaptado de (OGATA, 1998, p. 182).

Assim, esta característica antecipatória da ação de controle derivativa atua no período transitório do sistema, adiantando-se em relação à ação de controle proporcional. Desse modo, a ação derivativa, apesar de não atuar diretamente sobre o erro em regime permanente, realiza a inserção de amortecimento no sistema, tornando possível a utilização de um ganho maior, aprimorando a precisão do sistema em regime estacionário. Sendo assim, a ação derivativa nunca deve ser utilizada isoladamente, pois não atua sobre o erro, mas sim, sobre uma taxa de sua variação (OGATA, 1998).

A combinação das três ações de controle abordadas até então, resulta na ação de controle PID (proporcional, integral e derivativa). A vantagem desta ação de controle é dada pela soma das vantagens individuais de cada uma das ações. Como a ação PI visa a melhoria em regime permanente e a ação PD visa a melhoria em regime transitório, com a ação PID a melhoria do sistema se dá em ambos os aspectos (DORF e BISHOP, 2009).

Para Ogata (1998), a representação desta ação de controle pode ser dada por três meios diferentes: paralelo, série ou acadêmico, expostos em (7), (8) e (9), respectivamente.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (7)$$

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

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (9)$$

Desse modo, utiliza-se da interação dos termos de origem proporcional, integral e derivativa, com o objetivo de se obter um grau aceitável de redução de erro em regime permanente ao mesmo tempo em que necessita-se de uma boa resposta transitória. Isto faz com que os controladores PID sejam bastante comuns em aplicações industriais, pois possibilitam que várias especificações sejam atendidas ao mesmo tempo, como por exemplo, o tempo de acomodação, *overshoot* (máximo valor de ultrapassagem), o tempo de subida, etc (NISE, 2009).

### 2.3.2. MÉTODOS DE PROJETO DE CONTROLADORES

No desenvolvimento de um sistema de controle, o desempenho deste pode ser escrito em termos de medidas de desempenho no domínio do tempo ou no domínio da frequência, podendo ser especificado a partir de alguns parâmetros desejados, tais como, tempo de pico, valor máximo de ultrapassagem, tempo de

acomodação e alguns tipos de entradas: degrau, rampa ou senoidal (DORF e BISHOP, 2009).

Uma maneira simples de fazer com que este sistema atenda às especificações desejadas é a de alterar a sua planta, ou seja, alterar a dinâmica do processo a ser controlado. Entretanto, em muitas situações o processo a controlar pode ser fixo e, sendo assim, não pode ser modificado. Desse modo, com uma planta fixa e inalterável, deve ser inserido neste sistema um controlador com parâmetros que visem a melhoraria do sistema para que este obtenha o desempenho desejado. Então, este controlador deve compensar as características indesejadas e que não podem ser alteradas na planta do processo (OGATA, 1998).

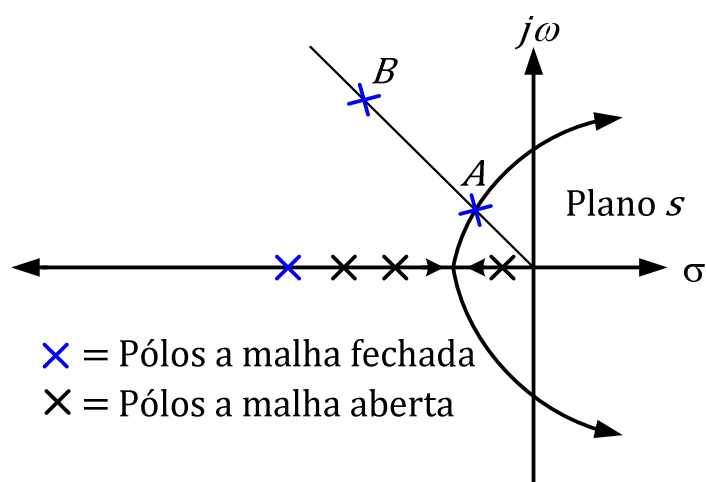
Assim sendo, em seguida serão discutidos alguns métodos que podem ser utilizados para projetar estes controladores, a saber, o método do lugar das raízes e o método da resposta em frequência.

#### 2.3.2.1. LUGAR DAS RAÍZES

De acordo com Ogata (1998):

O método do lugar das raízes é um método gráfico para se determinar a localização de todos os pólos a malha fechada a partir do conhecimento da localização dos pólos e zeros a malha aberta à medida que o valor de um parâmetro (usualmente o ganho) é variado de zero a infinito.

Uma vantagem deste método reside na melhoria da resposta transiente. Analisando a Figura 14 e admitindo que a resposta transitória desejada, definida, neste caso, pelo máximo valor de ultrapassagem e pelo tempo de assentamento, esteja sobre o ponto B, pode-se observar que apenas através do ajuste de ganho não é possível obter a especificação desejada, visto que o ponto B não pertence ao lugar geométrico das raízes (NISE, 2009).



**Figura 14 - Exemplo mostrando um ponto de projeto possível através do ajuste do ganho (A) e um ponto de projeto desejado (B).**

Fonte: (NISE, 2009, p. 354).

Uma solução para este caso é alterar o sistema existente por outro em que o ponto B esteja no lugar geométrico das raízes. Entretanto, isto, por vezes, pode elevar o custo do sistema, tornando esta alternativa inviável. Outro meio de resolução deste problema é realizando-se a compensação do sistema com pólos e zeros adicionais de modo que o ponto B esteja contido no lugar geométrico das raízes do sistema compensado (NISE, 2009).

Entretanto, a adição de um pólo provoca uma diminuição na estabilidade do sistema, isto é, faz com que o lugar das raízes seja deslocado para a direita. A adição de zeros, por sua vez, desloca o lugar das raízes para a esquerda, tendendo a deixar o sistema mais estável. Outra consideração a ser feita é de que a adição de um pólo ou de um zero no sistema representa a inserção, respectivamente, de controle integral e controle derivativo, sendo que o controle integral possui uma característica de atuação sobre o erro em regime permanente e o controle derivativo objetiva o aumento na rapidez da resposta transitória (OGATA, 1998).

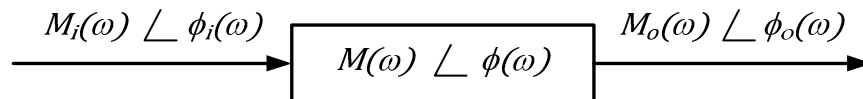
Uma possível desvantagem da compensação do sistema pela inserção de pólos e zeros é o aumento na ordem do sistema, sendo que o esperado é que a localização dos pólos e zeros adicionais em malha aberta sejam adequados de tal forma que os pólos desejados em malha fechada sejam de segunda ordem. Assim, os pólos adicionais devem produzir uma resposta mais rápida que os pólos dominantes do sistema. Então, os pólos não dominantes devem possuir um afastamento de no mínimo cinco vezes dos dominantes em relação à origem e os

zeros do sistema devem estar próximos dos pólos não dominantes, para que haja um cancelamento de pólos com zeros, fazendo com que o sistema resultante possa ser aproximado por dois pólos dominantes (NISE, 2009).

### 2.3.2.2. RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Ao aplicar-se uma entrada senoidal em um sistema linear, a resposta deste sistema em regime estacionário também será senoidal e com mesma frequência. Entretanto, apesar da saída possuir a mesma frequência da entrada, há uma diferença (dependente da frequência) de amplitude e de fase entre elas. Para a representação matemática de uma senóide, utiliza-se a notação fasorial, sendo necessário apenas seu módulo e seu ângulo. Assim, uma senóide dada por  $M_x \cos(\omega t + \varphi_x)$  pode ser representada por  $M_x \angle \varphi_x$ , onde a frequência  $\omega$  fica implícita (NISE, 2009).

A Figura 15 representa um diagrama em blocos da resposta em frequência de um sistema à uma entrada senoidal.



**Figura 15 - Representação em blocos da resposta em frequência de uma entrada senoidal.**

**Fonte: Adaptado de (NISE, 2009, p. 415).**

Dessa forma, a equação que descreve o sistema é dada por (11), a resposta da magnitude no domínio da frequência é dada por (12) e a resposta da fase no domínio da frequência é dada por (13).

$$M(\omega) \angle \varphi(\omega) = \frac{M_o(\omega) \angle \varphi_o(\omega)}{M_i(\omega) \angle \varphi_i(\omega)} \quad (11)$$

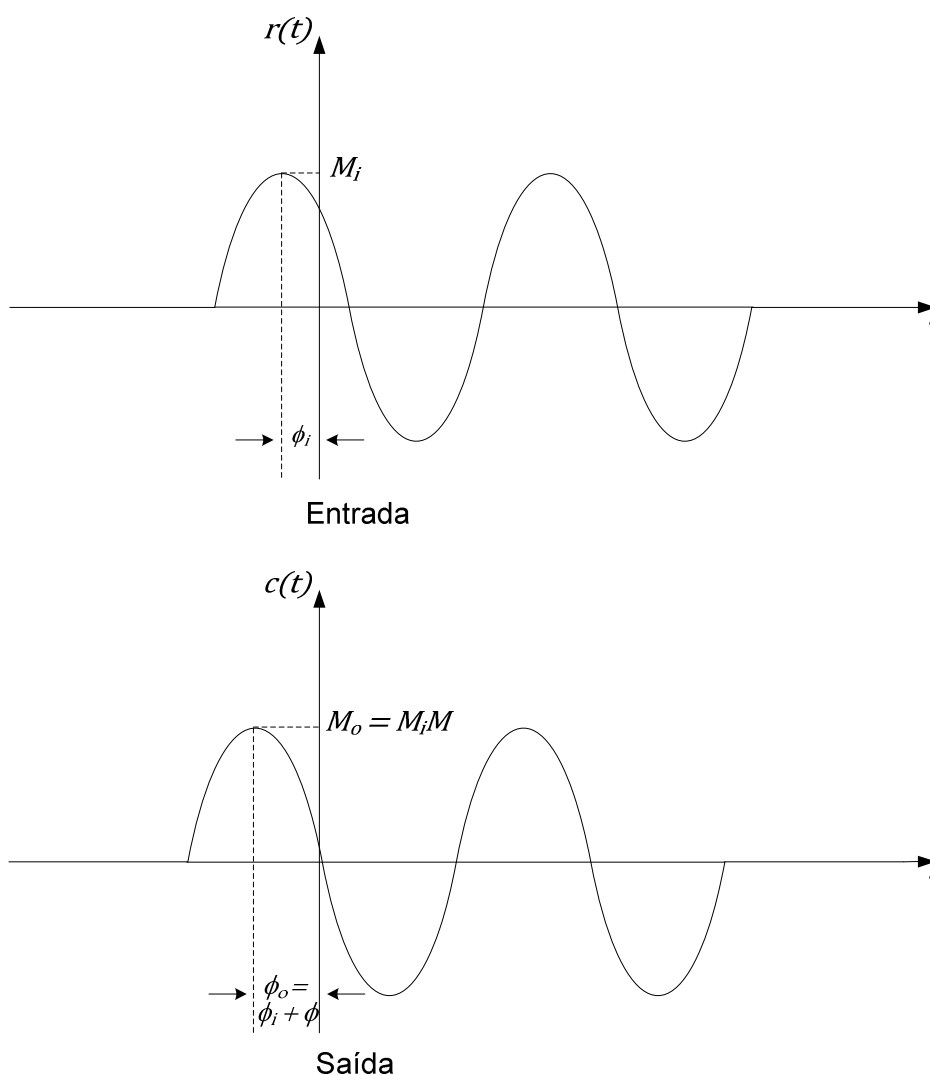
$$M(\omega) = \frac{M_o(\omega)}{M_i(\omega)} \quad (12)$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\varphi_o(\omega)}{\varphi_i(\omega)} \quad (13)$$

Assim, de acordo com Nise (2009):

Define-se resposta da magnitude no domínio da frequência como a relação entre as magnitudes das senóides de saída e de entrada. Define-se a resposta da fase através da diferença entre os ângulos de fase das senóides de saída e de entrada. Ambas as respostas são função da frequência e se aplicam apenas à resposta de regime estacionário devida às senóides aplicadas ao sistema.

A Figura 16 ilustra, graficamente, a resposta a uma entrada senoidal para o sistema contemplado pela Figura 15.



**Figura 16 - Formas de onda do sinal de entrada e de saída.**  
**Fonte: Adaptado de (NISE, 2009).**

Em termos de representação, a resposta em frequência pode ser representada basicamente de dois modos: pelo diagrama polar ou pelo diagrama de Bode. Assim, estruturas de compensação podem ser utilizadas para que as características do sistema representado por estes diagramas sejam alteradas para algo desejado (DORF e BISHOP, 2009).

Para Ogata (1998):

Na abordagem no domínio da frequência, o desempenho em regime transitório é especificado de forma indireta. Isto é, o desempenho da resposta transitória é expresso em termos de margem de fase, margem de ganho, magnitude do pico de ressonância [...], da frequência de cruzamento de ganho, da frequência de ressonância, da banda passante [...] e das constantes de erro estático [...].

Então, para a elaboração de projetos de sistemas de controle no domínio da frequência, costuma-se usar a representação de diagramas de bode, pois esta representação permite ajustar o ganho em malha aberta para que o erro em estado estacionário esteja dentro de limites aceitáveis.

#### 2.4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS NI USB-6009

A comunicação entre o *software* Matlab e atuador/sensor dos processos de nível e vazão é feita através de uma placa de aquisição de dados da National Instruments, a saber, NI USB - 6009.

Esta placa de aquisição de dados destaca-se por possuir um baixo custo diante de suas características, dispondo de 8 entradas analógicas de 14 bits com taxa de aquisição de até 48.000 amostras/s, 2 saídas analógicas de 12 bits, um contador de 5MHz e 12 portas I/O TTL/CMOS (INSTRUMENTS, 2010).

A Figura 17 traz a placa de aquisição de dados utilizada.





**Figura 17 - Placa de aquisição de dados  
NI USB 6009.  
Fonte: (INSTRUMENTS, 2010).**

Entretanto, esta placa admite apenas sinais de tensão em suas entradas e saídas, com limites de -10 a 10V e de 0 a 5V, respectivamente. Por isso, sua utilização só é possível para sinais de tensão dentro destes limites, sendo que sinais que não atendam estas especificações devem ser condicionados para que sua manipulação se torne possível.

### 3. PROJETO DE RECONDICIONAMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE NÍVEL E VAZÃO

#### 3.1 SITUAÇÃO PRÉ-PROJETO DA BANCADA DIDÁTICA

A bancada didática utilizada para este trabalho inicialmente possuía comunicação serial apenas para microcomputadores com Windows 98 como sistema operacional e também detém de um controlador dedicado, sendo que sua interface não é trivial, necessitando-se de manuais para utilização que não são mais encontrados, por se tratar de uma bancada antiga. Com estas características, acabou por se tornar obsoleta e deixar de ser utilizada. A Figura 18 ilustra a referida bancada.

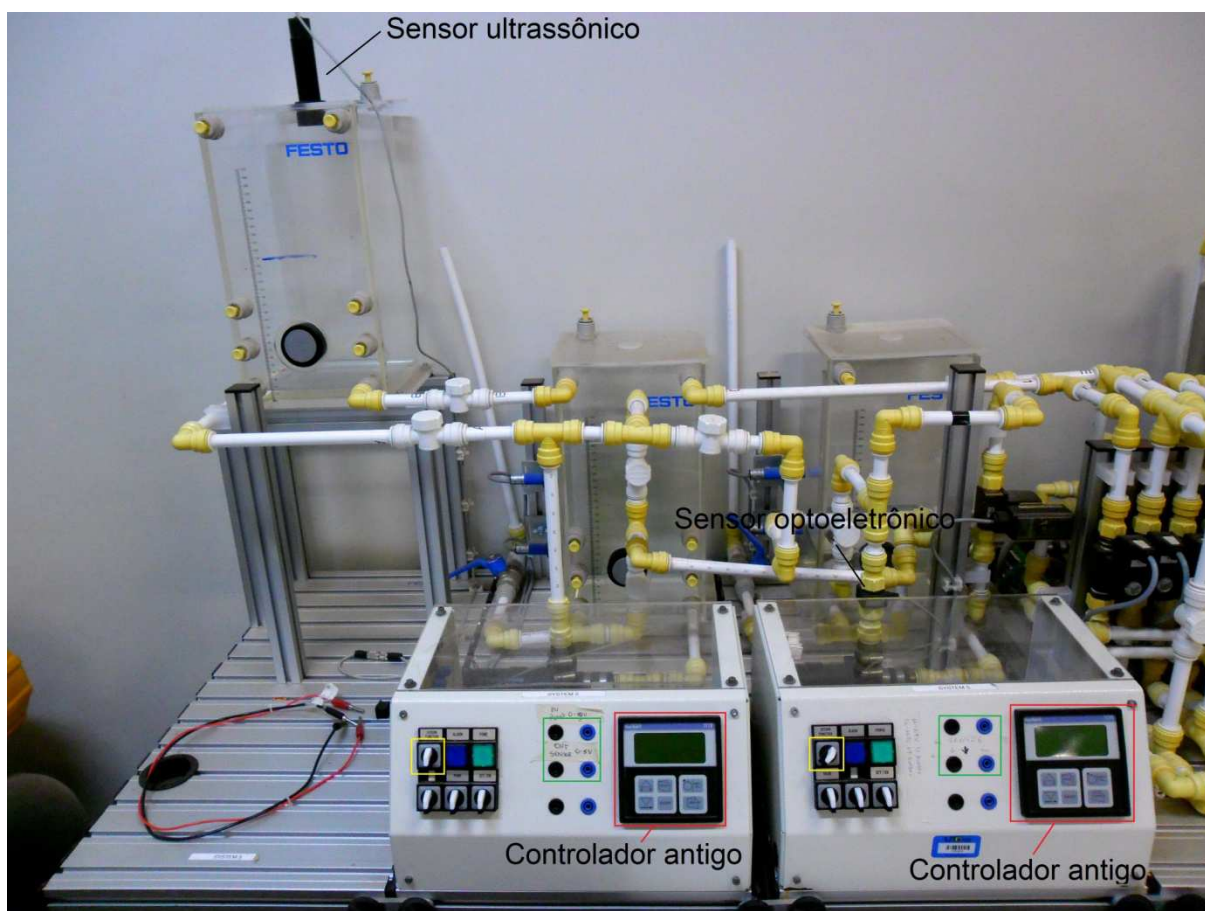
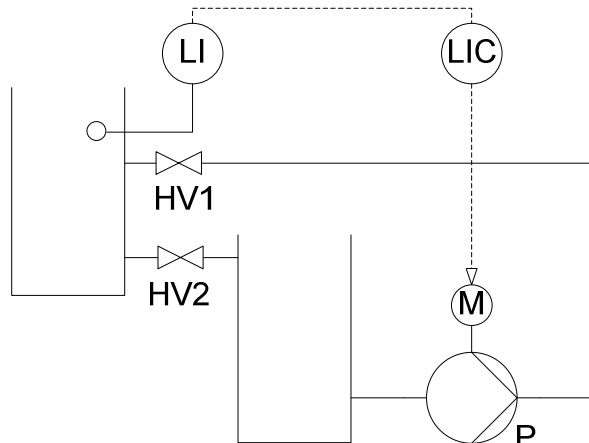


Figura 18 - Bancada didática utilizada.  
Fonte: Autoria própria (2014).

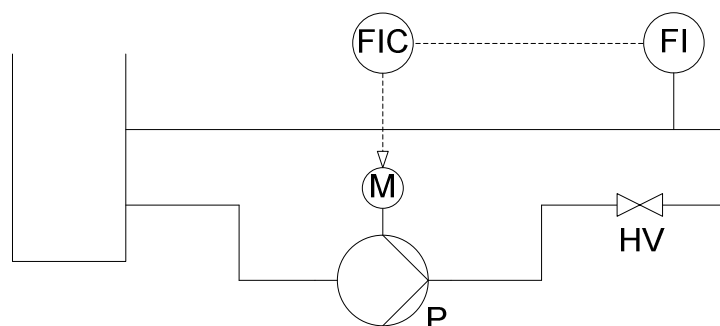
O diagrama esquemático referente ao processo de nível é ilustrado na Figura 19.



**Figura 19 - Diagrama do processo de nível.**  
Fonte: Adaptado de (FESTO, 1998).

Neste processo, o sensor de nível, representado por LI (*Level Indicator*), envia sinal para seu controlador, LIC (*Level Indicator Control*), que por sua vez realiza o acionamento do motor (M), relativo à bomba P (*Pump*), com base no nível desejado para o reservatório superior. A válvula manual HV1 (*Hand Valve*) delimita a passagem de líquido do reservatório inferior para o superior. Já a válvula manual HV2 controla o retorno de líquido do reservatório superior para o inferior, sendo ilustrada fisicamente e comentada posteriormente na seção 3.4.1 deste trabalho.

Com relação ao processo de vazão, a Figura 20 ilustra seu diagrama esquemático.



**Figura 20 - Diagrama do processo de vazão.**  
Fonte: Adaptado de (FESTO, 1998).

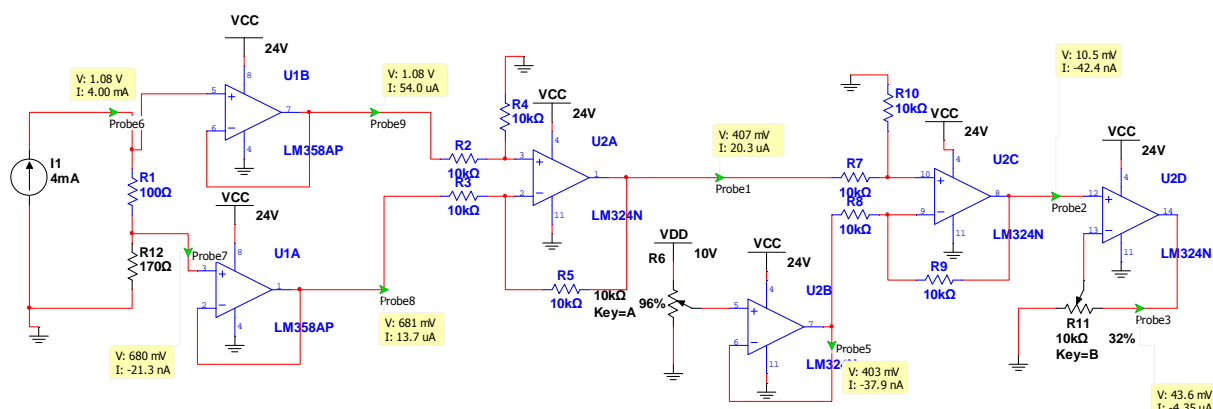
Neste caso, o sensor de vazão, representado por FI (*Flow Indicator*), envia sinal para o controlador do processo, FIC (*Flow Indicator Control*), que por sua vez realiza o acionamento do motor (M), relativo à bomba P (*Pump*), com base no fluxo de líquido desejado. A válvula manual HV (*Hand Valve*) manipula a passagem de líquido, estabelecendo alterações na vazão lida pelo sensor.

Ambos os processos possuem 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, para ambos os casos, necessário.

### 3.2 SISTEMA DE ACIONAMENTO E CONDICIONAMENTO DE SINAIS DO PROCESSO DE NÍVEL

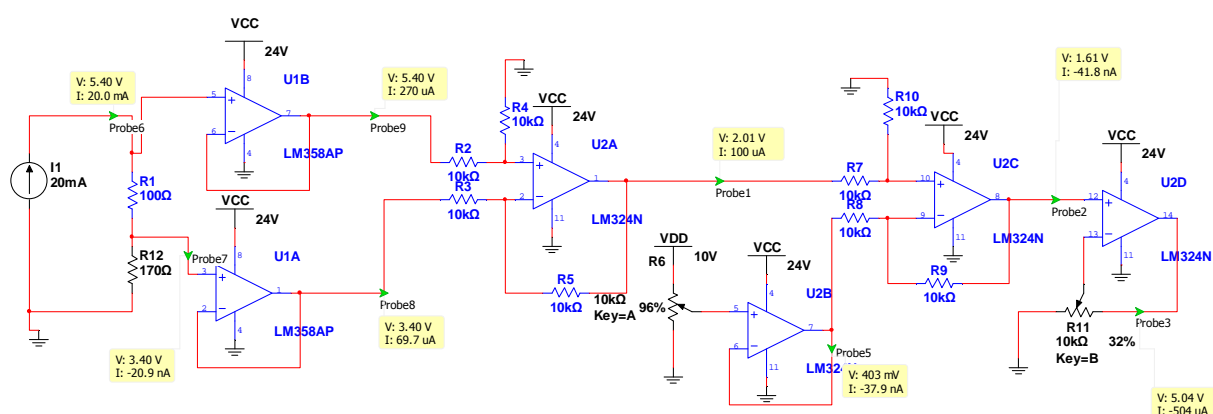
De acordo com seu manual construtivo, o processo de nível possui um sensor ultrassônico com detecção útil de 20 a 300mm, sendo que em sua saída é gerado um sinal de corrente proporcional ao nível de líquido do reservatório, variando entre 4 (nível mínimo) e 20mA (nível máximo) (FESTO, 1998). Como já mencionado, a placa de aquisição de dados a ser utilizada admite apenas sinais de tensão dentro de uma faixa de -10 a 10V em sua entrada, fazendo-se necessário o condicionamento do sinal deste sensor.

Assim, desenvolveu-se um circuito para converter o sinal de corrente de 4 a 20mA em um sinal de tensão proporcional de 0 a 10V. A Figura 21 traz a simulação do circuito através do *software* Multisim.



**Figura 21 - Simulação para o condicionamento do sensor ultrassônico com 4mA.**  
**Fonte: Autoria própria (2013).**

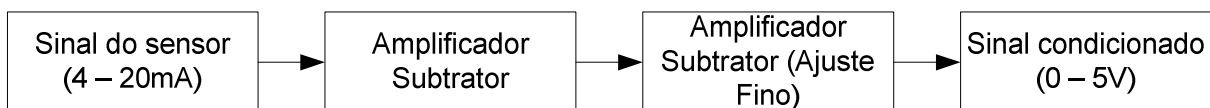
No circuito da Figura 21, o sinal proveniente do sensor passa por um resistor para adquirir-se um valor de tensão, que passa por um *buffer* para isolamento entre sensor e circuito. Esta tensão é então subtraída através de um amplificador subtrator, a fim de obter-se a diferença de potencial proporcional à faixa de 4 - 20 mA. Entretanto, este valor proporcional ainda não é o desejado, visto que seu valor deve ser nulo para 4mA. Assim, gera-se uma tensão visando utilizar outro amplificador subtrator para atingir o valor necessário (zero), que é o que é feito. Por fim, utiliza-se um amplificador com um potenciômetro para ajuste fino. A Figura 22 traz a simulação para o outro extremo, no caso, de 20mA.



**Figura 22 - Simulação para o condicionamento do sensor ultrassônico com 20mA.**  
**Fonte: Autoria própria (2013).**

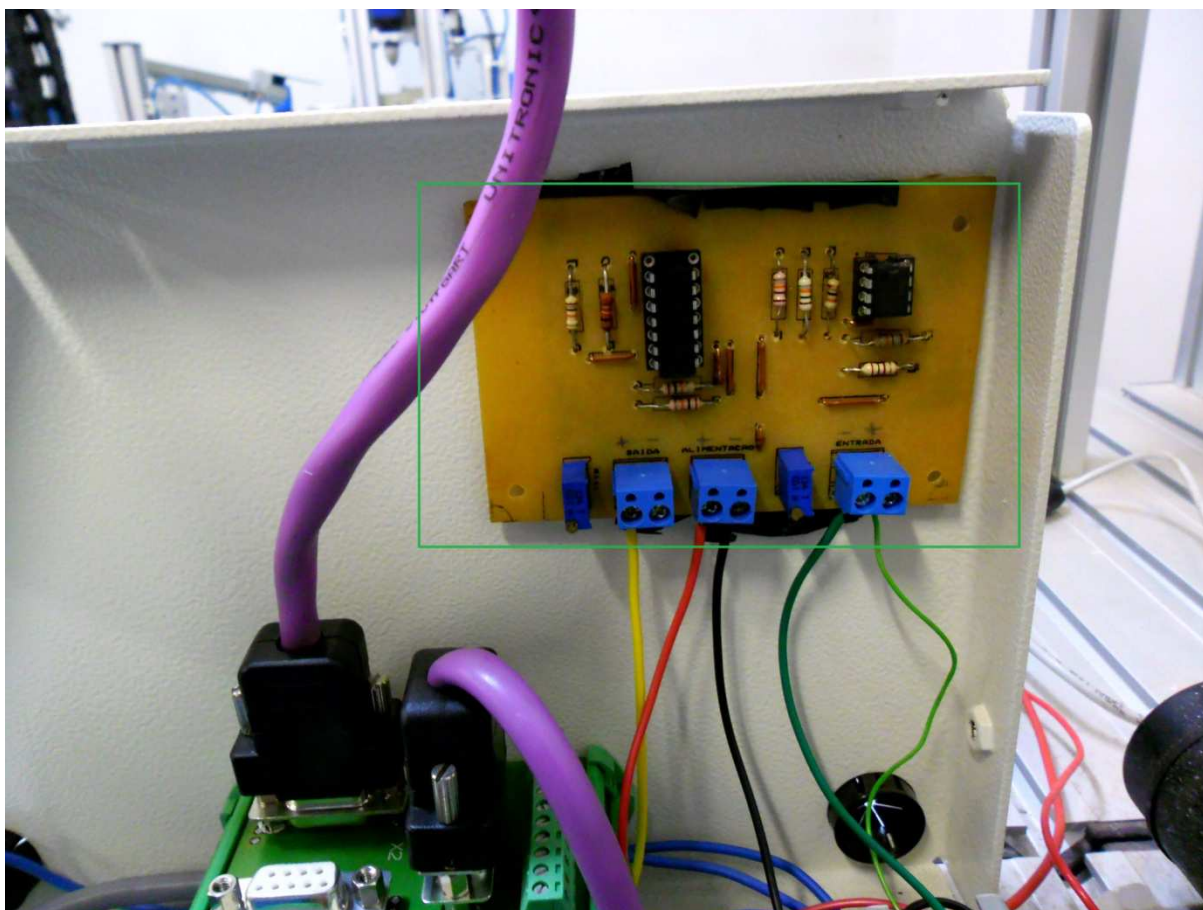
Então, com esta configuração obtém-se o condicionamento necessário para a utilização da placa de aquisição de dados, uma vez que para 4mA tem-se 43,6mV (bem próximo a zero) e para 20mA tem-se aproximadamente 5V. Isto atende os limites de entrada da placa de aquisição de -10 a 10V. A Figura 23

mostra, em linhas gerais, o funcionamento do circuito condicionador em diagrama de blocos.



**Figura 23 - Fluxo de sinal em diagrama de blocos do circuito para condicionamento do sensor.**  
Fonte: Autoria própria (2013).

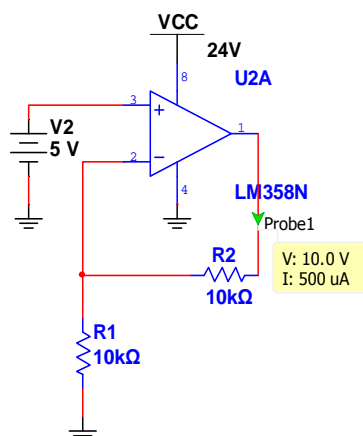
Após ter sido testado em *protoboard*, montou-se definitivamente este circuito de condicionamento em placa de circuito impresso, sendo posteriormente inserido na parte interna do módulo deste processo, conforme mostra a Figura 24.



**Figura 24 - Circuito de condicionamento para o processo de nível.**  
Fonte: Autoria própria (2014).

Para o acionamento, a placa de aquisição de dados disponibiliza apenas sinais de tensão entre 0 e 5V, sendo que os atuadores (bombas) operam entre 0 e 24V. Entretanto, dispõe-se de um estágio de amplificação contido na bancada que

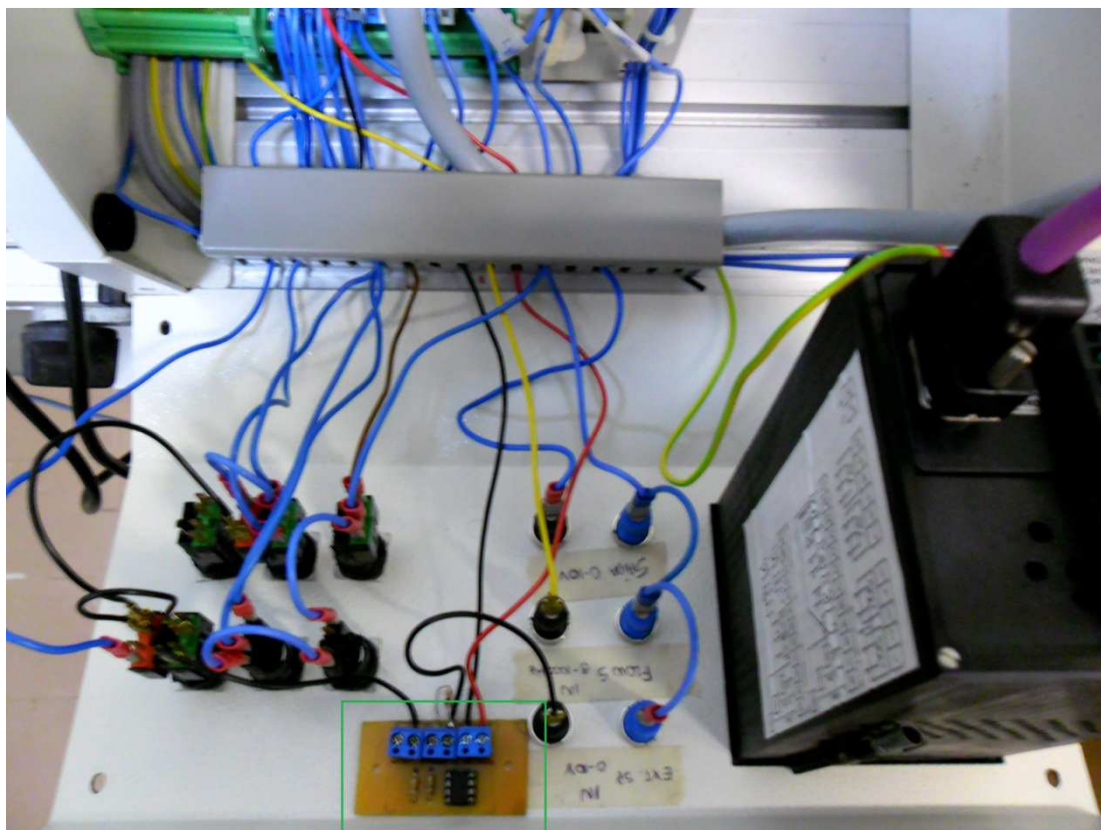
amplifica sinais de tensão de 0 a 10V em um proporcional de 0 a 24V. Assim, o condicionamento deve ser feito para que o sinal de 0 a 5V gerado pela placa de aquisição de dados seja compatível com a entrada do estágio de amplificação de 0 a 10V. Para isto, desenvolveu-se um circuito amplificador de ganho dois conforme mostra a Figura 25.



**Figura 25 - Circuito de condicionamento para acionamento do atuador do processo de nível.**  
**Fonte: Autoria própria (2013).**

Após ser devidamente testado em *protoboard*, montou-se definitivamente este circuito de acionamento em placa de circuito impresso, sendo posteriormente inserido na parte interna do módulo deste processo, conforme mostra a Figura 26.



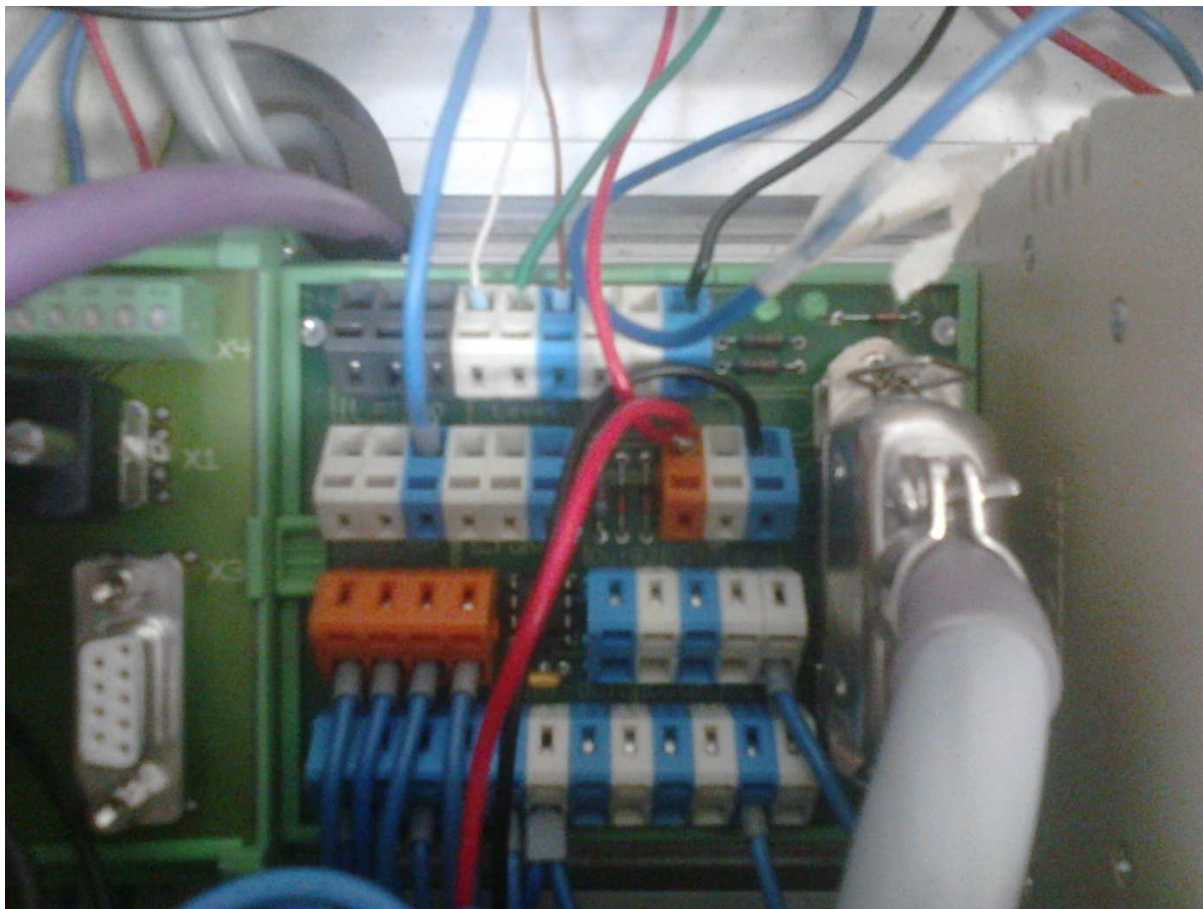


**Figura 26 - Circuito de condicionamento para o acionamento do atuador do processo de nível inserido na bancada.**

**Fonte: Autoria própria (2014).**

No módulo do processo, incluído na bancada, há um terminal analógico, como ilustra a Figura 27, com conectores de 0 e 24V sem utilização, os quais foram utilizados para tornar a referência comum e alimentar os amplificadores, respectivamente.





**Figura 27 - Terminal analógico contido no módulo da bancada.**  
Fonte: Autoria própria (2014).

Os conectores de cor laranja disponibilizam tensão de 24V, enquanto que os conectores de cor azul disponibilizam 0V (referência).

A parte externa do módulo é constituída de quatro chaves liga/desliga e três pares de bornes, dos quais uma chave e dois bornes estavam sem conexão. A Figura 28 traz as quatro chaves mencionadas.

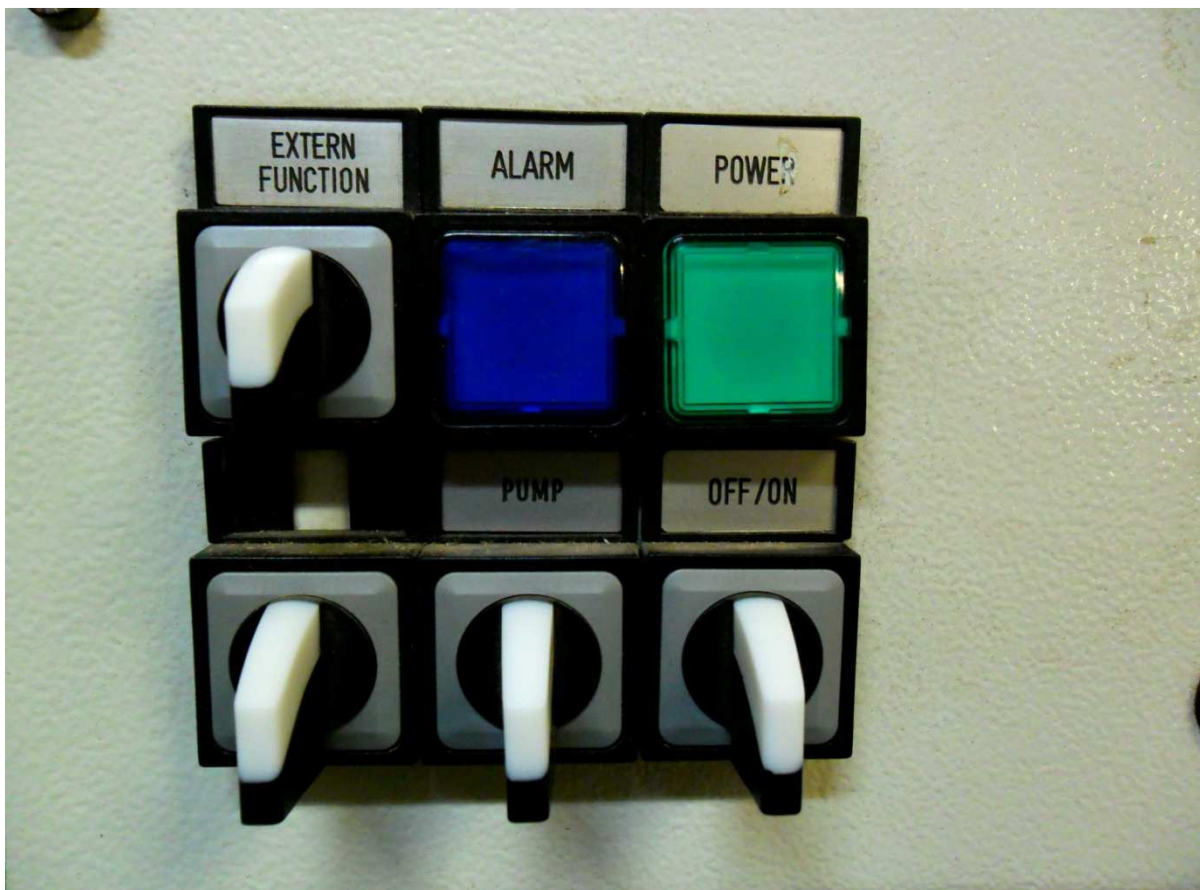


Figura 28 - Chaves on/off do módulo de controle de nível.  
Fonte: Autoria própria (2013).

Dentre as 4 chaves, deve-se ressaltar a que está sob o nome "*extern function*" (função externa). Nesta chave, que não possuía nenhuma conexão, o sistema de condicionamento desenvolvido foi conectado e pode entrar em funcionamento quando estiver no estado *on* (ligado). Assim, ao manter a chave na posição *off* (desligada), a bancada permanece com seu funcionamento original, sem qualquer alteração. Com relação aos três pares de bornes, estes estão ilustrados na Figura 29.



**Figura 29 - Bornes para ligação com a placa de aquisição de dados.**  
Fonte: Autoria própria (2013).

Dentre estes bornes, o par do meio disponibilizava originalmente a saída do sinal do sensor. Assim, com o auxílio da chave de função externa pode-se utilizar este par de bornes para leitura do sinal acondicionado do sensor. Os outros dois pares restantes encontravam-se sem utilização, sendo, então, o primeiro par (de cima para baixo) escolhido para receber o sinal de acionamento gerado pela placa de aquisição de dados.

### 3.3 SISTEMA DE ACIONAMENTO E CONDICIONAMENTO DE SINAIS DO PROCESSO DE VAZÃO

De acordo com seu manual técnico construtivo, o processo de vazão possui um sensor optoeletrônico com capacidade de detecção útil entre 0.5 a 15L/min, emitindo em sua saída um sinal do tipo onda quadrada, de amplitude entre 5 e 12V e com frequência proporcional à vazão de líquido, teoricamente variando

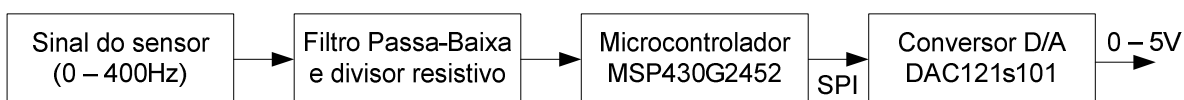
entre 13 (fluxo mínimo) e 1200Hz (fluxo máximo) (FESTO, 1998). Diz-se teoricamente pois é o que consta em seu manual, porém, o fluxo máximo inserido no processo atinge a frequência de 400Hz devido à limitação de potência da bomba. Para este fluxo máximo, a amplitude do sinal chega ao máximo de 7V.

Uma vez que o sinal a ser acondicionado é digital (onda quadrada) e deseja-se utilizar as entradas e saídas analógicas da placa de aquisição de dados, adotou-se a solução do uso de um conversor D/A. Entretanto, como este sinal de frequência é variável (varia com a vazão) e deseja-se estabelecer uma escala de conversão de 0 - 400Hz em 0 - 5V, não é possível utilizá-lo diretamente com o conversor. É necessário realizar a leitura desta frequência primeiramente. Para esta leitura utilizou-se o microcontrolador MSP430G2452 da Texas Instruments.

Este microcontrolador opera com tensão máxima de 3,6V. Como o sinal pode chegar em 7V, inicialmente um divisor resistivo é inserido para limitar esta tensão sem alterar a frequência, seguido de um filtro passa baixa com frequência de corte de 5kHz, para atenuar ruídos.

Com isto, o sinal é adquirido por uma porta do microcontrolador e sua leitura é feita através de algumas linhas de código. Basicamente, o microcontrolador é programado para gerar interrupções a cada detecção de borda de subida. Após uma interrupção, o *timer* (temporizador) é configurado para realizar contagens entre duas bordas de subidas consecutivas. Com este número de contagens gerado pelo temporizador e com a base de tempo programada para o mesmo, o período do sinal é obtido. Assim, apenas fazendo-se o inverso do período, a frequência é obtida.

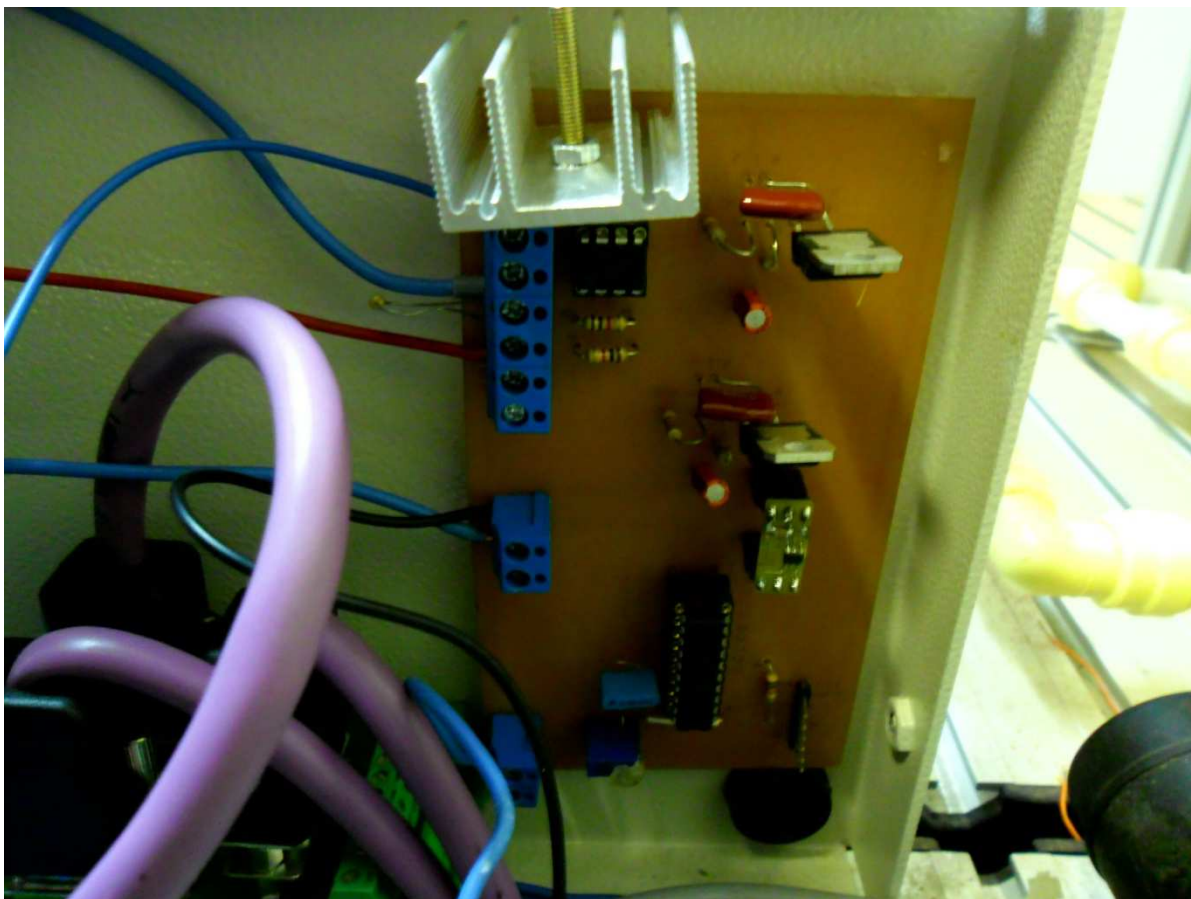
Para realizar a comunicação entre o microcontrolador e o conversor D/A, sendo utilizado o conversor DAC121s101 da *National Semiconductor*, o primeiro deve ser configurado para o modo SPI (*Serial Peripheral Interface*) de envio de dados. Deve ser utilizado este protocolo de comunicação pois apenas este é aceito pelo conversor D/A utilizado. A Figura 30 traz, em diagrama de blocos, o fluxo a ser seguido pelo circuito de condicionamento para este processo.



**Figura 30 - Diagrama de blocos do circuito condicionador para o sensor de vazão.**  
Fonte: Autoria própria (2014).



Após montagem em *protoboard* e verificação do correto funcionamento do condicionamento, inseriu-se definitivamente o circuito internamente ao bloco de controle do processo em uma placa de circuito impresso, conforme mostra a Figura 31.



**Figura 31 - Circuito para condicionamento do sensor de vazão inserido na bancada.**  
Fonte: Autoria própria (2013).

O dissipador está conectado em um LM7812, que é o regulador de tensão responsável por baixar a tensão de 24V, proveniente do terminal analógico e utilizada na alimentação do amplificador, para 5V, sendo esta a tensão de referência do conversor D/A.

O acionamento da bomba deste processo é idêntico ao processo de controle de nível, sendo também necessário apenas um amplificador de ganho dois, o qual já está incluso na placa da Figura 31.

### 3.4 LEVANTAMENTO DOS MODELOS MATEMÁTICOS E CONTROLE DOS PROCESSOS DE NÍVEL E VAZÃO

Com o condicionamento de sinais pronto, a interação entre o usuário e os processos pode ser feita. Assim, como visa-se realizar o controle dos processos, primeiramente deve ser levantado o modelo matemático dos sistemas a fim de obter a planta dos mesmos e também suas características, para que seu controle seja projetado corretamente baseado em alguma especificação de desempenho desejada.

#### 3.4.1 PROCESSO DE NÍVEL

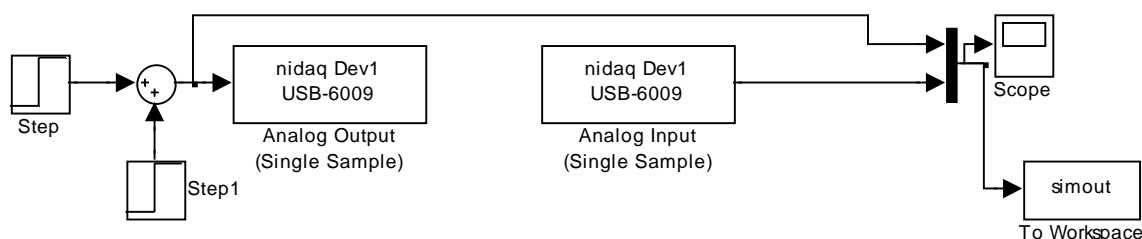
Inicialmente, é necessário saber se o sistema se comporta de maneira linear ou não linear, pois se for linear sua função transferência (planta) pode ser obtida diretamente e, do contrário, o sistema deve ser linearizado em torno de um ponto de operação desejado. Um fator importante para definir o ponto de operação é a abertura da válvula de retorno de líquido do reservatório superior para o inferior. A Figura 32 mostra o nível de abertura escolhido.



**Figura 32 - Posição da válvula de nível para definição do ponto de operação.**  
Fonte: Autoria própria (2014).

Quanto maior for a abertura da válvula, menor será o nível de líquido alcançado no reservatório superior (para um mesmo valor de tensão aplicado à bomba), o que altera a função de transferência da planta. Por outro lado, quanto menor for sua abertura (tendendo ao fechamento completo), maior será o nível de líquido alcançado no reservatório superior (também para um mesmo valor de tensão aplicado à bomba), o que também altera a função de transferência da planta.

Em seguida, utiliza-se a ferramenta contida no software Matlab: o *simulink*. Com esta ferramenta é possível realizar a comunicação entre o usuário e o processo. Assim, para verificar a linearidade deste sistema, no simulink é montado o diagrama de blocos mostrado na Figura 33.

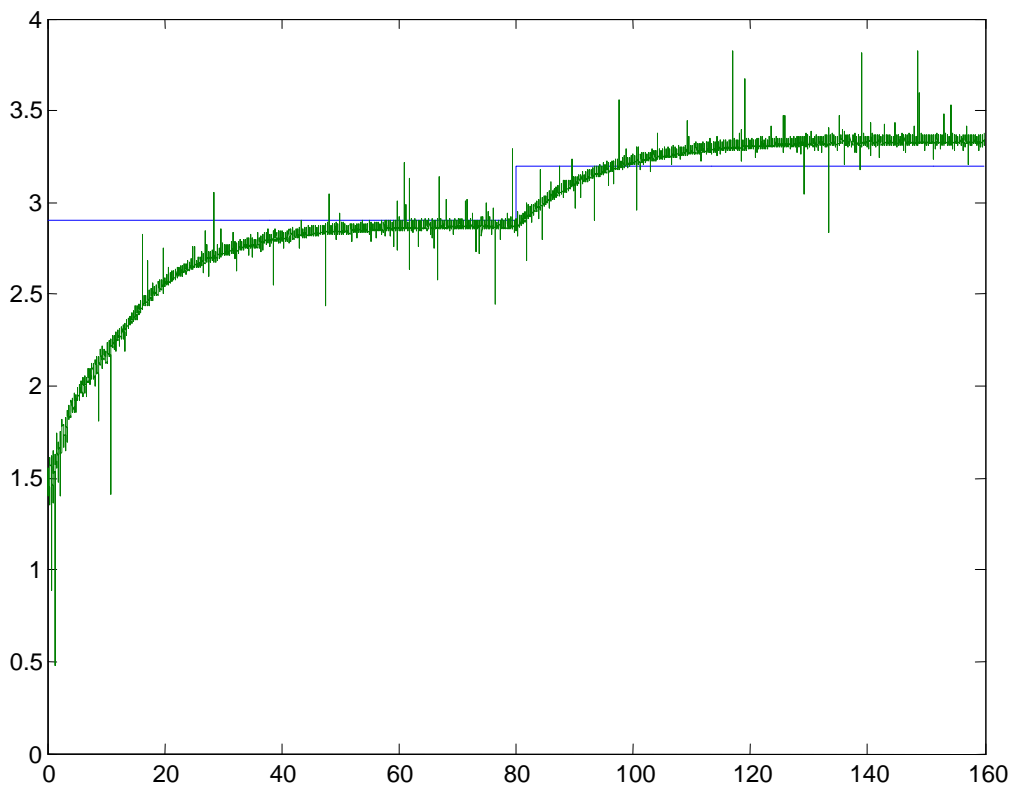


**Figura 33 - Diagrama de blocos no simulink para verificar a linearidade dos sistemas.**  
**Fonte: Autoria própria (2013).**

Neste diagrama, o bloco "Step" gera um degrau com amplitude de 2,9V, enquanto que o bloco "Step1" está configurado para gerar um degrau com amplitude 0,3V no instante 80 de simulação, a qual possui um período total de simulação de 160. O tempo esperado para entrada do segundo degrau de 0,3V é necessário pois o sistema já deve ter se estabilizado para o primeiro degrau gerado, tornando a análise dos intervalos entre 0-80 e 80-160 adequada. Em seguida, ambos os blocos estão conectados com um bloco, denominado "nidaq Dev1 USB-6009", responsável pela interface entre o programa e a saída da placa aquisição de dados, que irá alimentar a bomba utilizada no processo. Há outro bloco com este mesmo nome e com esta mesma função, só que para a interface entre o programa e a entrada da placa aquisição de dados. A diferença entre os dois blocos está na parte inferior dos mesmos, onde para o primeiro lê-se "Analog Output (Single Sample)" e para o segundo lê-se "Analog Input (Single Sample)".

Estes sinais de saída e entrada da placa de aquisição de dados são sobrepostos em gráfico através do bloco "Scope" e armazenados em vetores através

do bloco "simout". O armazenamento dos dados enviados e recebidos é necessário para posterior manipulação dos mesmos através da janela de comandos do Matlab. A Figura 34 traz a resposta obtida para o sistema descrito.



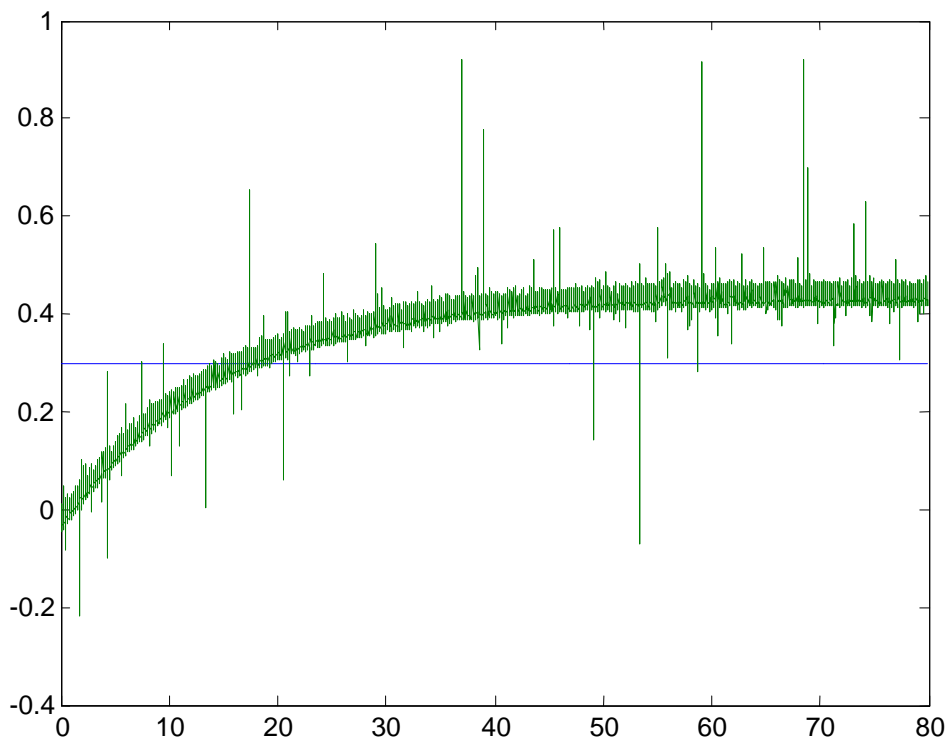
**Figura 34 - Resposta ao degrau para o processo de nível.**  
**Fonte: Autoria própria (2013).**

Analisando a Figura 34, pode-se perceber que o processo não é linear. Isto porque, para pequenas variações na entrada (0,3V) em torno de um ponto de operação escolhido (2,9V), a saída aumenta de maneira não proporcional. O sistema seria linear se, após o degrau de 0,3V, a resposta convergisse para 3,2V ( $2,9V + 0,3V$ ). Em outras palavras, a função de transferência do sistema entre 0 e 80 difere da função de transferência do sistema entre 80 e 160. Utilizando-se da teoria, pode-se concluir que este processo não atende a condição de superposição.

Uma vez verificado como não linear, o equivalente linear deve ser obtido em torno do ponto de operação escolhido para pequenas variações na entrada. Para isto, deve ser obtida a função transferência apenas da resposta à entrada entre 80 e 160, pois esta parte contém a variação de nível para uma pequena variação na entrada e é em cima desta pequena variação que o controle do processo deve ser feito.



Através de alguns comandos, no Matlab, para manipular os dados salvos através do já mencionado bloco "simout", é possível separar apenas a parte de interesse entre 80 e 160. A Figura 35 ilustra o resultado desta operação.

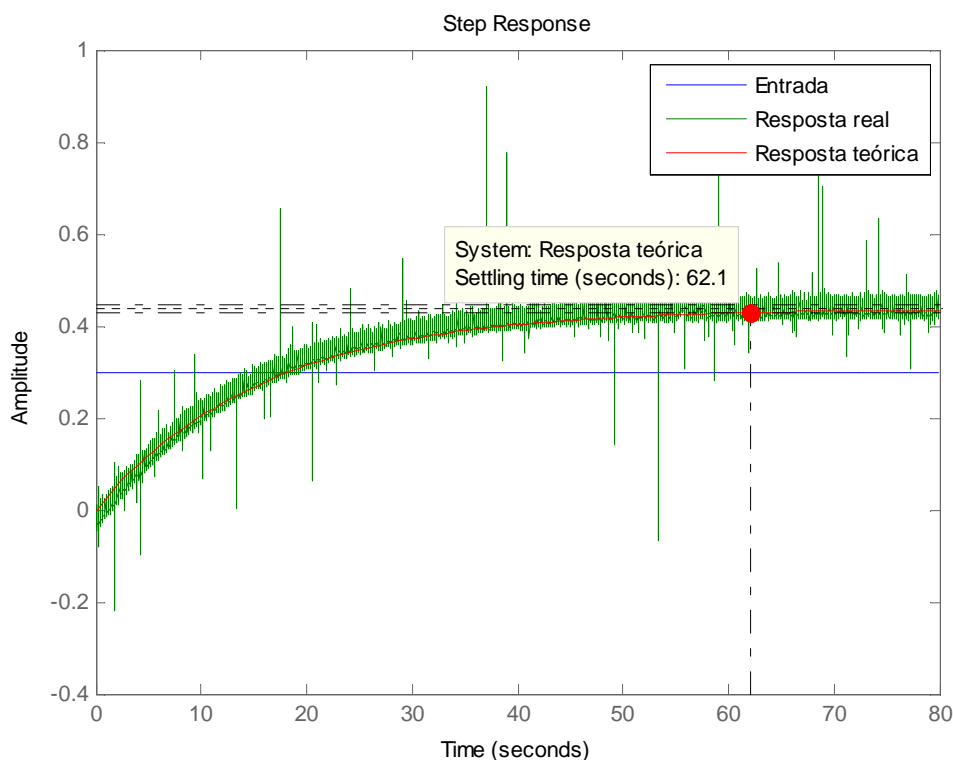


**Figura 35 - Intervalo desejado para obtenção da função transferência.**  
**Fonte: Autoria própria (2013).**

Como para obter a função transferência é necessário que o sistema esteja referenciado à origem, esta parte separada foi deslocada para o ponto 0, para analisar esta resposta como se fosse a resposta para uma entrada de 0,3V. Com os dados desta entrada e saída, é obtida, então, a função de transferência dada em (14).

$$\frac{\Delta Nível(s)}{\Delta Entrada(s)} = \frac{1,4576}{1 + 15,867s} \quad (14)$$

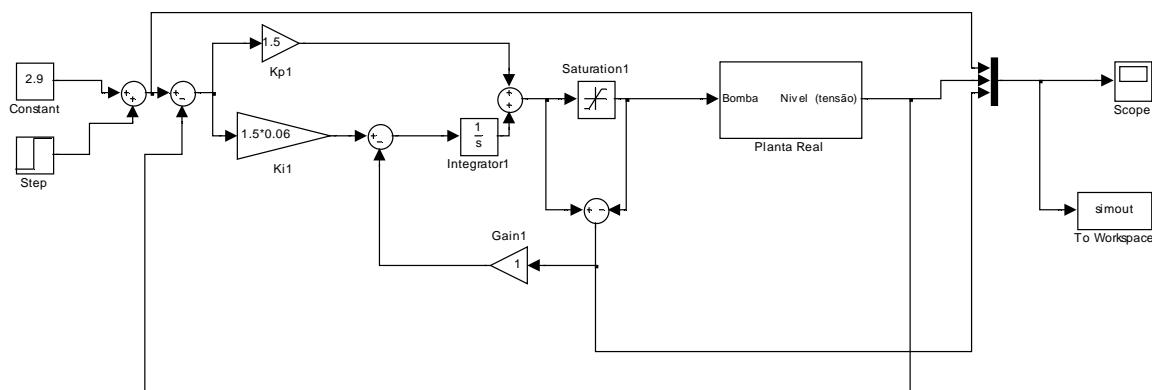
Aplicando-se um degrau de 0,3 para esta função de transferência obtida e sobrepondo o resultado com a Figura 35, obtém-se o que consta na Figura 36.



**Figura 36 - Comparação entre resposta real e simulada para mesma entrada.  
Fonte: Autoria própria (2013).**

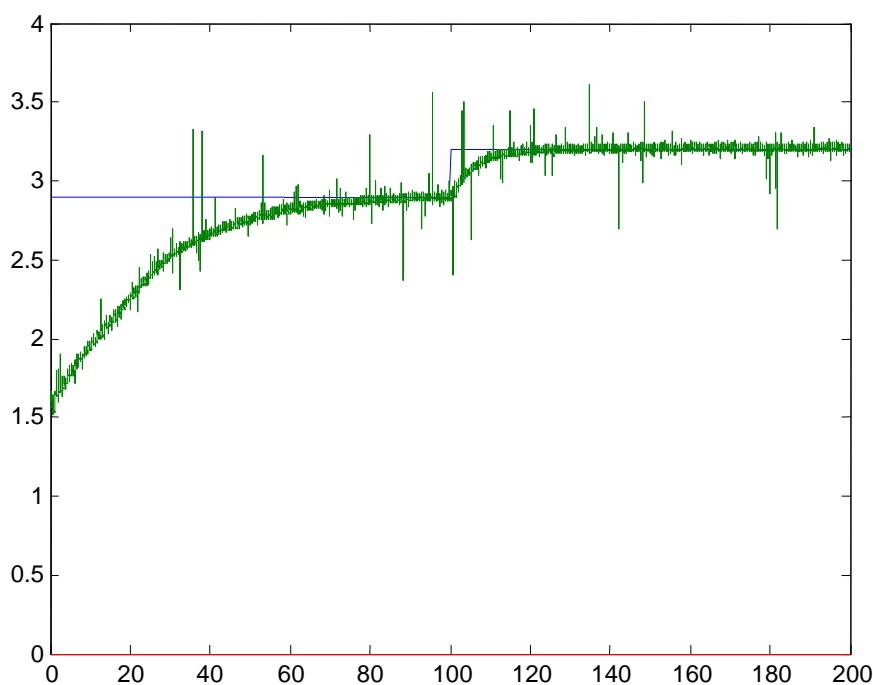
Uma vez que esta função de transferência representa com boa fidelidade a resposta obtida para pequenas variações em torno do ponto de operação desejado do sistema real, o controlador pode ser projetado baseado nesta função de transferência para alguma especificação de desempenho desejada. Neste caso, deseja-se melhorar o tempo de assentamento. Para tanto, como trata-se de um sistema de primeira ordem, a ação de controle derivativa não se faz necessária, sendo projetado, então, um controlador PI. Em relação aos ganhos utilizou-se o método do lugar das raízes para seu ajustes sendo os pólos alocados de modo a se obter a resposta desejada.

Há, também, um ajuste no ganho da ação integral, para que o zero compensador e o pólo do sistema se "cancelem", melhorando o uso da ação de controle integral. Assim, como a função de transferência possui um pólo em  $-0.063$  o zero compensador situou-se próximo a este ponto, sendo escolhido  $-0.06$ . A Figura 37 mostra o diagrama de blocos no simulink para análise da resposta da planta real com o controlador PI inserido.



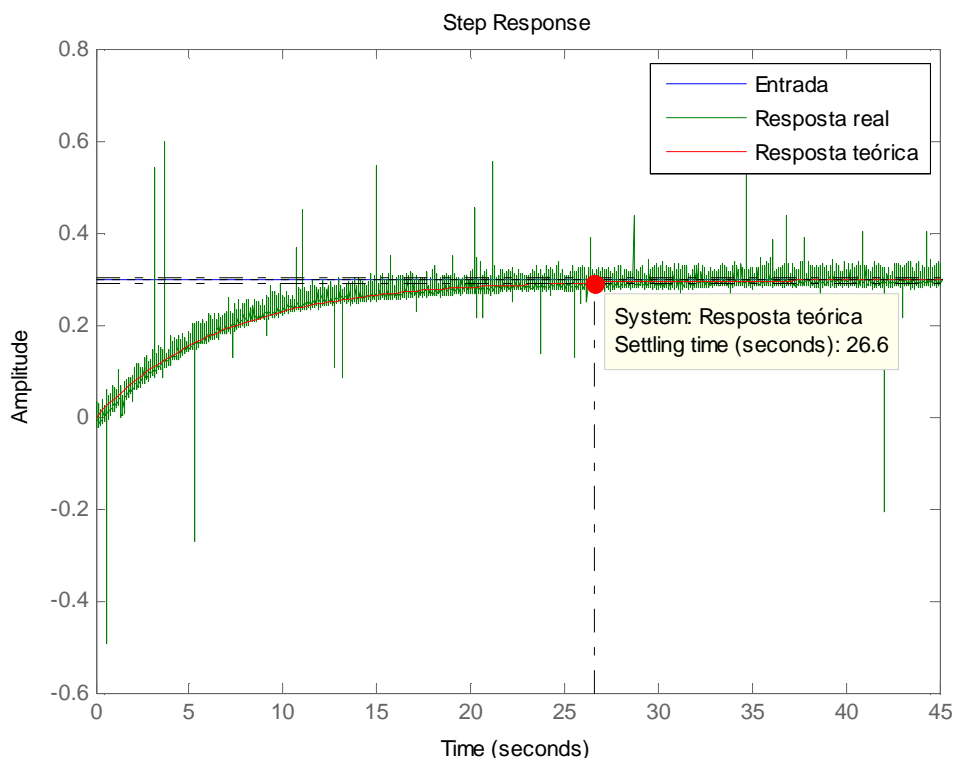
**Figura 37 - Diagrama com controlador PI para obtenção da resposta controlada.**  
**Fonte: Autoria própria (2014).**

Para atingir a especificação de desempenho desejada, o ganho necessário foi de 1,5. O bloco "Step" está configurado para gerar a variação de 0,3V no instante de tempo 100 da simulação. O bloco denominado "Saturation1" utiliza-se para projeto do *anti-windup*, o qual é necessário para evitar o acúmulo de erro do integrador quando o atuador estiver saturado. Com este esquemático, obteve-se a resposta contida na Figura 38.



**Figura 38 - Resposta à malha fechada com controlador PI para o processo de nível.**  
**Fonte: Autoria Própria (2014).**

Separando novamente a resposta obtida após o degrau de 0,3V e sobrepondo-a com a resposta à um degrau de 0,3V na função de transferência dada pela multiplicação entre a planta e o controlador, obtém-se o resultado como mostra a Figura 39.



**Figura 39 - Resposta real e simulada para o sistema de nível compensado.**  
**Fonte: Autoria própria (2014).**

Comparando-se a resposta da Figura 39 com a da Figura 36, pode-se observar que a melhoria na especificação de desempenho desejada ocorreu, sem causar alteração em alguma outra especificação prejudicialmente e corrigindo o erro em regime permanente.

### 3.4.2 PROCESSO DE VAZÃO

Para este caso, também é necessário saber, inicialmente, se o sistema se comporta de maneira linear ou não linear, pelos mesmos motivos citados no item 3.4.1. Neste caso, a abertura da válvula de retorno de líquido do reservatório para ele mesmo também é importante. A Figura 40 mostra o nível de abertura escolhido.

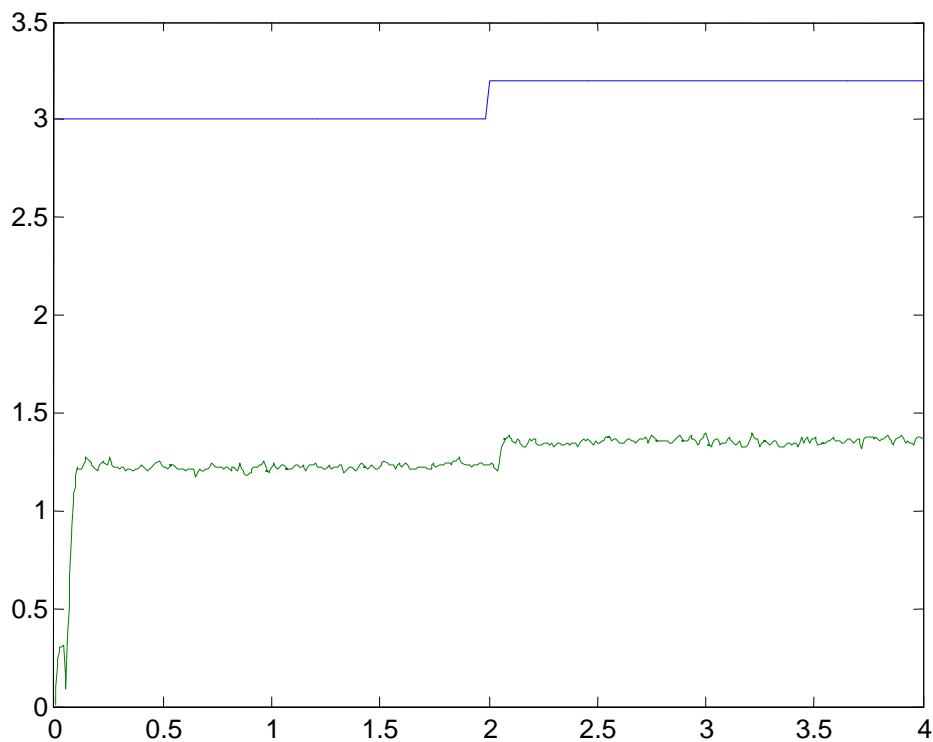


**Figura 40 - Posição da válvula de vazão para definição do ponto de operação.**  
**Fonte: Autoria própria (2014).**

Quanto maior for a abertura da válvula, maior será o fluxo que passa pelo sensor optoeletrônico (para um mesmo valor de tensão aplicado à bomba), o que altera a função de transferência da planta. Por outro lado, quanto menor for sua abertura (tendendo ao fechamento completo), menor será o fluxo detectado pelo sensor (também para um mesmo valor de tensão aplicado à bomba), o que também altera a função de transferência da planta.

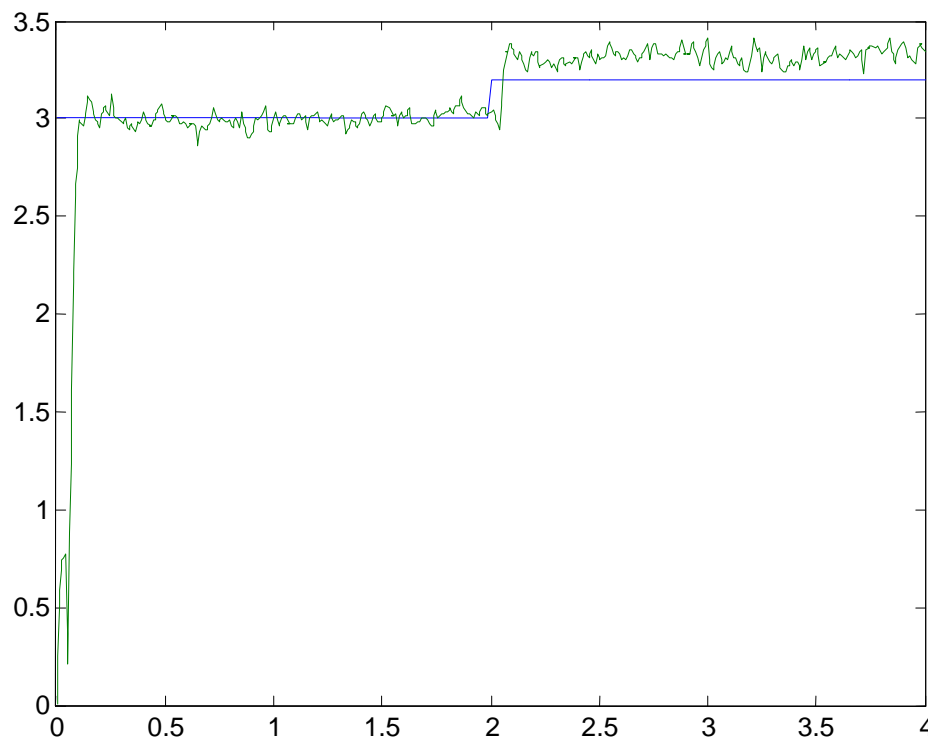
Para verificar a linearidade deste sistema, utiliza-se do mesmo diagrama de blocos mostrado anteriormente através da Figura 33. Neste diagrama, alterou-se o bloco "Step" para gerar um degrau com amplitude de 3V, enquanto que o bloco "Step1" está configurado para gerar um degrau com amplitude 0,2V no instante 2 de simulação, a qual possui um período total de simulação de 4. O tempo total de simulação é muito menor que para o processo de nível, pois o processo de vazão possui uma resposta muito mais rápida.

Analogamente ao processo de nível, os sinais de saída e entrada da placa de aquisição de dados são sobrepostos em um gráfico através do bloco "Scope" e armazenados em vetores através do bloco "simout". A Figura 41 traz a resposta obtida para este caso.



**Figura 41 - Resposta ao degrau para o processo de vazão.**  
**Fonte: Autoria própria (2014).**

Analisando a Figura 41, em um primeiro momento não é possível afirmar se o processo é linear ou não. Como medida auxiliar, dá-se um ganho de 2,45 na saída do sistema para que seja possível comparar sua proporcionalidade após o instante de tempo 2. A Figura 42 mostra o resultado desta ação.

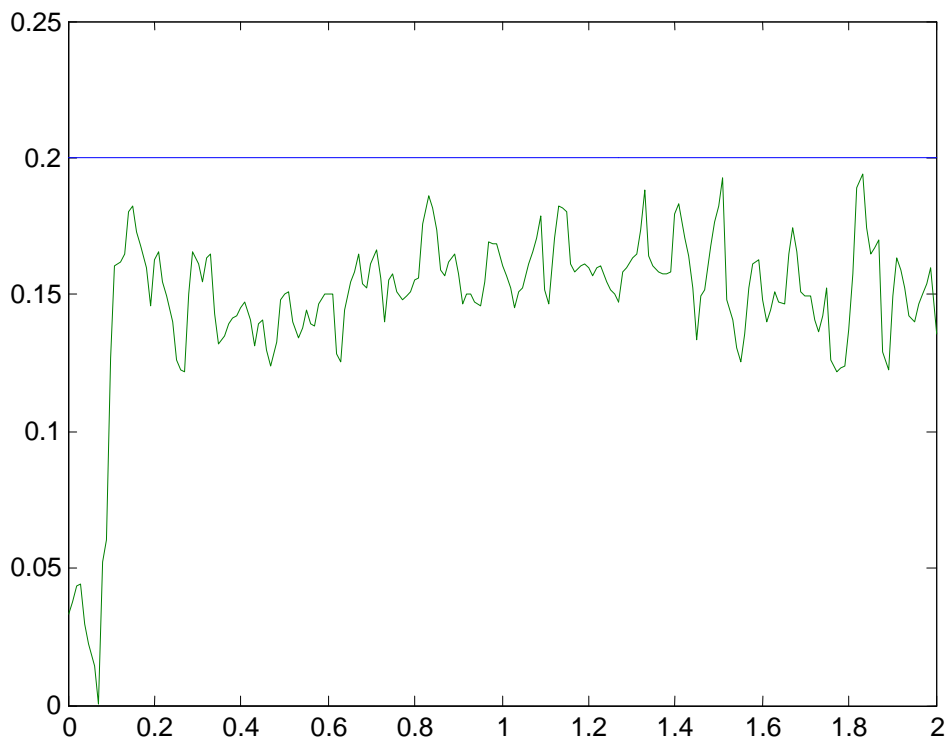


**Figura 42 - Resposta ao degrau para o processo de vazão com ganho.**  
**Fonte: Autoria própria (2014).**

Através da Figura 42 é possível definir o sistema como não linear, pois para pequenas variações (0,2V) em torno de um ponto de operação escolhido (3V), o sistema se comporta de maneira não proporcional. Assim, as mesmas considerações feitas para o processo de nível são igualmente válidas para este caso.

Uma vez verificado como não linear, o equivalente linear deve ser obtido em torno do ponto de operação escolhido para pequenas variações na entrada. Para isto, deve ser obtida a função transferência apenas da resposta à entrada no intervalo de tempo entre 2 e 4, pois esta parte contém a variação de fluxo para uma pequena variação na entrada e é em cima desta pequena variação que o controle do processo deve ser feito.

Através da mesma manipulação de dados salvos pelo já mencionado bloco "simout", a resposta de interesse separada e deslocada para a origem é a que consta na Figura 43.



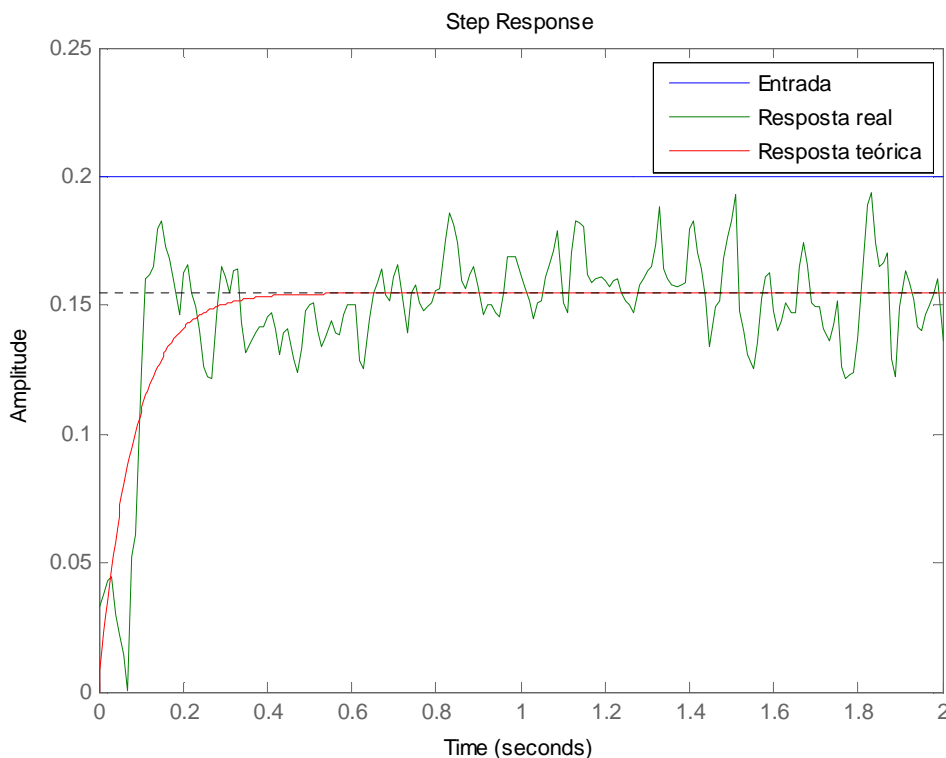
**Figura 43 - Intervalo desejado para obtenção da função transferência.  
Fonte: Autoria própria (2014).**

Com os dados desta entrada e saída, a função de transferência é obtida, conforme (14).

$$\frac{\Delta Vazão(s)}{\Delta Entrada(s)} = \frac{0,7737}{1 + 0,08275s} \quad (14)$$

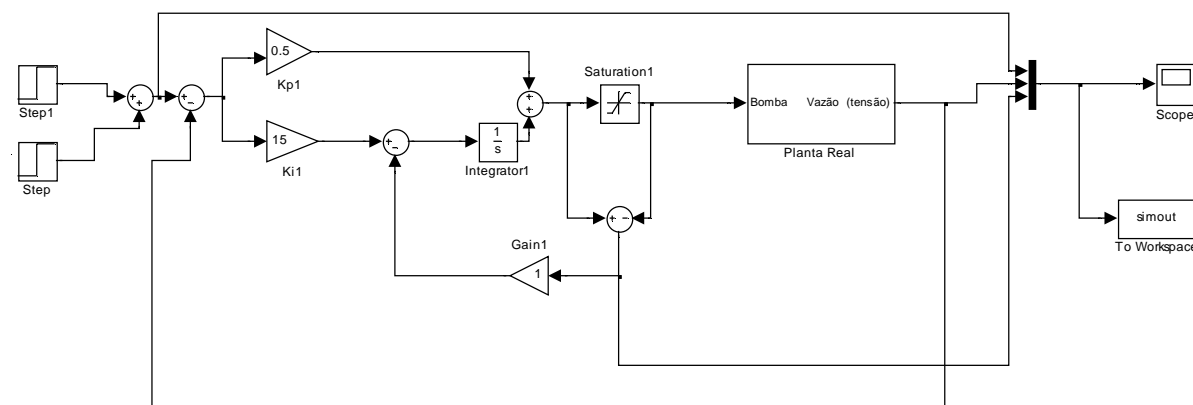
Aplicando-se um degrau de amplitude 0,2 para esta função de transferência obtida e sobrepondo o resultado com a Figura 43, obtém-se o que consta na Figura 44.





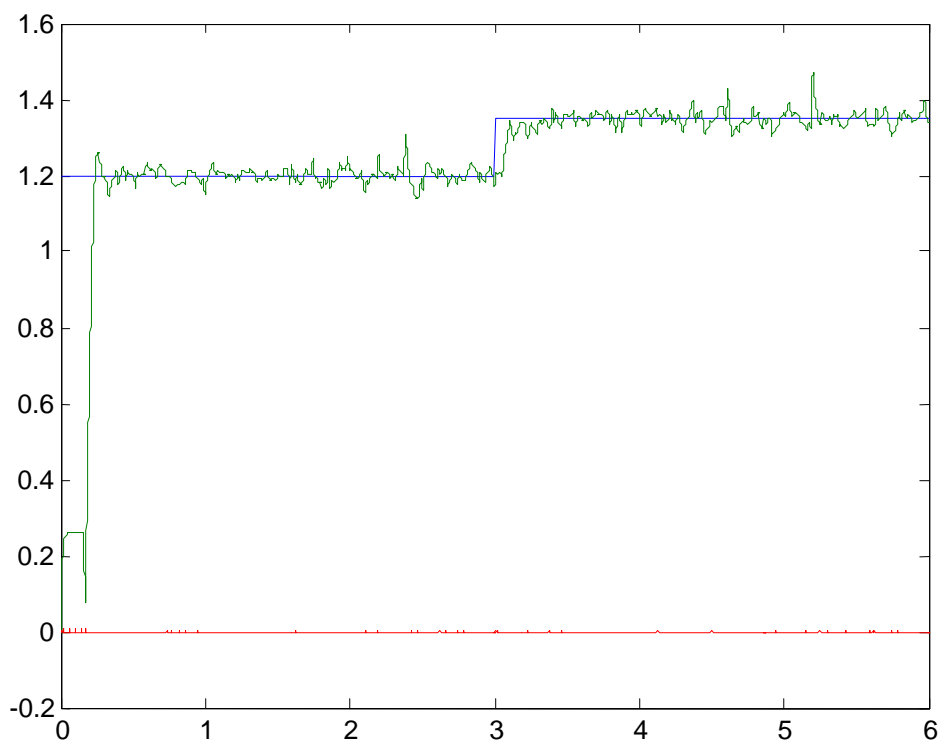
**Figura 44 - Comparação entre resposta real e simulada para mesma entrada.**  
**Fonte: Autoria própria (2014).**

Uma vez que esta função de transferência representa com boa fidelidade a resposta obtida para pequenas variações em torno do ponto de operação desejado do sistema real, o controlador pode ser projetado baseado nesta função de transferência para alguma especificação de desempenho desejada, sendo realizado o mesmo procedimento utilizado para o processo de vazão. Assim, um controlador PI também é utilizado neste caso, diferindo apenas os ganhos em relação ao processo de nível, como mostra a Figura 45.



**Figura 45 - Diagrama com controlador PI para obtenção da resposta controlada.**  
**Fonte: Autoria própria (2014).**

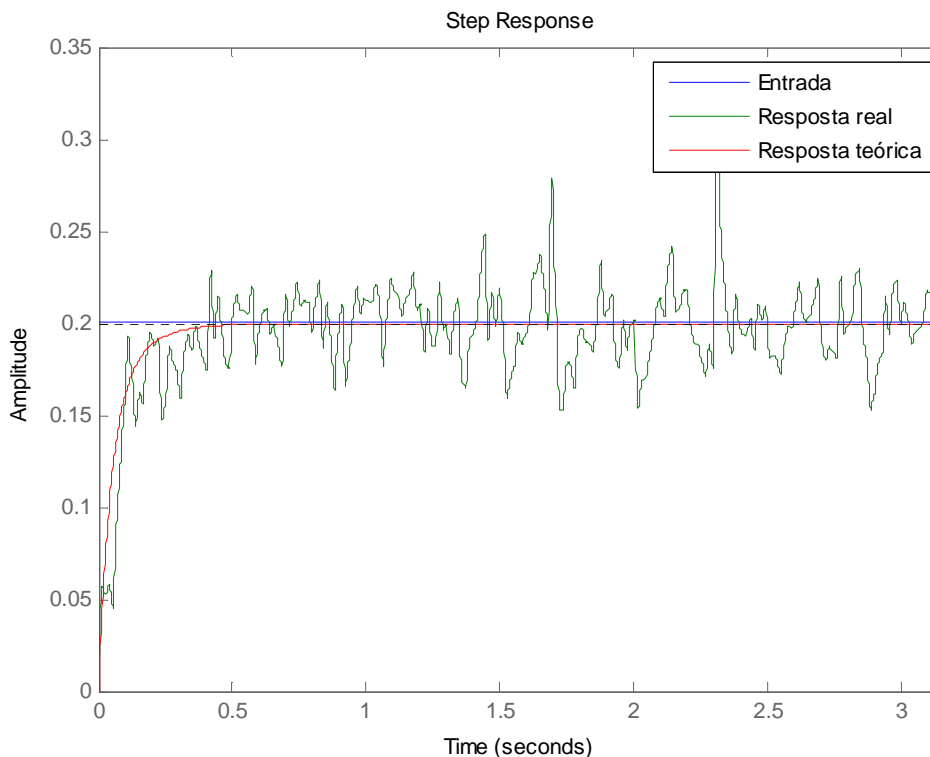
Para atingir a especificação de desempenho desejada, o ganho necessário é de 0,5 para a ação proporcional e 15 para a ação integral. Com este esquemático, obteve-se a resposta contida na Figura 46.



**Figura 46 - Resposta à malha fechada com controlador PI para o processo de vazão.**  
**Fonte: Autoria Própria (2014).**

Separando novamente a resposta obtida após o degrau de 0,2V e sobrepondo-a com a resposta a um degrau de 0,2V na função de transferência dada

pela multiplicação entre a planta e o controlador, obtém-se o resultado como mostra a Figura 47.



**Figura 47 - Resposta real e simulada para o sistema de vazão compensado.**  
**Fonte: Autoria própria (2014).**

Analisando esta resposta com a da Figura 44, pode-se observar que a melhoria na especificação de desempenho desejada ocorreu, sem causar alteração em alguma outra especificação prejudicialmente e corrigindo o erro em regime permanente.

### 3.5 RESULTADOS OBTIDOS

Com relação aos sinais obtidos através do condicionamento de sinais, as respostas obtidas para o processo de nível apresentam melhor qualidade em relação às repostas obtidas para o processo de vazão. Isto porque o primeiro possui uma resposta muito mais lenta que este último. Assim, o sinal pulsante gerado pelo sensor optoeletrônico utilizado no processo de vazão precisaria ser manipulado com um *software* que possuísse taxa de aquisição compatível com seu sinal, o que não é

o caso do Matlab. Contudo, a função de transferência obtida para seu modelo linear ainda possui fidelidade à resposta real, sendo possível realizar seu controle.

A partir dos resultados obtidos para os processos de nível e vazão, algumas observações podem ser feitas. Para o processo de nível, o modelo controlado obtido é válido para variações de até 0,3V acima do ponto de operação definido para 3V. Assim, desejando-se outro ponto de operação com diferente faixa de variação, outro modelo linear deve ser estabelecido. Para o processo de vazão a análise é análoga, sendo que para o modelo controlado obtido a variação é de 0,2V acima do ponto de operação desejado.

#### 4. CONCLUSÕES

No desenvolvimento de um projeto de recondicionamento, há fatores que interferem diretamente em sua análise e execução. Para este caso de recondicionamento de bancada didática, o qual visa-se a boa exequibilidade aliada ao baixo custo, inicialmente torna-se indispensável o condicionamento de sinais provenientes de sensores e, também, de sinais a serem gerados para os atuadores, isto por se tratar de um equipamento de patrimônio público, onde as características originais de funcionamento devem ser mantidas. Outro fator que torna necessário o condicionamento é, por objetivar-se o baixo custo, a utilização da placa de aquisição de dados com a qual os sinais de sensores e atuadores eram incompatíveis.

Uma vez com os sinais condicionados, os processos podem ser analisados a fim de obter-se sua modelagem no domínio da frequência. Para tanto, a linearidade do sistema deve ser estabelecida em um primeiro momento, pois para cada caso (linear ou não linear) as análises e ações a serem seguidas diferem uma da outra. Como visto, em ambos os casos tratou-se de sistemas não lineares, o que torna a aproximação linear em torno de um ponto de operação dos mesmos necessária. Assim, para cada ponto de operação escolhido, em torno do qual a aproximação linear do sistema é feita, uma função de transferência é obtida.

Em seguida, a partir da função de transferência correspondente à planta do sistema, define-se alguma especificação de desempenho desejada, seja ela tempo de subida, tempo de assentamento, valor de ultrapassagem, entre outros, para que o controlador a ser projetado atenda esta especificação. Assim, utilizando-se de alguma das abordagens para projeto de controladores, a função de transferência do controlador é obtida baseada na especificação de desempenho desejada.

Em aspectos técnicos, este trabalho englobou algumas disciplinas da grade curricular do curso, sendo elas: Eletrônica B, Sistemas Microcontrolados, Sistemas Lineares e, principalmente, Sistemas de Controle. Em linhas gerais, a disciplina Eletrônica B serviu como base para o desenvolvimento do circuito de condicionamento para o processo de nível. Sistemas Microcontrolados se fez necessária para o condicionamento de sinal do processo de vazão, utilizado o microcontrolador MSP430. Sistemas Lineares e Sistemas de Controle compuseram

a base do trabalho, sendo necessárias também para obtenção dos modelos lineares de cada processo e também para realizar o controle a malha fechada com o controlador projetado a partir de uma especificação de desempenho.

Por fim, a bancada utilizada para este trabalho possui um total de quatro processos para controle: nível, vazão, temperatura e pressão. Dentre estes, os processos de nível e vazão foram recondicionados de acordo com os objetivos deste trabalho. No entanto, os processos de temperatura e pressão ainda encontram-se sem utilização pelos mesmos motivos citados como justificativa para os outros dois processos. Então, surge a oportunidade para realização de trabalhos futuros com relação ao recondicionamento destes processos. Também podem ser desenvolvidos supervisórios no *software* LabView para uma análise diferenciada. Assim, ficam estas sugestões para que se tornem disponíveis mais meios para o ensino da teoria de controle experimental, como foi o intuito deste trabalho.

## 5. REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Octávio; FREITAS, Ricardo. **Condicionamento de Sinal**. Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, p. 6. 2003.

DIDACTA ITALIA. Didacta - Produtos e Serviços. **Didática Index**, 2012. Disponível em: <[http://www.didacta.it/portoghese/dps\\_pt.htm](http://www.didacta.it/portoghese/dps_pt.htm)>. Acesso em: 11 abr. 2012.

DORF, Richard C.; BISHOP, H. R. **Sistemas de Controle Modernos**. Tradução de Jackson Paul Matsuura. 11ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 724 p. ISBN 978-85-216-1714-3.

FESTO. **Control of temperature, flow, pressure and filling level manual**. 1998. Festo Didact, 1998.

FESTO. Festo Brazil - Didactic. **Festo Brazil**, 2012. Disponível em: <[http://www.festo.com/cms/pt-br\\_br/172.htm](http://www.festo.com/cms/pt-br_br/172.htm)>. Acesso em: 11 abr. 2012.

INSTRUMENTS, National. Low-Cost, Bus-Powered Multifunction DAQ for USB, 2010. Disponível em: <<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-218/lang/pt>>. Acesso em: 27 Janeiro 2014.

LLK ENGENHARIA E COMÉRCIO LTDA. Sobre a Empresa: LLK Engenharia e Comércio Ltda. **Site da LLK Engenharia e Comércio Ltda**, 2010. Disponível em: <[http://www.llk.com.br/pt/produtos/llk/BDS+\(Bancadas+Did%EA1ticas\)](http://www.llk.com.br/pt/produtos/llk/BDS+(Bancadas+Did%EA1ticas))>. Acesso em: 04 abr. 2012.

NISE, Norman S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. Tradução de Fernando Ribeiro da Silva. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 625 p. ISBN 978852161704-4.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1998. 813 p. ISBN 85-7054-074-4.

WEG S.A. Bancadas Didáticas para Treinamentos. **WEG**, 2012. Disponível em: <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Paineis-Eletricos/Bancada-Didatica/Bancadas-Didaticas-para-Treinamentos>>. Acesso em: 11 abr. 2012.